

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190676

双馈风电场接入串补输电系统引发次同步谐振的研究模型

杨博闻¹, 占颖², 谢小荣², 严干贵¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;
2. 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

摘要: 双馈风电场连接固定串联电容补偿输送电力的系统容易产生次同步谐振(SSR)。对于经电力电子变流装置接入系统的双馈风电场, 其 SSR 特性与传统的 SSR 不同, 双馈风机的变流器控制环节对 SSR 具有重要的影响。为了分析这种电力电子设备接入导致的新型 SSR 问题, 以发生了此类 SSR 事故的国内某大规模风电汇集地区风电场为原型, 建立了实际系统的等值模型。该等值模型可以作为研究此类 SSR 问题的一种标准模型, 从而进一步对其产生机理、振荡特性以及抑制措施展开研究。验证了所提研究模型的有效性。利用该模型, 通过时域仿真方法分析出各因素对双馈风机串补系统稳定性的影响。根据得到的结论提出了抑制此类 SSR 的措施。

关键词: 次同步谐振; 双馈风电场; 研究模型

A study model for subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to a series-compensated power system

YANG Bowen¹, ZHAN Ying², XIE Xiaorong², YAN Gangui¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. State Key Lab of Power Systems (Department of Electrical Engineering), Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Subsynchronous resonance (SSR) may occur in DFIG based wind farms connected to series compensated transmission systems. Different from the traditional SSR accident, the converter control parameters have an important influence on the SSR phenomenon because of the access of power electronic equipment. In order to facilitate research on the new SSR problems caused by the access of power electronics devices, this paper establishes an equivalent model based on the actual parameters of some wind farms, where this kind of SSR accident has taken place. The equivalent model can be used as a standard model for studying the mechanism, characteristics and mitigation of this kind of SSR problem. Then, the validity of the proposed model is verified. Further, a time-domain simulation method is used to analyze this study model, so as to obtain the influence of the changes of various factors on DFIG stability. Some measures are put forward to mitigate such SSR accidents based on the results of the analysis.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900104), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGXJ0000KXJS1700841), and Integration Project of Smart Grid Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U1866601).

Key words: sub-synchronous resonance; DFIG based wind farm; study model

0 引言

电力电子装备的深入发展与应用促进了可再生

能源广泛投入使用于电力工业, 近年来, 风电在电力系统中逐渐表现为高渗透率。双馈风机动态调节灵活, 且对于风能转化电能的利用效率较高, 是一种使用较为广泛的风力发电机组^[1]。提高线路输送容量行之有效的办法之一, 是采用串补电容输电, 因此这种办法在风电远距离输送中得到广泛应用^[2-3]。由于双馈风电场连接固定串联电容补偿向系统

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900104); 国家电网公司科技项目资助(SGXJ0000KXJS1700841); 国家自然科学基金智能电网联合基金集成项目资助(U1866601)

输送电力时, 容易产生 SSR。不同于汽轮发电机组与固定串补间的相互作用, 在双馈风电场的电气谐振现象中, 变流器控制环节具有重要的影响, 因此有必要对这种因电力电子设备接入而引发的新型电力系统振荡事故进行深入研究^[4]。

美国南部地区某风电场通过固定串补输电接入系统曾引发 SSR 事故。我国某大规模风电汇集地区风场经串补电容外送系统, 投运后也多次出现 SSR 现象。风电机组和汇集线路上出现大幅次同步频率的振荡, 导致相应的保护装置动作, 引起大量风机脱离电网。同时变压器工作在偏磁状态, 产生特殊振动, 发出噪声, 极易造成设备损害, 从而破坏电网的稳定性。国内该风电场 SSR 事故发生在正常运行中风速偏低、功率下降的时刻^[5-6], 而德州的 SSR 事故发生在电网故障的情况下。而且国内该地区的风电场线路的串补度并不高, SSR 频率为 6~8 Hz, 明显低于德州发生 SSR 的谐振频率。因此, 现有文献[7-8]对德州风电场 SSR 现象的研究结果并不完全适用于国内该地区风电场 SSR 问题。

本文以该大规模风电汇集地区实际系统为原型, 建立分析双馈风机串补系统 SSR 问题的研究模型, 从而可以在一个标准模型下对该类型 SSR 现象的产生机理、振荡特性以及抑制措施等方面进一步展开研究。本文首先对该地区风电场进行描述, 并通过合理简化得到其等值系统。然后建立等值系统中传输网络、双馈风电机组各模块模型, 同时计算相关参数。接着, 使用 PSCAD 软件对上述研究模型进行仿真复现, 通过实验结果佐证了模型的有效性。再进一步仿真分析风速、并网风机数量、DFIG 控制参数以及串补度等因素对 SSR 稳定性和振荡频率的影响。

1 原型系统及其等值模型

本文选取的大规模风电汇集地区共有风电场 20 多家, 并网风机 2 000 多台, 其中大部分为双馈感应发电机。该地区风场通过 220 kV 输电线路汇集到升压站, 之后, 通过 500 kV 含串联电容补偿的输电线路分两条支线接入主网, 风电场的输电系统示意图见图 1。

由于该集群式风电场具有结构复杂的输电网络以及多种多样的风机类型, 因此, 在研究时有必要做适当的简化。当风电机组差别不大时, 可以忽略各风机运行参数和地理位置的不同造成的风机输出功率及输电线路阻抗的差异。采用单机等值模型分析整个风电机组的动态行为^[9], 一方面降低了对于建立大规模风机群模型的要求, 另一方面能够得到

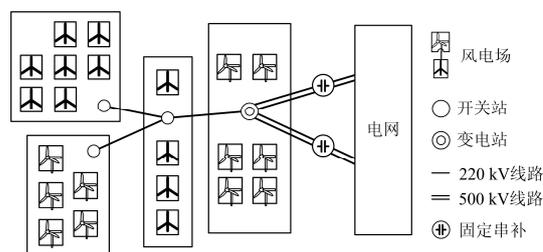


图 1 某地区风电场的输电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the wind farm transmission system

与简化模型之前相似的结论。为了反映运行过程中并网风机数量的变化, 当机组具有相同结构和运行条件时, 进一步可将大容量的单机等值模型表示成 N 台控制参数及运行状态相同的小容量的风机, 从而可以通过改变 N 的大小来反映并网风机数量对 SSR 特性的影响。多机系统流过汇流站母线的电流大小为原来单机的 N 倍, 但母线电压值不变, 所以相当于 N 台风机经箱式变压器后并联接入汇流站母线。

风电经 220 kV 输电线路到升压站后, 通过一条 500 kV 串补线路输送到交流主网, 串补电容的值代表线路串补度水平^[10]。

综上, 实际系统的简化等值模型如图 2 所示^[11]。等值模型由传输网络和双馈风力发电机组两大模块组成, 风力机、感应电机、轴系、变流器及其控制系统共同构成后者, 各模块的详细建模见第 2 部分。

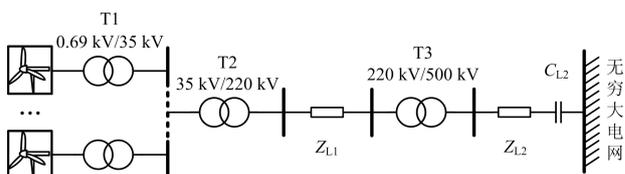


图 2 实际系统等值模型

Fig. 2 Simplified equivalent model of the practical system

2 研究模型

2.1 传输网络

各风机发出的风电经 0.69 kV/35 kV 箱式变压器升压后汇集到汇流站母线, 经 35 kV/220 kV 线路变压器升压后, 通过 220 kV 传输线路输送到升压站, 再通过 500 kV 串补线路输送到交流主网。文献[12]已给出网络相关参数的详细计算过程。

特别指出, 为了模拟多个风电机组同时运行, 对变压器模型进行了简化, 这不仅可以提升电压, 还可以增加输出电流。根据上文分析, 简化后的变压器模型相当于 N 个并联的变压器, 如图 3 所示, 分别使用受控电压源和受控电流源来实现变压和变

流的功能。电压及电流计算公式为

$$U_G = U_S \cdot k_V \quad (1)$$

$$k_1 = N \cdot k_V \quad (2)$$

$$I_S = I_G \cdot k_1 \quad (3)$$

式中： U_G 和 U_S 分别表示风机电压和电网电压； I_G 和 I_S 分别表示风机电流和电网电流； k_V 表示变压器的变比， k_V 取为 35/0.69。

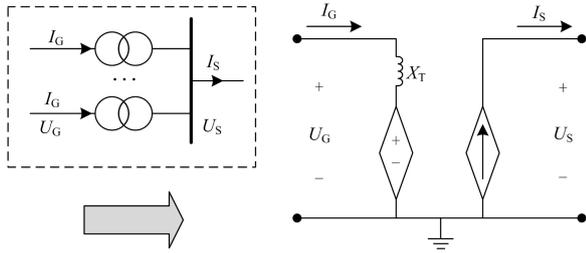


图 3 多变压器模型简化

Fig. 3 Multi-transformer model simplification

2.2 双馈风力发电机组

双馈风力发电机组的结构如图 4 所示，风力机为原动机，经轮毂、传动轴(高、低速轴)、齿轮箱的机械传动作用拖动发电机旋转，与电网直接相连是其定子侧，通过变流器并入主网是其转子侧。变流器由 2 个“背靠背”连接的三相电压源型全桥变流器组成，一个是网侧变流器(GSC)，另一个是转子侧变流器(RSC)。二者通过并接了滤波电容 C 的直流线路相连，其作用是保持直流母线的电压稳定^[13-14]。以下分别建立风力机、感应电机、轴系、变流器及其控制系统等模块的模型。

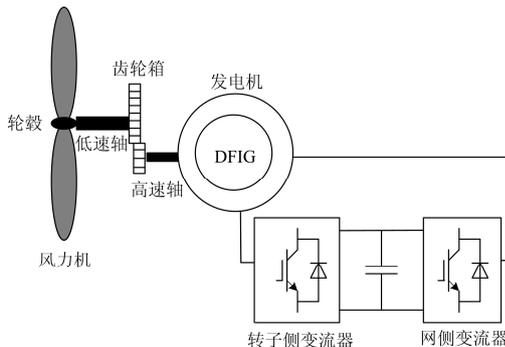


图 4 双馈风电机组简化模型

Fig. 4 Simplified model of DFIG

风力机的能量转换过程是由风能到机械能，功率系数决定了风能的利用率，具体来说包括桨距角和叶尖速比两个影响因素。当桨距角取值一定时，每个风速对应最优叶尖速比，即对应功率系数最大的情况，此时根据最优叶尖速比可求得该风速下风机转速最优值。因此，当风速改变时，调节风机转

速是一个实现最大的风能利用效率的有效办法。根据文献[11]，仿真模型中风力机的切入风速为 3 m/s，切出风速为 25 m/s，风速在 5~8 m/s 的范围内，风机转速和风速成正比变化，在该范围之外时，风力机分别保持最低和最高转速不变。

等值模型中所有的发电机均为容量 1.5 MW、电压 0.69 kV 的双馈电机。参照常规分析方法，将转子侧折算到定子侧，可得到双馈电机的等效电路，如图 5 所示。图中， U_{st} 、 I_{st} 分别为定子侧电压、电流， U_{ro} 、 I_{ro} 分别为转子侧外加励磁电源后的电压和电流， I_m 为励磁电流， s 为滑差^[9]。

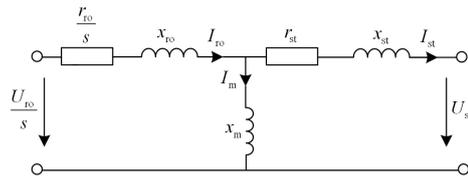


图 5 双馈感应电机等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit of induction generators

发电机的轴系连接了转子惯量和风轮惯量，电网出现扰动后，轴系在一定程度上发生弯曲，产生振动，所以轴系特性必然会对双馈感应电机动态特性产生影响^[15]。轴系模型采用弹簧—双质量块模型，分别用质块代替风轮和发电机转子，同时忽略轴系的机械阻尼^[16]。

变流器采用 PWM 控制的交直转换变流形式，其特点是具有可双向流动的功率。使用发电机转差频率信号对变流器调制波的频率进行控制，同时根据运行目标控制其相位和幅值。然后利用 SPWM 技术，对比三角波载波和调制信号从而获取触发信号，来实现机组的优化运行^[17]。

GSC 与 RSC 分别采用相应的控制策略，整个系统在 dq 坐标系下，其内外环分别对电流和功率进行控制，即双闭环模式。GSC 用于维持直流母线电压稳定，同时维持 DFIG 机端额定电压。RSC 用于实现最大功率跟踪，并保持定子端只输出有功^[18]。

3 特性分析

3.1 常用分析方法概述

目前关于风电场次同步谐振使用较为广泛的分析方法有时域仿真分析及特征值分析等^[19]。时域仿真法通过数值积分对系统微分方程进行求解，由此可得各变量随时间改变的轨迹。特征值分析法是将实际系统模型线性化，而后根据求解系统系数矩阵的特征值来判断系统是否稳定，可提供系统振荡频率的信息以及相关阻尼特性的信息^[20-22]。不过，特

征值分析法对于接入了大量变流器的复杂电力系统往往容易出现“维数灾”问题。

文献[23]通过仿真呈现了风电场发生 SSR 的情形, 并进一步详细分析了风电场发生 SSR 现象的机理。文献[24-25]通过灵敏度分析得到风机次同步谐振的各类影响因素, 并利用特征值分析风机在整个运行系统内的次同步特性, 从而得出各类影响因素对风机稳定性及运行范围的影响。

综上, 本文主要采取时域仿真方法, 通过仿真验证所提模型的有效性, 并进一步利用时域仿真研究该模型 SSR 的振荡特性。

3.2 时域仿真及特性分析

根据第 2 节的描述, 在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建该研究模型。首先根据实际系统 SSR 的发生条件来设置仿真参数, 然后将该模型产生 SSR 的特征与实际系统进行比较, 从而验证所提模型的准确性。再进一步利用该模型讨论风速、并网风机数量、DFIG 控制参数以及串补度对此类 SSR 的影响。

仿真时, 根据实际系统, 500 kV 线路的补偿度为 40%, 即设置串补电容值为 796 μF , 从风电场侧看, 电网等效串补度为 6.67%^[12]。仿真中风速和并网运行风机台数的变化情况见图 6, 初始风速较高, 所有的 1 700 台风力发电机均并网运行, 第 8 s 时风速下降到 5 m/s, 此后部分风机陆续退出运行, 直到第 10 s, 一共有 500 台风机退出运行。

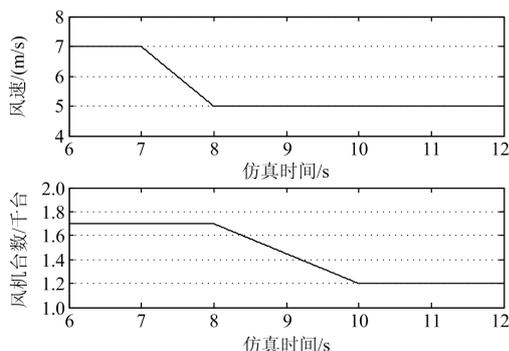


图 6 风速和风机台数的变化

Fig. 6 Change of wind speed and number of fans

整个仿真过程中, 基波电流和次同步谐波电流有效值的变化趋势如图 7 所示。第 10 s 时系统开始出现谐振现象, 次同步频率电流处于发散状态, 其幅值迅速增大, 甚至超过基波电流。由仿真结果可以看出, 风速的降低以及风机输出功率的下降会诱发 SSR 事故, 这与实际系统发生 SSR 的条件一致。

SSR 过程中, 线路 A 相电流、A 相电压以及有功功率瞬时值的波形图如图 8 所示。观察到, 线路

电流有严重的畸变, 但电压的畸变很小, 与实际案例的特征相符。进一步对 A 相电流和有功功率进行频谱分析, 结果见图 9。A 相电流包含次同步分量的频率为 6.5 Hz, 与该地区实际谐振频率吻合, 风电机组输出的有功功率也含有次同步分量, 且与电流中次同步分量互补, 为 43.5 Hz。

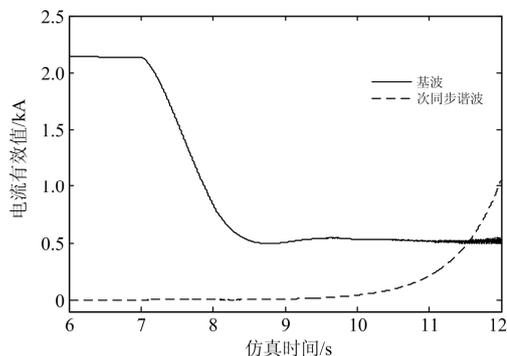


图 7 基波和次同步电流有效值的变化趋势

Fig. 7 Change tendency of effective value of fundamental current and subsynchronous current

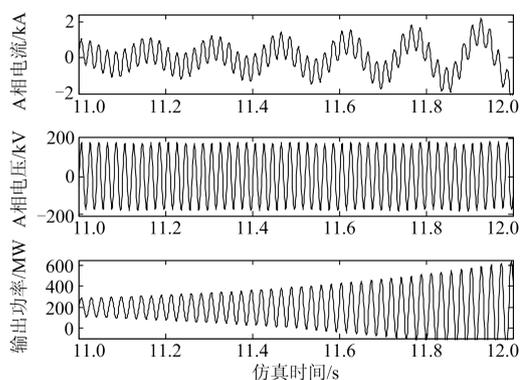


图 8 谐振中间阶段电压电流功率波形

Fig. 8 Waveform of current, voltage and active power during SSR

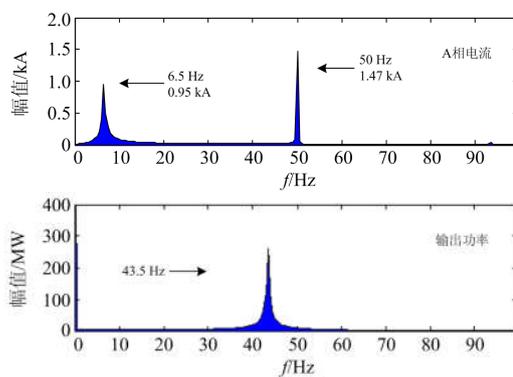


图 9 电流及有功功率频谱分析

Fig. 9 Spectral analysis of current and active power

接下来,通过仿真分析不同因素对 SSR 稳定性的影响。其他因素不变的情况下,风速不同,系统表现出的稳定性不同。不同风速下的次同步电流波形如图 10 所示。当风速下降至某一值时,次同步电流开始发散,系统变得不稳定,产生 SSR 事故,即系统阻尼会随着风速降低而减小。

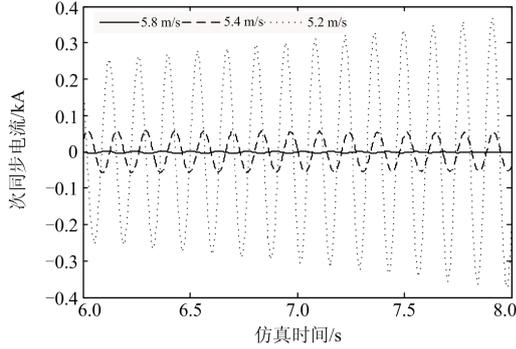


图 10 不同风速对应的次同步电流

Fig. 10 Subsynchronous current under different wind speed

研究风机台数对 SSR 特性的影响。仿真设置风速为 5 m/s,初始有 1 500 台风机投入运行,此时系统发生了 SSR 现象。在第 6 s 时改变并网风机台数,得到仿真结果如图 11 所示。如果切掉 200 台,风机台数降为 1 300 台,次同步电流发散速度会更快;如果切掉 700 台,风机台数降为 800 台,则可以使发散的 trend 逐渐收敛;如果切掉 1 100 台,风机台数降为 400 台,则使电流收敛速度更快,系统很快恢复稳定。由此得到,在一定风速条件下,随着风机台数的减小,系统的稳定性表现为先变弱后加强。即并网发电机台数在某一特定风速下阻尼表现最差^[11],在此条件下,系统阻尼的增加不受发电机台数增减的影响。进一步对次同步电流进行频谱分析,如图 12 所示,并网发电机台数越多,谐振频率越大。

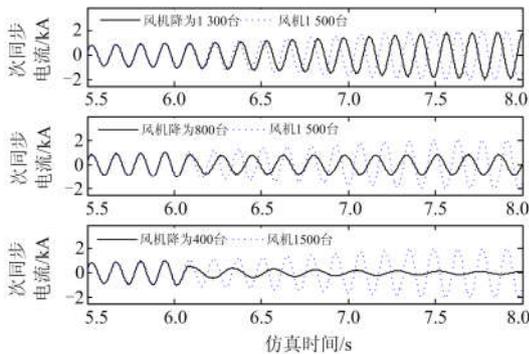


图 11 风机台数变化对应的次同步电流

Fig. 11 Subsynchronous current under different numbers of DFIGs

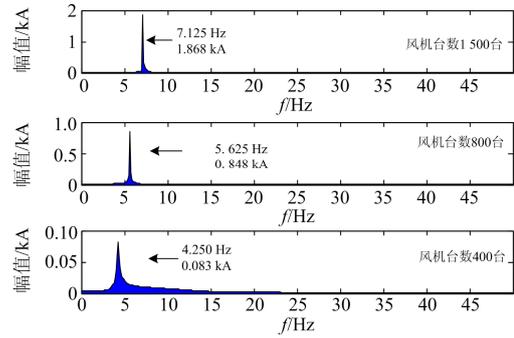


图 12 振荡频率与风机台数的关系

Fig. 12 Oscillation frequency changes with the numbers of DFIGs

在 GSC 和 RSC 的控制参数中, RSC 电流跟踪比例系数 K_r 对系统阻尼影响最大。当风速为 6 m/s, 并网风机台数为 1 500 时, 改变 K_r 的值, 仿真得到的次同步电流波形如图 13 所示。随着 K_r 的增加, 系统由稳定变为不稳定, 即 K_r 与系统阻尼负相关, 但对谐振频率影响不大。

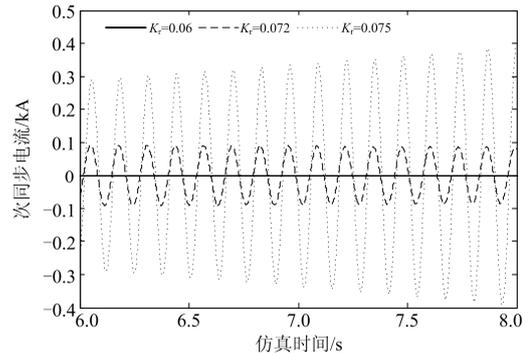


图 13 不同 K_r 对应的次同步电流

Fig. 13 Subsynchronous current under different K_r parameters

用线路串补电容值的变化来表示电网串补度水平的高低, 在其他参数固定的情况下, 随着线路串补度的变化, 系统稳定性也会发生变化。通过改变串补度得到的仿真结果见图 14, 原来稳定的运行点,

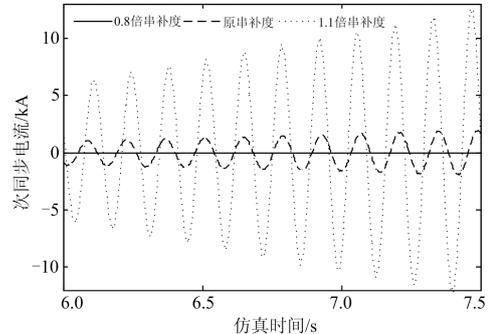


图 14 不同串补度下的次同步电流

Fig. 14 Subsynchronous current under different compensated levels

当串补度增大后变得不稳定, 随着串补度的进一步增加, 次同步电流发散速度更快。不同串补度下的次同步电流的频谱分析见图 15, 串补度的升高导致谐振频率也会升高。

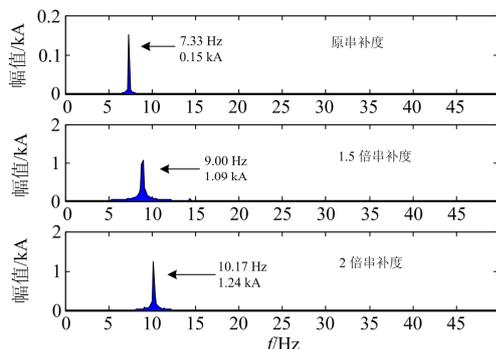


图 15 振荡频率与串补度的关系

Fig. 15 Oscillation frequency changes with the compensated levels

4 结语

由于电力电子装备的接入, 双馈风机串补系统的 SSR 特性与传统的 SSR 有所不同。本文建立了双馈风机串补系统的研究模型, 进而分析这种电力电子装备接入导致的新型 SSR 问题。

本文通过对所提的研究模型进行时域仿真分析, 得到了风速、并网风机数量、DFIG 控制参数以及串补度等因素对此类 SSR 稳定性和谐振频率的影响, 从中分析出该类 SSR 的产生机理和振荡特性。现针对该类 SSR 问题, 提出以下 2 条有效的抑制措施:

1) 当风速下降, 输出功率较低时, 容易诱发 SSR 现象, 此时可以切除串补电容, 使系统恢复稳定。由于 SSR 发生在输出功率较低的时刻, 所以暂时切除电容不会对系统稳定性产生不良的影响。

2) 由于风机的稳定性对 RSC 电流跟踪的比例系数 K_r 较为敏感, K_r 越小, 系统阻尼越强。因此, 可以适当减小 K_r , 使得系统对 SSR 的阻尼增大, 从而抑制 SSR 的发生。

参考文献

[1] 肖莞, 徐衍会. 大规模风电经串补送出引起的次同步振荡问题研究综述[J]. 电气技术, 2016, 35(16): 48-53.
XIAO Wan, XU Yanhui. Review on SSO caused by wind power transmission via series capacitor compensation[J]. Electric Technology, 2016, 35(16): 48-53.

[2] 张航, 滕予非, 王晓茹, 等. 计及并联补偿高抗的电力系统对次同步振荡的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 25-34.

ZHANG Hang, TENG Yufei, WANG Xiaoru, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of power system with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 25-34.

[3] 毕天姝, 李景一. 基于聚合短路比的大型风场次同步振荡风险初筛[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 52-59.
BI Tianshu, LI Jingyi. Risk screening of SSO induced in large-scale wind farms based on aggregated short circuit ratio[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 52-59.

[4] 刘辉, 李蕴红, 李雨, 等. 风电次同步谐振实例特征及机理分析[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 134-140.
LIU Hui, LI Yunhong, LI Yu, et al. Case study and mechanism analysis of sub-synchronous resonance in wind power plants[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 134-140.

[5] LIU H K, XIE X R, ZHANG C Y, 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.

[6] LIU H K, XIE X R, LI Y, 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 (RPG 2015), October 17-18, 2015, Beijing, China.

[7] ADAMS J, CARTER C, HUANG S H. ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation[C] // 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), May 7-10, 2012, Orlando, USA: 1-5.

[8] SAHNI M, BADRZADEH B, MUTHUMUNI D, et al. Sub-synchronous interaction in wind power plants-part II: an ERCOT case study[C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-9.

[9] FERNANDEZ L M, JURADO F, SAENZ J R. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines[J]. Renewable Energy, 2008, 33(3): 129-140.

[10] ZHANG X, XIE X R, LIU H, et al. Robust subsynchronous damping control to stabilize SSR in series-compensated wind power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(3): 337-344.

[11] 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.
- [12] 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.
- [13] MUNTEANU L, CUTULULIS N A, BRATCU A L, et al. Optimal control of wind energy systems[M]. London: Springer, 2008.
- [14] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [15] SANTOSO S, LE H T. Fundamental time-domain wind turbine models for wind power studies[J]. Renewable Energy, 2007, 32(14): 2436-2452.
- [16] 田宽引, 王鹏, 韩肖清, 等. 电力系统次同步振荡对风力发电机轴系疲劳损伤影响的可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 586-592.
- TIAN Kuanyin, WANG Peng, HAN Xiaoqing, et al. Fatigue reliability analysis of wind turbines shafts caused by sub-synchronous oscillations during power system faults[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(3): 586-592.
- [17] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T, et al. A direct power control of a DFIG based WECS during symmetrical voltage dips[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(5): 36-47. DOI: 10.1186/s41601-019-0148-y.
- [18] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
- LI Jing, SONG Jiahua, WANG Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [19] 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, 33(6): 36-39.
- XU Zheng, LUO Huiqun, ZHU Ruijin. Review on methods of analysis for subsynchronous oscillations of power systems[J]. Power System Technology, 1999, 33(6): 36-39.
- [20] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰. 电力系统的次同步振荡问题[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-7.
- WEN Jinyu, SUN Haishun, CHENG Shijie. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-7.
- [21] 董晓亮, 谢小荣, 田旭. 双馈风机定子侧变流器的附加阻尼抑制次同步振荡方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2785-2791.
- DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong, TIAN Xu. Sub-synchronous resonance mitigation scheme by stator side converter in doubly fed induction generator[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2785-2791.
- [22] 董晓亮, 田旭, 张勇. 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. 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.
- [23] 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.
- [24] 董晓亮, 谢小荣, 刘辉, 等. 双馈风力发电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.
- [25] 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.

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-09-05

作者简介:

杨博闻(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统次同步振荡的分析与控制; E-mail: 2578705383@qq.com

占颖(1995—), 女, 通信作者, 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: zhanying_1231@126.com

谢小荣(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统次同步振荡的分析与控制。E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

(编辑 葛艳娜)