

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

董晓亮¹, 谢小荣¹, 杨煜², 韩英铎¹

(1. 电力系统国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省 广州市 510623)

Impacting Factors and Stable Area Analysis of Subsynchronous Resonance in DFIG Based Wind Farms Connected to Series-Compensated Power System

DONG Xiaoliang¹, XIE Xiaorong¹, YANG Yu², HAN Yingduo¹

(1. State Key Lab of Power Systems (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

2. Southern Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510623, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Taking a certain doubly fed induction generators (DFIG) based wind farm located at North China, which is connected to the series-compensated power transmission system, as the prototype, firstly, through the eigenvalue sensitivity analysis the predominant factors influencing the subsynchronous resonance (SSR) of wind turbine are obtained; then the stability of the whole operating area of wind turbines, in which the maximum power point tracking (MPPT) is included, is researched to explain the influences of the change of various predominant factors on DFIG stability and secure operation area. Research results show that under the same conditions the higher the series compensation degree, the higher the risk of leading to SSR is and the small the stable area will be. The proportional gain if the current loop in rotor side converter of the wind turbine itself plays the role of negative damping, decreasing the gain may play a certain role to suppress SSR, the smaller this gain the larger the stable area will be. It is also found that under a certain condition decreasing the number of DFIG can eliminate the risk of occurring SSR and the SSR frequency varies with the number of DFIG. On this basis, some suggestions on the setting of DFIG control parameters and secure operation of wind farm are given.

KEY WORDS: DFIG; SSR; influencing factors; numbers of DFIG; all operation regions

摘要: 以华北地区某风电场双馈风机串补输电系统为原型, 首先通过特征值灵敏度分析得到影响风机次同步谐振的主导因素。然后研究了对包含最大功率跟踪在内的风机全运行

基金项目: 国家自然科学基金项目(51322701); 国家 863 高技术基金项目(2012AA050216)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51322701); The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2012AA050216)

区域的稳定性, 说明了各种主导因素变化对风机稳定性和安全运行区的影响。结果表明: 在相同的条件下, 串补度越高, 次同步谐振风险越大, 稳定区面积越小。风机转子侧变流器电流环比比例系数对次同步谐振起负阻尼, 若将该系数降低会对次同步起到一定的抑制作用, 该系数越小, 稳定区的面积越大。研究还发现: 在一定条件下, 降低风机台数会消除次同步谐振风险并且谐振频率随着风机台数的变化而变化。在此基础上, 给出了风机参数设置和风电场安全稳定运行建议。

关键词: 双馈风机; 次同步谐振; 影响因素; 风机台数; 全运行区域

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.01.029

0 引言

串联电容补偿可显著提高线路输送能力, 在远距离风电外送中得以应用, 但同时也存在诱发次同步谐振的风险^[1-2]。2009 年 10 月, 美国德克萨斯州的一处风电场发生了由串补电容引起的次同步谐振事故^[3]; 2012 年底, 我国华北地区某风电场也发生了多起由串补引发的风机次同步谐振现象。自此, 该问题引起了国内外学者的普遍关注。

目前, 国内外关于风机次同步谐振问题的研究取得了一些成果。Limebeer D J N 和 Harley R G 在文献[4]中较早地讨论了感应电机式风机会产生次同步谐振的风险, 并通过时域仿真进行了说明。文献[5]利用 PSCAD 建立了双馈风机与串补系统的仿真模型, 并推导了相应的小信号分析模型, 说明了不同影响因素变化对稳定性的影响, 但没有说明诱发次同步谐振(subsynchronous resonance, SSR)的主要原因。Fan Linlin 和 Miao Zhixin 等人在文

献[6]中指出感应发电机效应是引发风机次同步谐振的主要原因,并分别利用模态分析及参与因子结合根轨迹的分析方法^[6-8],推导电磁转矩与转速的关系式的方法^[9],研究了不同影响因素变化对次同步特性的影响。

总的来说,已有文献没说明哪些因素是影响风机 SSR 的主导因素,且都忽略了风机台数对次同步谐振特性的影响。此外,目前的研究都只局限于风机处于对最大功率跟踪运行方式下次同步谐振特性,没有涉及风机处于恒转速运行和定功率等其它运行方式下的次同步谐振特性,不够全面。

本文在此前研究中主要分析风速及输出功率对风机全运行区域 SSR 特性影响,着重介绍稳定区域的概念^[10]。本文继续以华北地区某风电场双馈风机串补系统为原型,通过特征值灵敏度分析得到影响风机 SSR 的主导因素为——风速、串补度、风机台数以及转子侧变流器(rotor side converter, RSC)内环电流比例系数 K_p ,接着分析每个因素独立作用时对风机稳定性的影响。据此,提出风机控制器参数设置和风电场安全稳定运行建议。

1 系统建模及运行区域分析

1.1 风电场串补系统模型等效

华北地区某风电场总装机容量约为 3 000 MVA,多是电压为 690 V,容量为 1.5 MVA 的双馈风机,经升压后并网,从风场侧看线路整体等效串补度约为 6.67%左右。由于集群风电场可以等效为单台风机研究^[11],该系统的等效电路如图 1 所示。

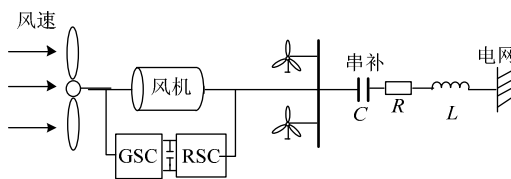


图 1 风场串补系统的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the wind farm connected to a series-compensated system

1.2 双馈风机的运行区域

图 2 表示双馈风机的转速与输出功率的关系^[12]。其运行区域可分为以下几类^[10]: 1) AB 段。低风速下的恒转速运行区域。2) BC 段,即最大功率跟踪运行段。3) 由曲线 AB、BC、CE、AE 围成的区域。风机输出功率可以被限定在这个区域的任何一点运行,转速由风速根据最大功率跟踪控制方式确定,通过调节桨距角来调节风力机输入的功率,从而调节风机的输出功率。4) CD 段。风速范围为 10 m/s~10.5 m/s(额定风速)及以上风速。

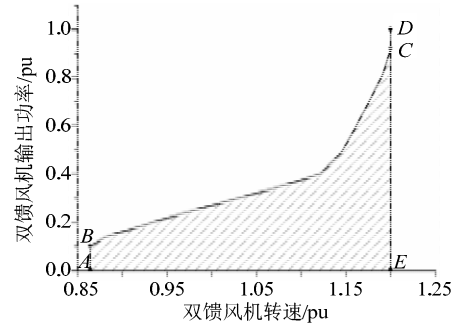


图 2 双馈风机输出功率与转速的关系

Fig. 2 Relationship between DFIG's output power and the rotation speed

2 分析方法研究

首先通过小信号分析建立双馈风机与串补系统的状态方程模型^[4,7-8]。通过特征值灵敏度分析^[13-15]得到,对风机 SSR 稳定性起主导作用的因素为:转速、串补度、风机台数以及 RSC 内环电流比例系数 K_p 。分析各种主要因素变化对次同步谐振特性的影响。然后,利用 PSCAD 时域仿真进行验证。通过扫描各种风速下的不同转速和输出功率对应的特征值计算结果,得到各种因素影响下的次同步稳定区域。

本文在之前文章中着重分析了风速和输出功率对稳定区域的影响^[10],下文主要针对其他主导因素对稳定区域的影响进行分析。

3 SSR 稳定性影响因素分析

3.1 转子侧变流器内环电流比例系数

其他影响因素不变的情况下,转子侧变流器电流内环控制器参数 K_p 不同,系统表现的稳定性不同。以风机运行于 9 m/s 时为例,输出功率分别为最大功率跟踪时和最大功率时的一半,不同的比例系数,系统表现的稳定性不同,如表 1 所示,其中 α 表示特征值实部, f 表示谐振频率。当风速为 9 m/s 运行于最大功率跟踪方式, K_p 值减小时,特征值实部为负,随着 K_p 逐渐变大,系统的特征值由负变正,说明系统变得不稳定,且谐振频率变化不大。当风速为 9 m/s,输出功率减半时(1/2 MPPT 模式),对应相同的控制器参数,特征值正实部的值更大,系统更不稳定,这说明低功率运行在同样的条件下比高功率更易发散。

表 1 相同串补度,不同控制器参数 K_p 特征值

Tab. 1 Eigenvalue analysis under different K_p parameters under the same compensation level

工况	K_p	α	f	工况	K_p	α	f
9 m/s	0.26	-2.07	6.87	9 m/s, 1/2	0.26	-1.39	6.78
MPPT	0.32	-0.49	6.82	MPPT	0.32	0.42	6.70
模式	0.4	1.04	6.70	模式	0.4	2.19	6.55

通过时域仿真验证,如图3所示,9 m/s时最大功率跟踪情况下,在 K_p 为较低值时系统是稳定的。随着 K_p 逐渐增大,系统的收敛速度逐渐变慢,当增大到一定程度后系统处于发散状态。同样的条件下,对应相同的 K_p 参数,功率降低一半,如图4所示,系统更容易发散。这与特征值分析得到的结果一致。

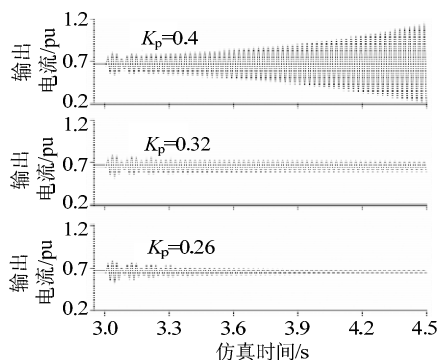


图3 风速为9 m/s且输出功率为最大功率跟踪时不同 K_p 对应的风机输出电流

Fig. 3 Output current of DFIG in different of K_p parameters under MPPT at the wind speed of 9 m/s

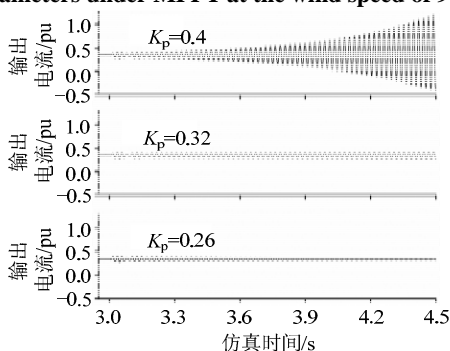


图4 风速为9 m/s且输出功率为最大功率的1/2时不同 K_p 对应的风机输出电流

Fig. 4 Output current of DFIG in different of K_p parameters under 1/2 of MPPT at the wind speed of 9 m/s

通过扫描各种风速下的不同转速和输出功率对应的特征值计算结果得到稳定区和失稳区。

在一定串补度下,随着 K_p 的逐渐减小,稳定区的面积逐渐变大,原来不稳定的区域变得稳定,如图5所示,这说明 K_p 与风机稳定性负相关。

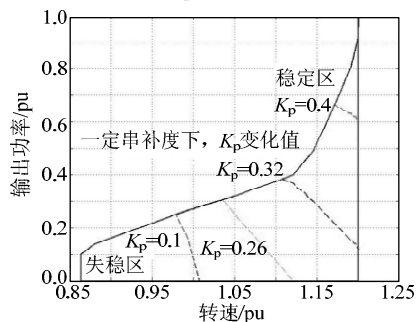


图5 一定串补度下,不同控制器参数对稳定区面积的影响

Fig. 5 The different K_p parameters influence on the stable area in a certain compensation level

3.2 风机台数

当风机处于最大功率跟踪时,通过特征值计算可以得到各种风速条件下,特征值实部与风机台数的关系,如图6所示。从图6可以看出,在一定风速条件下,特征值实部与风机台数呈现非线性关系,随着风机台数的增大,特征值实部先增大后减小,表明系统的稳定性先减弱后增强。风速越大,这种非线性关系越明显。系统的稳定性也在相同台数条件下,特征根实部随风速的增大而逐渐趋于负数,且负实部的绝对值越来越大,说明系统越稳定。虚部(振荡频率)与风机台数的关系,如图7所示,可以看到谐振频率随风机台数减小而降低;在同样的风机台数下,风速越高谐振频率就越高。

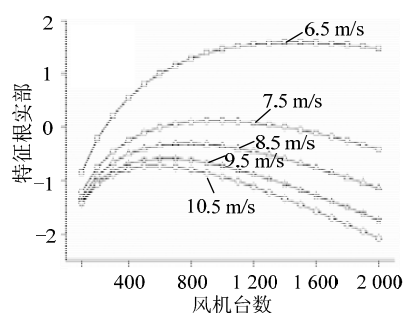


图6 不同风速下,特征值实部与台数变化的对应关系

Fig. 6 The real part of eigenvalue changes with the number of fans under different wind speeds

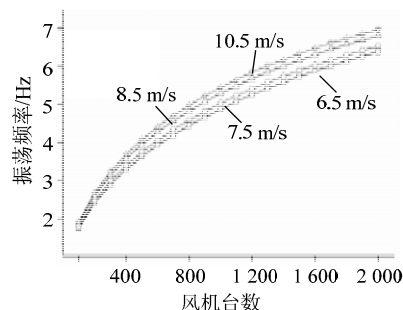


图7 不同风速下,振荡频率与台数变化的对应关系

Fig. 7 The oscillation frequency changes with the number of fans under different wind speeds

仿真发现,如图8所示,在风速为5.5 m/s,风机运行于最大功率跟踪状态。5 s时刻风电场有2 000台风机投入运行发生了SSR,如果在6 s时切掉1 400台,其增加阻尼不能够抑制SSR,风机依然会发散。如果在6 s时刻切掉1 800台,剩余200台投入运行,则可以使发散的 trend 逐渐收敛,恢复稳定运行。结论与特征值分析结果一致。

对华北地区某风电场实际发生SSR时的记录数据进行分析得到:当发生SSR现象时,若部分风机脱网,SSR现象就会逐渐消失。谐振频率从风机脱网前的7.9 Hz降到脱网后的6.5 Hz。这与理论分析的结论一致。

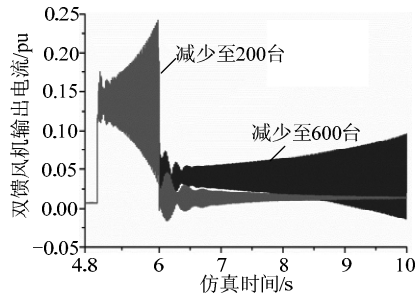


图8 不同风机台数变化的仿真结果

Fig. 8 The simulation results in different numbers of fans

3.3 串补度

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。如表2所示,对双馈风机输出电流的特征值分析,可以得到当风速为8 m/s,在最大功率跟踪方式下,当串补度为6.67%时,特征值的实部为负,系统是稳定的。随着串补度不断增大,负实部的绝对值逐渐减小,谐振频率逐渐增大。当串补度增大到原来的2倍时,特征值实部变为正,说明系统已经失去稳定。当风速为8 m/s,输出功率减少一半时(1/2 MPPT 模式),对应和最大功率跟踪同样的串补度时,特征值负实部的绝对值更小,系统的稳定性更差;并且当串补度增大到原来的1.4倍特征值已经变为正,说明系统已经发散。可见,随着串补度的逐渐增大,特征值和谐振频率都会发生变化。原来稳定的运行点,当串补度增大后变得不稳定,导致稳定区面积在逐渐减小;在同转速下输出功率越低,系统稳定性越差。而且随着串补度的升高,谐振频率也会升高。表中: A 表示串补度扩大倍数; α 为特征值实部; f 表示谐振频率。

表2 不同串补度的特征值分析
Tab. 2 Eigenvalue analysis under different compensated levels

工况	A	α	f	工况	A	α	f
8 m/s	1.0	-1.80	6.8	8 m/s	1.0	-1.27	6.75
MPPT	1.4	-0.93	8.01	1/2 MPPT	1.4	-0.37	7.95
模式	1.6	-0.52	8.55	模式	1.6	0.04	8.48
	2.0	0.27	9.53		2.0	0.83	9.45

对应的时域仿真如图9所示,当风速为8 m/s时,在最大功率跟踪下,风机转速和控制器参数一定,不同串补度表现的稳定性不同。在原串补度下,风机输出电流快速收敛,随着串补度逐渐增大,收敛速度逐渐变慢,当串补度增大到2倍时,电流出现明显发散。

风速为8 m/s,当功率减少一半,风机转速和控制器参数一定时,对应不同串补度下输出电流的时域仿真如图10所示。在原串补度下,输出电流是收敛的,随着串补度的逐渐增大,系统逐渐变得

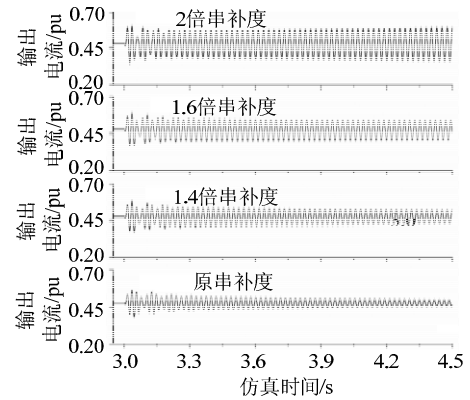


图9 风速为8 m/s且最大功率跟踪时,不同串补度对应的输出电流

Fig. 9 Output current of DFIG under different compensated levels at the wind speed of 8 m/s, MPPT

发散,且在同样的串补度下与最大功率跟踪时相比,系统的稳定性更差,发散速度更快。这说明低功率运行在同样的条件下比高功率更容易发散。也说明时域仿真结果与特征值分析结果一致。

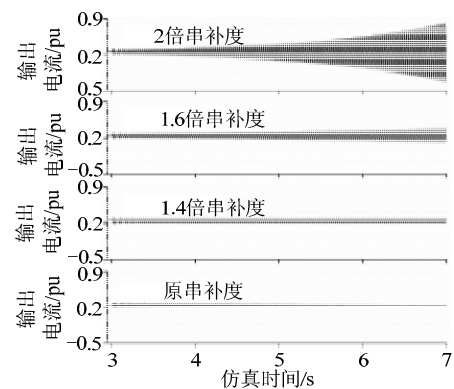


图10 风速为8 m/s且输出功率减半时,不同串补度对应的输出电流

Fig. 10 Output current of DFIG under different series compensated level at the wind speed of 8 m/s, 1/2 of MPPT

如图11所示,可以看到随着串补度的逐渐增大,SSR稳定区的面积在逐渐减小。当串补度增大到原来的2倍时,稳定区的面积会很小,只有在较高风速下风机运行才是稳定的。这说明线路的串补度越大,系统存在SSR的风险就越大。

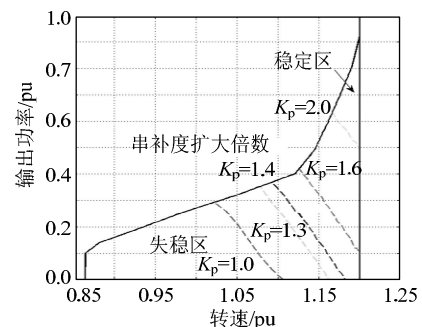


图11 在一定控制参数下不同串补度对稳定区面积的影响

Fig. 11 Different series compensation levels influence on the stable area in the same control parameters

4 结论

1) 通过特征值灵敏度分析得到, 影响风机 SSR 稳定性的主导因素为风速、转子侧变流器内环电流比例系数、风机台数、串补度、输出功率。

2) 随着串补度的逐渐增大, 系统阻尼逐渐减小, SSR 稳定区在逐渐减小, 谐振频率逐渐升高。

3) 在一定风速条件下, 随着风机台数的减少, 系统的特征值实部由正逐渐变为负, 这说明系统由不稳定变为稳定。如果进一步降低台数, 特征值负实部的绝对值将逐渐变大, 呈一定的非线性关系。在相同台数条件下, 特征根实部随风速的增大而趋于负数, 这说明系统逐渐稳定。并且, 谐振频率随风机台数减少而降低; 在同样的风机台数下, 风速越高, 谐振频率就越高。

4) 转子侧变流器内环电流比例系数 K_p 对次同步谐振起负阻尼的作用, 比例系数越大, 次同步风险越大。因此, 在一定条件下, 可以通过降低该系数来降低 SSR 风险。

参考文献

- [1] 刘世宇, 谢小荣, 王仲鸿. 我国火电基地串补输电系统的次同步谐振问题[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 5-8.
Liu Shiyu, Xie Xiaorong, Wang Zhonghong. SSR problem in compensated transmission system of thermal power bases in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 5-8(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] Belkin P. Event of 10/22/09[EB/OL]. 2010-01-26. <http://www.ercot.com/calendar/2010/01/20100126-TECH>.
- [4] Limebeer D, Harley R. Subsynchronous resonance of single-cage induction motors[J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 1981, 128(1): 33-42.
- [5] Amir O, Amirnaser Y. Modeling and stability analysis of a dfig-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2009, 24(3): 1504-1514.
- [6] Lingling F, Kavasseri R, Zhixin L M. Modeling of DFIG-Based Wind Farms for SSR Analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.
- [7] Fan Lingling, Zhu Chanxia, Miao Zhixin, et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1010-1020.
- [8] Miao Zhixin. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2012, 27(4): 984-991.
- [9] Miao Zhixin. Impact of unbalance on electrical and torsional resonances in power electronic interfaced wind energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3105-3113.
- [10] 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).
- [11] 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.
- [12] 风机总体技术参数[R]. 北京: 华锐风能有限公司, 2012.
- [13] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 235-259.
- [14] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 45-136.
- [15] Padiyar K P. Power System Dynamics Stability and Control[M]. Dundas, ON, Canada: BS Publications, 2002: 37-92.



董晓亮

收稿日期: 2014-05-06。

作者简介:

董晓亮(1985), 男, 博士研究生, 主要研究方向为次同步谐振、电力系统分析与控制以及柔性输电技术, E-mail: dongxl12@mails.tsinghua.edu.cn;

谢小荣(1975), 男, 副教授, 通信作者, 主要研究方向为电力系统次同步振荡的分析与抑制、WAMS、柔性输电系统, E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn;

杨煜(1972), 男, 博士, 从事电力系统控制理论和仿真研究。

(责任编辑 杜宁)