

# 大规模风电外送中的次同步振荡问题

毕天姝<sup>1</sup>, 孔永乐<sup>1</sup>, 肖仕武<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>, 张 涛<sup>2</sup>, 刘 全<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘 要:** 目前, 中国正在建设 7 个千万 kW 级风电基地, 大规模风电外送成为必然. 串补交流输电和高压直流输电作为风电外送的 2 种重要方式可能会诱发次同步振荡问题. 分析鼠笼异步型、双馈感应型和永磁同步型风电机组的结构特点, 论述次同步谐振、装置引起的次同步振荡以及风电机组控制器引起的次同步振荡, 并分析总结不同类型风电机组可能发生的次同步振荡类型. 最后, 指出亟待研究解决的问题.

**关 键 词:** 次同步振荡; 次同步谐振; 装置引起的次同步振荡; 控制器引起的次同步振荡; 风力发电系统

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-9140(2012)01-0010-06

## Review of sub-synchronous oscillation with large-scale wind power transmission

BI Tian-shu<sup>1</sup>, KONG Yong-le<sup>1</sup>, XIAO Shi-wu<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, LIU Quan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Now, China is building 7 wind power bases with the capacity over ten million kilowatts, and the large scale wind power transmission is essential due to the unbalance distribution of sources and loads. Series compensated AC transmission and high voltage DC transmission (HVDC), as two main transmission modes, may lead to sub-synchronous oscillation when they are applied to wind power transmission. The structural characteristics of wind turbine generators were analyzed in this paper, including squirrel cage induction generator (SCIG), doubly-fed induction generator (DFIG) and permanent magnetic synchronous generator (PMSG). Three kinds of sub-synchronous oscillation, i. e. sub-synchronous resonance (SSR), sub-synchronous oscillation caused by electronic devices (SSTI), and sub-synchronous oscillation caused by controllers of wind turbines (SSCI) were clarified. In addition, the possible types of sub-synchronous oscillation for the different kinds of wind turbine generators were also discussed. Finally, the urgent problems need to be studied were analyzed as well.

收稿日期: 2012-02-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2012AA050208)

通讯作者: 毕天姝(1973-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护与控制、广域同步相量测量技术及应用、故障诊断等研究;  
E-mail: tsbi@ncepu.edu.cn

**Key words:** sub-synchronous oscillation; sub-synchronous resonance (SSR); sub-synchronous oscillation caused by electronics devices (SSTI); sub-synchronous oscillation caused by controllers of wind turbines (SSCI); wind power generation system

次同步振荡最早发现于火力发电系统中. 19 世纪 70 年代, 美国 Mohave 电厂次同步振荡事故导致其发电机大轴损坏, 引起学术界次同步振荡研究的热潮, 并在机理分析、分析方法及抑制对策等方面取得显著成果<sup>[1-2]</sup>.

当今大规模开发利用风电已成为中国能源战略的重要组成部分. “十二五”期间, 在甘肃、新疆、河北、吉林、内蒙古、江苏等地规划建设 7 个千万 kW 级风电基地<sup>[3-4]</sup>. 由于资源与负荷中心逆向分布, 使得大容量、远距离风电外送势在必行. 串补电容技术和高压直流输电技术能够有效提高线路输送容量, 是实现大规模风电外送的 2 种主要方式, 但可能会诱发风电系统的次同步振荡问题, 影响大规模风电基地及外送系统的安全稳定运行<sup>[5-6]</sup>.

2009 年 10 月, 美国德克萨斯州的一处风电场发生了串补电容引起的次同步振荡事故, 造成风电场大量机组跳机以及大量撬棒电路损坏<sup>[7]</sup>. 这次事故后, 越来越多的学者认识到风力发电系统次同步振荡问题严重, 开始对此问题进行研究.

笔者在分析 3 种常见风电机组结构的基础上, 分析总结不同类型风力发电系统可能发生的次同步振荡类型, 并阐述当前研究现状, 指出亟待研究解决的问题.

## 1 风电机组结构

主流风电机组主要有鼠笼异步型风电机组、双馈感应型风电机组和永磁同步型风电机组. 这 3 类风电机组由于拓扑结构不同, 其利用串联电容补偿技术或高压直流输电技术外送风电可能发生的次同步振荡类型也不同.

鼠笼异步型风电机组结构简单, 是风力发电中最早使用的机型, 目前, 风电场中还有一定数量的此类风电机组. 鼠笼异步型风电机组采用鼠笼异步发电机转换能量, 发电机正常运行时速度仅在很小范围内变化. 其轴系主要包括高速轴、齿轮箱和低速

轴三部分, 与火电机组相比较短, 而且齿轮箱的存在使得风电机组轴系的刚度很小, 约为 0.15~0.40. 轴系的柔性使得风电机组轴系的自然扭振频率很小, 一般在 1~2 Hz<sup>[8-9]</sup>.

双馈感应型风电机组可以实现有功功率和无功功率的解耦控制, 这一良好的调节特性使其成为市场目前主流机型之一. 双馈感应型风电机组采用双馈感应发电机转化能量, 发电机定子与电网直接连接. 转子通过一个 AC/DC/AC 变频器与电网连接, 风电机组不要求以固定速度运行, 转速可以通过变频器动态控制调节<sup>[9]</sup>. 双馈感应型风电机组的轴系和鼠笼异步型风电机组相类似, 也具有低自然扭振频率的特点.

永磁同步型风电机组采用永磁体励磁, 效率高, 是目前市场上另外一种主流机型. 永磁同步型风电机组采用永磁同步发电机实现能量转换. 其定子与电网不直接耦合, 通过全功率 AC\DC\AC 变频器与电网连接, 因此, 轴系很难与电网电气量直接耦合产生扭振. 由于永磁同步型电机轴系不存在齿轮箱, 风轮和发电机直接连接, 其轴系刚度比以上 2 种风电机组要大.

## 2 大规模风电外送中的次同步振荡问题分析

风电机组结构特点决定了其在采用串补或 HVDC 外送输电时的次同步振荡问题和火电机组不完全相同. 除了可能发生次同步谐振和装置引起的次同步振荡外, 风电机组内部变频器控制同样可能引起次同步振荡问题<sup>[10]</sup>.

### 2.1 次同步谐振(SSR)

次同步谐振是火力发电中经常遇到的次同步振荡现象之一. 早在 1970 和 1971 年, 美国 Mohave 电站发生的发电机大轴扭振破坏就是该类型的次同步振荡引起的<sup>[11]</sup>. IEEE 工作组将同步谐振定义为次电力系统的一种不正常运行状态, 在这种运行状态

下,电气系统和汽轮发电机组以低于系统同步频率的某个和多个振荡频率显著交换能量,从而危害汽轮发电机安全的动态过程<sup>[12]</sup>.

考虑图1所示的风电外送等值系统,电气系统的自然谐振频率为

$$f_{er} = f_0 \sqrt{X_C/X_L}. \quad (1)$$

式中  $f_0$  为同步频率. 在次同步频率下,发电机的等值电阻为负,如果该负值超过变压器和输电线路等值电阻系统则会产生负阻尼,系统会因为感应发电机效应而发生次同步谐振<sup>[13]</sup>.

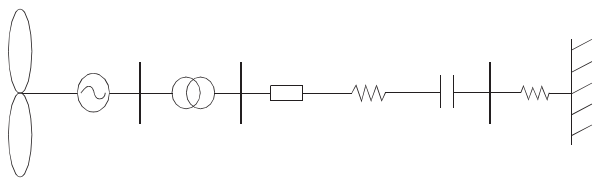


图1 采用串补输电的风电外送系统示意

Figure 1 Wind generation and its transmission system with series compensation

设发电机旋转频率  $f_m$ , 当具有电气谐振频率  $f_{er}$  的电流  $I_{s1}$  流过定子绕组时,转子上会感应出频率  $f_{er} - f_m$  的电流分量  $I_{r1}$ , 同时定子中的工频电流分量  $I_{s2}$  在转子上感应出频率  $f_0 - f_m$  的电流  $I_{r2}$ . 转子和定子电流分量相互作用,产生4个电磁转矩分量,如表1所示. 4个电磁转矩分量之和就是发电机的电磁转矩,其频率  $f_T = f_0 - f_{er}$ . 如果此时发电机轴系自然扭振频率在  $f_T$  附近,即系统电气谐振频率和发电机轴系自然扭振频率互补时,发电机和串补系统间通过持续的弱阻尼振荡或暂态作用进行能量交换,将会导致发电机轴系疲劳或临界失效,通常称之为机电扭振互作用<sup>[13]</sup>.

表1 各转矩分量

Table 1 Torque components

转矩	相互关系	频率
$T_1$	$I_{s1}, I_{r1}$	0
$T_2$	$I_{s1}, I_{r2}$	$f_0 - f_{er}$
$T_3$	$I_{s2}, I_{r1}$	$f_0 - f_{er}$
$T_4$	$I_{s2}, I_{r2}$	0

鼠笼异步型风电机组和双馈型风电机组的定子都与电网直接相连,与火电机组具有相似性. 谐振电

流同样可以进入发电机定子绕组内导致次同步谐振的发生. 但这2种风电机组的自然扭振轴系频率很低,要想激发风电机组轴系低频率的扭振模态,需要很高谐振频率的电流,即很高的线路串补度. 因此,同等串补度下,鼠笼异步型和双馈感应型风电机组发生次同步谐振比火电机组难. 对于永磁同步型风电机组,由于发电机与电网没有直接耦合,次同步谐振电流无法进入发电机定子绕组内,因此,永磁同步型风电机组采用串补电容时不会发生次同步谐振.

次同步谐振机理、分析方法和抑制方面的研究很多,但主要集中在传统火力发电系统上,风力发电系统次同步谐振问题研究则刚刚起步. 文献[14-18]初步探讨了鼠笼异步型风电机组采用串补外送风电时发生次同步谐振的机理,利用时域仿真法研究了鼠笼异步型风电机组次同步谐振的影响因素,指出了线路串补度和风电场出力影响谐振发散程度. 串补度越高,输出有功功率越高,则次同步谐振发散越严重. 上述文献还尝试了利用FACTS控制器(Static Var Compensator, SVC)、可控串补(Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC)、静止同步无功补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)和统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)来抑制鼠笼异步型风电机组次同步谐振,给出了抑制措施的仿真结果.

文献[19]建立了用于次同步谐振分析的双馈感应型风电机组模型,利用特征值分析法和时域仿真法分析了影响双馈感应型风电机组次同步谐振的主要因素. 研究发现:风速越低、串补度越高,双馈感应型风电机组次同步谐振越严重. 文献[20]为双馈感应型风电机组设计了SSR阻尼控制器,并通过算例仿真验证了有效性.

然而,上述研究中的模型大部分是单机一无穷大等值系统模型,即将整个风场简单等值为1台风电机组;为仿真产生SSR现象,普遍使用了70%以上的串补度,与实际系统不符;研究方法基本只使用时域仿真法,尚不能从机理层面揭示发生次同步谐振的原因.

## 2.2 装置引起的次同步振荡(SSOI)

高压直流输电(HVDC)及FACTS等电力电子装置的控制参数不合理也可能引起发电机次同步振荡,统称为装置引起的次同步振荡. 1977年,美国

的 Square Butte 电厂在投入 HVDC 输电线路时,发生了扭振现象<sup>[21]</sup>,这是工程中最先遇到的装置引起的次同步振荡问题.电力电子装置的控制器在次同步频率范围内对功率、电流等进行快速控制或响应,会影响到发电机电磁转矩和转速的相位差.如果电磁转矩和转速的相位差超过  $90^\circ$ ,这些装置就会给发电机引入负阻尼,从而引起发电机轴系的次同步增幅振荡<sup>[5]</sup>.

鼠笼异步型和双馈感应型风电机组与电网紧密耦合,附近存在电力电子装置时可能会给发电机引入负阻尼,发生次同步振荡.同样,位于电力电子装置附近时,鼠笼异步型和双馈感应型风电机组要比火电机组更容易发生次同步振荡,这是因为这 2 种风电机组轴系自然扭振频率相对较低,而直流输电对较低的扭振频率更易引起负阻尼作用.

此外,双馈感应型和永磁同步型风电机组本身内部存在变流控制器,如果该变流控制器的参数不合理,在次同步区段表现出负阻尼特性,同样可能成为风力发电机组次同步振荡的激发源.

目前,装置引起的次同步振荡研究主要集中在火电机组利用 HVDC 外送电能时的次同步振荡问题上.风力发电发展较晚,实际工程中尚未遇到装置引起的次同步振荡问题,因此其研究较少.文献<sup>[22]</sup>初步研究了鼠笼异步型风电机组利用 HVDC 外送风电时的次同步振荡问题.文献<sup>[9]</sup>指出转子侧变换器的级联控制回路参数设置不合理是引起双馈感应型风电机组次同步扭振的主要原因,并提出在转子侧变流器控制中加入一个阻尼环来抑制机组的次同步扭振.阻尼环 PI 控制器参数整定需要了解轴系的固有频率,并且与变流器控制的其他参数相协调.

### 2.3 风电机组控制器与外部控制器耦合引起的次同步振荡 (SSCI)

风电机组控制器引起的次同步振荡问题是随着风力发电快速发展而产生的一种新的次同步振荡现象.与次同步谐振和装置引起的次同步振荡不同,风电机组控制器引起的次同步振荡和机械系统没有任何联系.此类次同步振荡的频率和衰减率由风电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完全无关,且比次同步谐振 SSR 发散得更快,应引起足够的重视.图 2 所示为 2009 年美国德

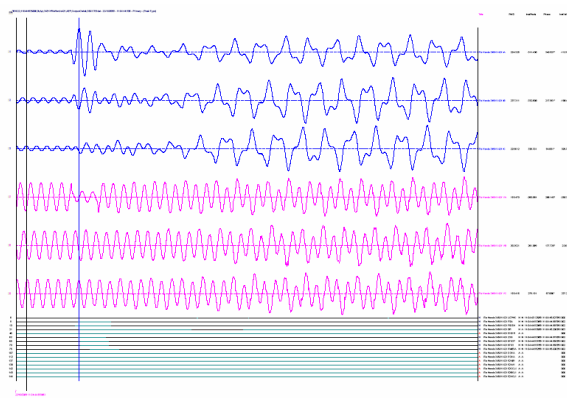


图 2 美国风场次同步振荡事故录波  
Figure 2 Recorded wave of the SSO accident in an American wind farm

克萨斯州风场次同步振荡事故风场内电压和电流录波<sup>[7]</sup>,这是人们第 1 次在工程中遇到 SSCI 问题.

风电机组控制器引起的次同步振荡是由电气谐振回路的谐振电流引起的.对于图 3 所示采用串补的风电外送系统,谐振电流在发电机转子上感应出对应的次同步频率电流,该电流会引起转子电流波形畸变和相位偏移,变流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,如此构成一个闭环系统.如果输出电压助增转子电流增大,谐振电流的振荡将不稳定,进而引起整个系统的不稳定振荡<sup>[23]</sup>.

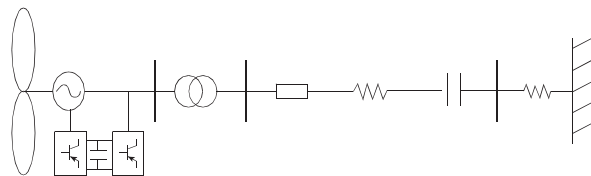


图 3 采用串补的双馈感应型风电机组  
Figure 3 Double-fed wind generator with series compensation

鼠笼异步型风电机组中无电力电子装置,因此,在利用串补电容外送风电时不存在 SSCI 问题.双馈感应型风电机组定子直接连接电网,转子上使用了 AC/DC/AC 变频器,谐振电流易进入发电机的控制器内部,可能引起系统不稳定振荡,因此,双馈感应型风电机组利用串补电容外送风电时易发生 SSCI.永磁同步型虽然存在电力电子装置,但发电机和电网不耦合导致谐振电流无法进入发电机,因

此,在利用串补电容外送风电时也不存在 SSCI 问题<sup>[24]</sup>.

目前 SSCI 的机理还不明确,分析方法和抑制措施研究较少.文献<sup>[23]</sup>阐述了双馈感应型风电机组利用串补电容外送风电时 SSCI 发生的原因,并设计了 SSCI 阻尼控制器,利用一个超前滞后环节来抑制次同步控制互作用,取得了较好的抑制效果,但该阻尼控制器是针对特定控制策略设计的.

综上所述,次同步谐振倾向于串补系统和发电机间的相互作用;装置引起的次同步振荡强调发电机和电力电子等快速控制装置间的相互作用;风电机组控制器与外部系统耦合引起的次同步振荡强调串补输电系统和风电机组内部变流控制器间的相互作用.

不同类型风电机组可能产生的次同步振荡问题如表 2 所示.事实上,由于大规模风电场或者场群一般是由多种类型的风电机组共同组成,所以其产生的次同步振荡与抑制问题将更为复杂.

表 2 不同类型风电机组次同步振荡问题对比

Table 2 Contrast of sub-synchronous oscillation problems for different types of wind generators

机组	SSR	SSTI	SSCI
鼠笼异步型风电机组	√	√	—
双馈感应型风电机组	√	√	√
永磁同步型风电机组	—	√	—

### 3 结语

风力发电系统的结构、并网方式与传统火力发电机组相比均有本质的区别,而且风电场/场群又是由多种类型风电机组构成,导致大规模风电基地外送的次同步振荡问题变得十分复杂.在火力发电机组及外送系统中比较成熟的次同步振荡建模、机理分析与抑制对策的研究成果还不能直接应用到风力发电机组中,需要进一步研究.而风电机组自身控制器引起的次同步振荡现象在工程中发生较晚,无论国内还是国外目前研究基本是空白.随着中国大规模风电基地建设,其次同步振荡建模、分析与抑制对策成为亟待解决的问题.

### 参考文献:

- [1] Kunder P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1994.
- [2] 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,2008.
- [3] 中国可再生能源学会风能专委会. 2010 中国风电装机容量统计[EB/OL]. <http://www.cwea.org.cn/>,2011-03-18.
- [4] 中华人民共和国发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划[EB/OL]. <http://www.cwea.org.cn/>,2007-08-31.
- [5] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [6] Pourbeik P, Koessler R J, Dickmader D L, et al. Integration of large wind farms into utility grids (Part 2 – Performance Issues)[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Conference, Dallas, Texas, USA, 2003.
- [7] Belkin P. Event of 10/22/09[EB/OL]. <http://www.ercot.com/calendar/2010/01/20100126-TECH>. 2010-01-26.
- [8] Mei F, Pal B. Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 2007, 22(3):728-736.
- [9] Vladislav Akhmatov. 风力发电用感应发电机[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [10] Irwin G D. Sub-synchronous interactions with wind turbines[C]. Technical Conference-CREZ System Design and Operation, Taylor, Texas, USA, 2010.
- [11] Walker D N, Bowler C E, Jackson R L, et al. Results of sub-synchronous resonance test at mohave [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5):1 878-1 889.
- [12] IEEE Sub-synchronous Resonance Working Group. Proposed terms and definitions for sub-synchronous oscillations[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(2):506-511.
- [13] IEEE Committee Report. Reader's guide to sub-synchronous resonance[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1992, 7(1):150-157.
- [14] Varma R K, Auddy S. Mitigation of sub-synchronous resonance in a series-compensated wind farm using FACTS controllers[J]. IEEE Transactions on Power

- Delivery, 2008, 23(3):1 645-1 654.
- [15] Varma R K, Auddy S. Mitigation of sub-synchronous resonance in a series-compensated wind farm with static var compensator[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montrail, Canada, 2006.
- [16] Varma R K, Semsedini Y, Auddy S. Mitigation of sub-synchronous resonance in a series-compensated wind farm with thyristor controlled series capacitor (TCSC) [C]. Proceedings of IEEE Power Systems Conference: Advanced Metering Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, Clemson, SC, USA, 2007.
- [17] El-Mousri 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 parks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2):429-441.
- [18] 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.
- GU Wei, LI Xing-yuan, WANG Yu-hong. Mitigation effect of UPFC on sub-synchronous oscillations in a wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 101-105.
- [19] Fan L, Kavasseri R, Miao Z L. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):2 073-2 082.
- [20] Zhu C X, Fan L L, Hu M Q. Control and analysis of DFIG-based wind turbines in a series compensated network for SSR damping[C]. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE Digital object Identifier: 10.1109/PES.2010.5590091 Publication Year, Minneapolis, MN, USA, 2010.
- [21] 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, 1980, 99(3): 966-975.
- [22] Choo Yin Chin, Agalgaonkar A P, Muttaqi K M, et al. Sub-synchronous torsional interaction behavior of wind turbine-generator unit connected to an HVDC system[C]. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Publication Year, Glendale, AZ, USA, 2010.
- [23] Irwin G D, Jindal A K, Isaacs A L. Sub-synchronous control interaction between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems [C]. IEEE PES General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011.
- [24] Reed G. CREZ project overview [EB/OL]. <http://www.ercot.com/calendar/2010/01/20100126-TECH>, 2010-01-26.