

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.032

大规模直驱风电场次同步振荡的影响因素分析

邓王博^{1,2}, 王海云¹, 常喜强³, 郭小龙³

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 国网陕西省电力公司检修公司, 西安 710000;
3. 新疆省电力调度控制中心, 乌鲁木齐 830063)

摘要: 针对哈密地区大规模风电场在无串补情况下发生的次同步振荡现象。文中在PSCAD/EMTDC软件上搭建了多机直驱风电场无串补输电系统模型, 结合特征值分析法研究了风速、网侧控制器参数、风电汇集点短路比和火电机组出力对次同步振荡特性的影响, 并进行仿真验证。结果表明: 无串补情况下, 风电场在各风段均有可能发生次同步振荡, 风速小, 振荡频率高, 风速大, 振荡频率低。网侧控制器比例增益越大, 振荡频率越小, 积分增益越大, 振荡频率越大。短路比越小, 系统发生次同步振荡的可能性越大。低功率运行时, 火电机组出力在50%~80%范围内, 系统发生次同步振荡的可能性最大。

关键词: 直驱风电场; 次同步振荡; 特征值分析; 短路比

Analysis of Influencing Factors of Subsynchronous Oscillation in Large-scale Direct-driven Wind Farm

DENG Wangbo^{1,2}, WANG Haiyun¹, CHANG Xiqiang³, GUO Xiaolong³

(1. School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Maintenance Company of Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710000, China; 3. Xinjiang Electric Power Dispatching Control Center, Urumqi 830063, China)

Abstract: In this paper, for large wind farms in Hami area in the series compensated case of subsynchronous oscillation phenomenon, based on PSCAD/EMTDC software, the model of no series compensated transmission system of multi machine direct-drive wind power farm is built, combined with eigenvalue analysis method, the effects of wind speed, parameters of grid-side controller, short circuit ratio of wind power collecting point and output of thermal power unit on the sub-synchronous oscillation characteristics are studied and verified by simulation. The results show that there is no series compensation case, the wind farm may occur in the subsynchronous oscillation in the wind while the wind speed is small, high oscillation frequency, wind speed, low oscillation frequency. The net side controller proportional gain more. Vibration swing frequency is small, the greater the integral gain, oscillation frequency is greater. Short circuit ratio decrease the possibility of system subsynchronous oscillation increases. Low power operation, power units within the range of 50%~80% and the possibility of system subsynchronous oscillation.

Key words: direct-drive wind farm; subsynchronous oscillation; eigenvalue analysis; short-circuit ratio

0 引言

哈密电网位于新疆电网与西北电网联网的交界点, 同时处于天中直流送端及风电大规模集中接入地区。然而, 随着风电场规模的不断增大、电力电子元件的大量使用, 使得该地区电网的运行特性

发生重大变化, 存在诱发次同步振荡的风险^[1-6]。

目前, 对于风电场次同步振荡问题的研究已经取得一些成果, 文[7-9]详细阐述了风电次同步振荡问题的研究现状, 同时指出风电次同步振荡的最新研究方向和亟待解决的问题; 文[10]利用模态分析法对双馈风电机组的次同步振荡进行了深入分析,

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(51667020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51667020).

但对于其他风电机组的次同步振荡没有做过多讨论;文[11]探究在串补情况下双馈风电场发生次同步的机理及其影响因素,对于无串补情况下次同步振荡有待深入研究;文[12-13]研究了在风火打捆输电方式情况下,双馈风电场并网对汽轮发电机次同步振荡影响,而没有涉及直驱机组对于汽轮机组的影响;文[14]从机理上对于风电次同步振荡的发生进行了初步探索;文[15]提出大规模新能源并网存在引发火电机组次同步谐振风险,但未深入分析火电机组对附近风电机组次同步振荡的影响。

显然,目前对于风电场次同步振荡的研究主要以双馈风机为对象,探索其在串补情况下的次同步振荡问题,然而,2015年7月1日,哈密地区大规模直驱风电场经无串补线路并网过程中同样发生了次同步振荡范围内的持续功率振荡现象,造成直流配套火电机组扭振保护启动,造成切机事件^[16]。基于以上背景,文中首先建立了多机直驱风电场无串补输电系统模型,通过对无串补情况下次同步振荡现象进行仿真分析,总结其振荡特点;结合特征值分析法对其影响因素进行分析^[17-19];最后,利用PSCAD/EMTDC仿真软件对其分析结果进行仿真实验验证。

1 直驱风电场无串补输电系统模型

目前,哈密地区风电总装机容量389.6万千瓦,主要分布在哈密东南部的烟墩地区、西部的十三间房地区和北部的山北地区,其中山北地区(包括三塘湖地区和淖毛湖地区)其网架结构较弱,装机容量1 600 MW,风电场内主要由直驱风机组成,接入形式多以35 kV、110 kV系统接入,再以星型辐射方式汇集接入220 kV风电汇集站,最后通过750 kV变电站汇集送出。文中以新疆某风电系统为研究原型,利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件,建立了多机直驱风电场无串补输电系统模型^[20-21],见图1。假设:①风电场均由若干台1.5MW直驱风机组成,且所有风机并联接于同一母线;②忽略风电场内部电缆,且每台发电机组运行状态一致。定义:风电汇集点短路比(SCR)=汇集站或汇集母线点的短路容量(SCC)/风电并网容量。系统参数见表1。

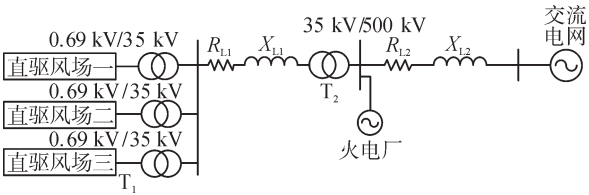


图1 系统接线图

Fig. 1 System wiring diagram

表1 系统参数

Table 1 System parameter

参数	数值
容量基值 S_{bl}/MVA	1 600
直驱风电场一容量 $S_{\text{PMSG1}}/\text{MVA}$	300
直驱风电场二容量 $S_{\text{PMSG2}}/\text{MVA}$	450
直驱风电场三容量 $S_{\text{PMSG3}}/\text{MVA}$	600
35 kV 输电线路电阻标么值 R_{L1}	0.03
35 kV 输电线路电感标么值 X_{L1}	0.25
500 kV 输电线路电阻标么值 R_{L2}	0.02
500 kV 输电线路电感标么值 X_{L2}	0.10
变压器 T_1 漏抗标么值 X_{T1}	0.06
变压器 T_2 漏抗标么值 X_{T2}	0.21

2 次同步振荡仿真与线性化分析

2.1 系统仿真

在PSCAD/EMTDC中搭建见图1的无串补输电等值系统模型,仿真过程中暂不考虑火电机组。运行工况:给定4 m/s恒定风速,并网容量1 350 MW,风机功率因数为1保持不变,在6 s时刻,将风电汇集点短路比从4.6变为2.1(模拟网架结构变弱),仿真时间20 s。35 kV线路A相电流和有功功率随时间变化的动态曲线见图2。

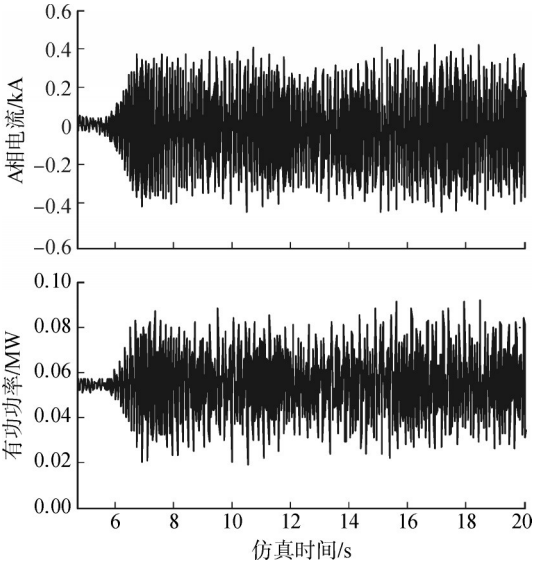


图2 35 kV线路动态图

Fig. 2 35 kV line dynamic diagram

将A相电流局部放大见图3。A相电流频谱分析结果见图4。可见,系统运行在低功率状态时,短路比变小时,A相电流和有功功率迅速发散,与此同时电流波形发生严重畸变,电流当中存在次同步(16.6、41.99 Hz)和超同步(58.59、67.38 Hz)分量,谐波成分复杂且超同步谐波幅值明显高于次同步谐波

幅值,发生了严重的次同步振荡。

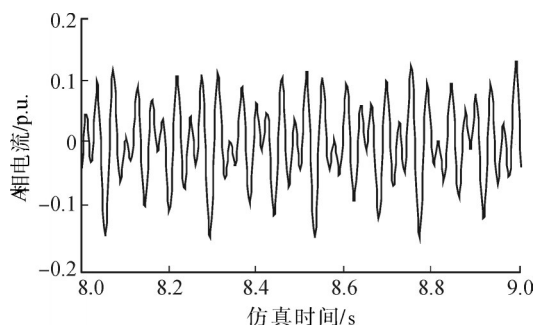


图3 A相电流局部放大图

Fig. 3 A phase current local amplification

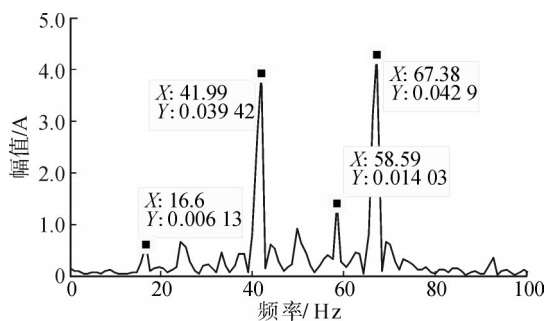


图4 A相电流频谱分析

Fig. 4 A phase current spectrum analysis

2.2 线性化分析

本节对直驱风机无串补系统输电系统进行线性化分析。整个系统的线性化模型包含直驱风机、无串补输电、电网以及锁相环和坐标变换模型;其中,直驱风机模型包括永磁同步发电机、机侧变流器(MSC)、网侧变流器(GSC)和直流电容模型。MSC控制目标是实现最大功率跟踪,GSC控制目标是实现直流母线电压稳定,同时调节有功/无功功率^[22]。将以上各部分的线性化模型联立^[23-25],消去中间变量,得到整个系统的线性化方程为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x}{dt} = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y = C\Delta x + D\Delta u \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: Δx 是状态变量; Δu 为输入变量; Δy 为输出变量; A 、 B 、 C 、 D 分别为系统的状态矩阵。

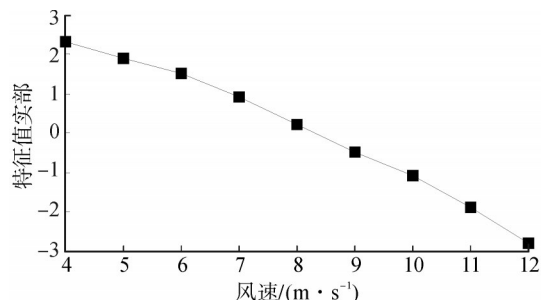
3 次同步振荡特性影响因素分析

为进一步探究哈密地区次同步振荡特点与系统工况之间的耦合关系,利用特征值分析法研究风速、网侧控制器参数、风电汇集点短路比和火电机组出力对次同步振荡特性的影响并进行仿真验证。

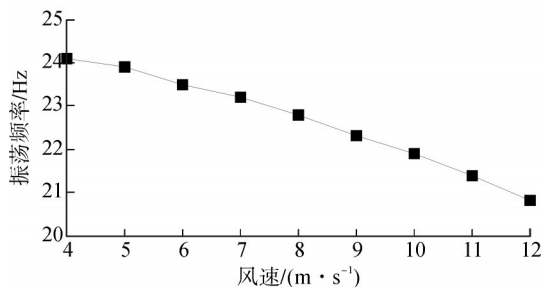
3.1 风速与SSO的关系

为了研究风速变化对次同步振荡特性的影响,将3个风电场等效为一台直驱风机,并网容量1350 MW,控制器参数等其他条件均不变,通过改变风机的给

定风速,计算系统在不同风速下的特征值,结果见图5。从图5(a)可以看出,随着风电场的风速的增加特征值实部逐渐变小,说明系统随着风速的增大稳定性提高;从图5(b)可以看出,随着风电场的风速增加,系统的次同步振荡频率逐渐减小。



(a) 风速对特征值实部的影响



(b) 风速对振荡频率的影响

图5 风速对次同步振荡特性的影响

Fig. 5 Effect of wind speed on sub-synchronous oscillation

仿真结果见图6。图6结果表明:系统在低、中、高速下都可能会发生次同步振荡;风速大,系统稳定性越高,风速小,系统稳定性越低,与特征值分析一致。

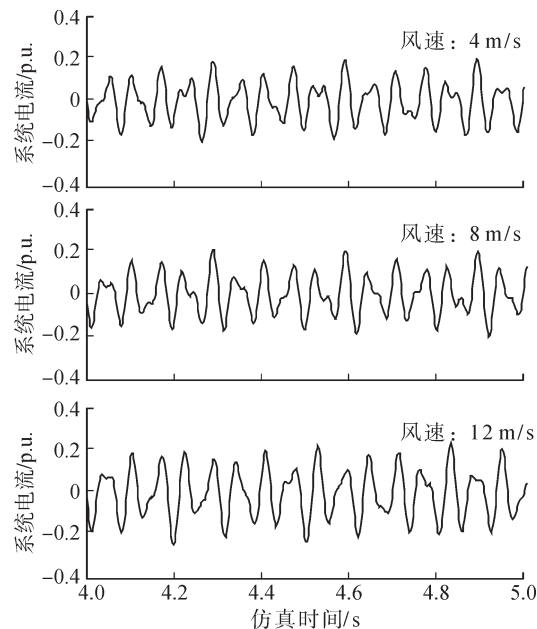
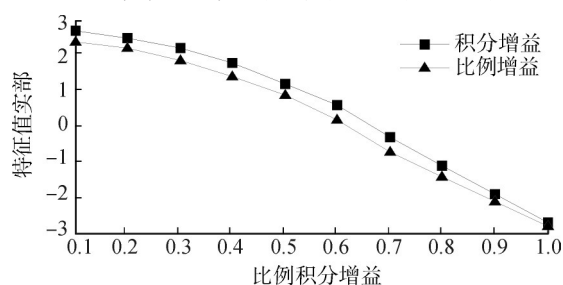


图6 不同风速下仿真结果对比

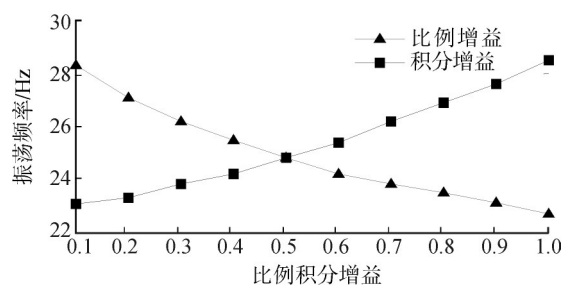
Fig. 6 Comparison of simulation results under different wind speeds

3.2 网侧控制器参数与SSO的关系

为了研究网侧控制器参数对次同步振荡特性的影响,首先将3个风电场等效为一台直驱风机,给定风速4 m/s不变,风机并网容量1 050 MW,火电机组不接入系统。首先,保持积分增益参数不变,不断改变比例增益参数;其次,保持比例增益参数不变,不断改变积分增益参数。计算该工况下系统特征值,结果见图7。从图7(a)可以看出,随着比例增益和积分增益参数不断变大,系统特征值实部在逐渐减小,说明系统的稳定性在增强;从图7(b)可以看出,系统的次同步振荡频率随比例增益倍数的增加而逐渐减小,却随积分增益倍数的增加而增大。



(a) GSC参数对特征值实部的影响



(b) GSC参数对振荡频率的影响

图7 GSC参数对次同步振荡特性的影响

Fig. 7 Influence of GSC parameters on sub-synchronous oscillation

仿真结果见图8。图8表明:网侧控制器比例、积分增益参数越大,系统趋于稳定的速度就越快稳定性越好,与特征值分析结果一致。

3.3 风电汇集点短路比与SSO的关系

为了研究风电汇集点短路比对次同步振荡的影响,设定3个风电场的装机容量分别为350、400、600 MW且全部并网运行,给定风速为4 m/s,其他参数均保持不变,当风电场一、二、三分别单独并网和风电场一、二共同并网时,计算其短路比参数并观察系统是否会发生次同步振荡,计算该工况下的系统特征值,结果见图9。从图9(a)可以看出,随着风电汇集短路比增大(网架结构变强),特征值实部逐渐减小,说明风机并网容量越小,系统稳定性越强,发生次同步振荡的可能性越小;从图9(b)可以看出,系统的次同步振荡频率随风电汇集点短路比的增加而增大。

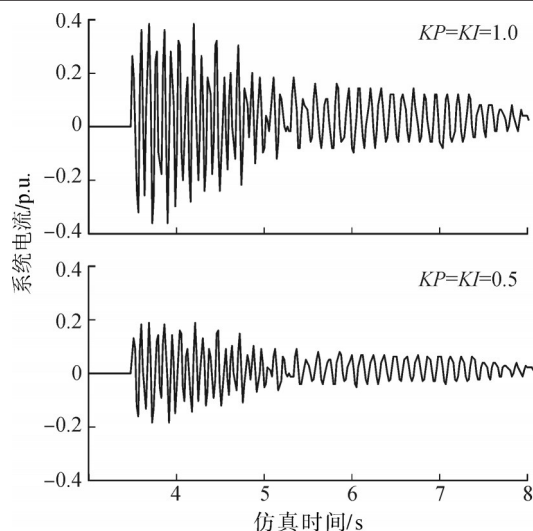
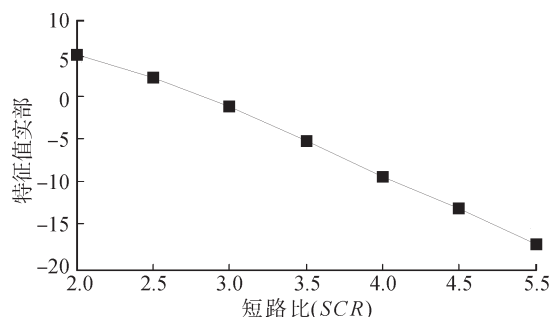
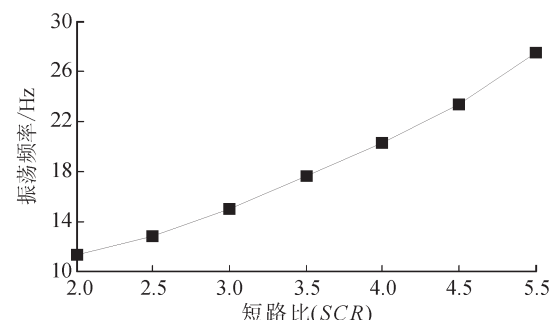


图8 不同GSC参数下仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation results under different GSC parameters



(a) 短路比对特征值实部的影响



(b) 短路比对振荡频率的影响

图9 短路比对次同步振荡特性的影响

Fig. 9 Effect of short circuit ratio on sub-synchronous oscillation

仿真结果见图10。图10结果表明:随着风电装机容量的增大,风电汇集点短路比减小,网架结构较弱,系统更易发生次同步振荡,与特征值分析结果一致。

3.4 火电机组出力与SSO的关系

为了研究火电机组出力(实际功率/并网机组的额定容量)对次同步振荡的影响,同样,将3个风电场等效为一台直驱风机,并网容量1 050 MW,给定

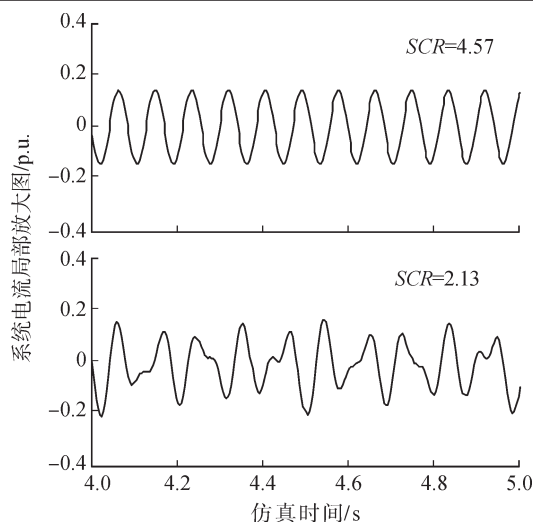
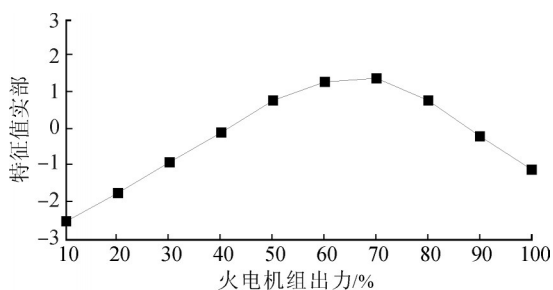


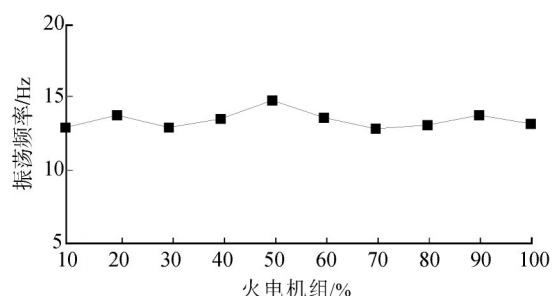
图10 不同短路比的仿真结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation results of different short circuit ratio

风速 4 m/s 不变,其他参数保持不变,通过调节火电机组的功角,使得火电机组出力分别在 0~50%、50%~80%和 80%~100%变化。计算该工况下系统特征值,结果见图 11。从图 11(a)可以看出,随着火电机组出力逐渐增大,特征值实部先变大后边变小,说明系统的稳定性先变弱后变强,其中火电机组出力在 50%~80%范围内时,系统发生次同步振荡的可能性最大;从图 11(b)可以看出,随着火电机组出力不断增加,系统的振荡频率除了在 50%~80%范围内略高,其他范围内振荡频率变化较小。



(a) 火电机组出力对特征值实部的影响



(b) 火电机组出力对振荡频率的影响

图11 火电机组出力对次同步振荡特性的影响

Fig. 11 Influence of output power on sub-synchronous oscillation characteristics of thermal power units

仿真结果见图 12。图 12 结果表明:火电出力在 50%~80%时电流畸变率最大,火电出力在 0~50%和 80%~100%范围内变化时,电流畸变率相对较小;综上所述,风电场在低功率运行时,火电机组的出力变化可能激发次同步振荡,且当火电机组出力在 50%~80%范围内变化时,更易诱发系统次同步振荡,与特征值分析结果一致。

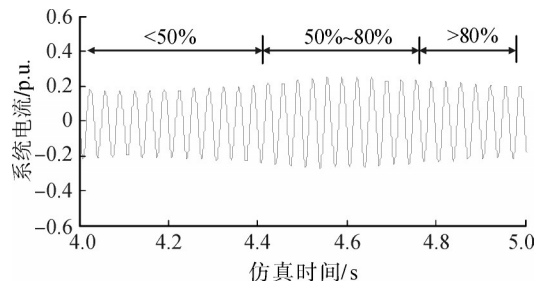


图12 不同出力范围的仿真结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation results with different output ranges

4 结论

文中以哈密地区的典型次同步振荡事件为研究背景,搭建多机直驱无串补输电系统模型,探究无串补情况下次同步振荡的影响因素,结果表明:

1)风电场在低、中和高风速下均有可能发生次同步振荡,且风速大,振荡频率低;风速小,振荡频率高,说明系统在低风速段更易发生次同步振荡。

2)网侧控制器比例增益越大,振荡频率越低,系统越稳定;积分增益越大,振荡频率越大,系统越稳定。

3)风电汇集点短路比越小,网架结构越弱,更易发生次同步振荡;风电汇集点短路比越大,网架结构越强,不会轻易发生次同步振荡。

4)低功率下,火电机组出力在 0~50%、50%~80%和 80%~100%范围内,都可能会发生次同步振荡,其中火电出力运行于 50%~80%范围内,更易诱发风电次同步振荡。

参考文献:

- [1] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
NI Yixin. Theory and analysis of dynamic power system[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2002.
- [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,2009.
CHENG Shijie, CAO Yijia, JIANG Quanyuan. Theory and

- method of subsynchronous oscillation in power system[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 张建军. 谐波电压传递特性分析研究[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 130-134.
ZHANG Jianjun. Study of transfer characteristics of harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 130-134.
- [4] 陈帆, 赵婉雯. 特高压直流无功控制电压选择优化研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 29-33.
CHEN Fan, ZHAO Wanwen. Optimization of voltage selection for UHVDC reactive power control[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 29-33.
- [5] 乔和, 关紫薇, 颜廷武, 等. SVG的自适应控制方法研究[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 169-174.
QIAO He, GUAN Ziwei, YAN Tingwu, et al. Research on the adaptive control method of SVG[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 169-174.
- [6] 李晖, 马喜平, 董开松, 等. 大电网末端风力发电系统故障穿越关键技术[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 192-196.
LI Hui, MA Xiping, DONG Kaisong, et al. Research on fault ride through for wind power system in the terminal of the power grid system[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 192-196.
- [7] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.
XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [8] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060.
- [9] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [10] 丁国栋. 双馈风电机组次同步振荡研究[D]. 上海: 上海机电学院, 2015.
DING Guodong. The study on subsynchronous oscillations of doubly fed wind turbine[D]. Shanghai: Shanghai Dian Ji University, 2015.
- [11] 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.
- [12] 李辉, 陈耀君, 李洋, 等. 双馈风电场并网对汽轮发电机次同步振荡的影响[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(6): 47-54.
LI Hui, CHEN Yaojun, LI Yang, et al. Impact of DFIG-based wind farms interconnected to power grid on subsynchronous oscillation of turbogenerator[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(6): 47-54.
- [13] 李辉, 陈宏文, 杨超, 等. 含双馈风电场的电力系统低频振荡模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 17-24.
LI Hui, CHEN Hongwen, YANG Chao, et al. Modal analysis of the low-frequency oscillation of power systems with DFIG-based wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 17-24.
- [14] 张艳富, 肖军, 朱会芳. 风力发电机多台机组同时脱网故障的研究与探索[J]. 风能产业, 2016(10): 47-51.
ZHANG Yanfu, XIAO Jun, ZHU Huifang. Research and exploration on the fault of multi unit of wind turbine[J]. Wind Power Industry, 2016(10): 47-51.
- [15] 任勇, 黄永宁, 高峰. 宁东直流近区新能源诱发次同步振荡风险评估[J]. 宁夏电力, 2016(1): 53-58.
REN Yong, HUANG Yongning, GAO Feng. Risk assessment on new energy induced sub-synchronous oscillation in eastern Ningxia DC nearby area of Ningxia power grid[J]. Ningxia Electric Power, 2016(1): 53-58.
- [16] 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.
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.
- [17] 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): 1878-1889.
- [18] IEEE Sub-synchronous Resonance Group. Reader's guide to sub-synchronous resonance[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1992, 7(1): 150-157.
- [19] IEEE Sub-synchronous Resonance Group. Terms, definitions and symbols for sub-synchronous oscillations[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1333.
- [20] 常喜强, 赵明君, 梁静, 等. 基于风电仿真模型等值的相关讨论[J]. 四川电力技术, 2014(4): 31-35.

- CHANG Xiqiang, ZHAO Mingjun, LIANG Jing, et al. Based on the equivalence of wind power simulation model [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014(4): 31-35.
- [21] 武家辉,王海云,王维庆,等. 混合三端直流输电系统在风火打捆并网中的应用及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2):49-55.
- WU Jiahui, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. A bundling system of wind-coal power plants and its control strategies based on hybrid MTDC transmissions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 49-55.
- [22] 刘为杰,姜建国. 直驱永磁同步风电机组次同步振荡建模与分析[J]. 电机与控制应用, 2017(1):97-103.
- LIU Weijie, JIANG Jianguo. Modeling and analysis for direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine generator in sub-synchronous oscillation[J]. Electric Machines & Control Application, 2017(1): 97-103.
- [23] FAN Lingling, ZHU Chanxia, MIAO Zhixin, 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.
- [24] 董晓亮,侯金鸣,田旭,等. 不同位置子群风电场主导因素变化对次同步谐振特性影响程度比较[J]. 高电压技术, 2016, 42(7):2259-2265.
- DONG Xiaoliang, HOU Jinming, TIAN Xu, et al. Comparison of the impact level on subsynchronous resonance characteristics of dominant factors by multiple wind farms at different locations[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2259-2265.
- [25] 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 trans-mission system in Guyuan farms[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1):321-328.
- 邓王博(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为无串补输电系统次同步振荡成因分析。
- 王海云(1973—),女,硕导,主要研究方向为可再生能源发电与并网技术。
- 常喜强(1976—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制。
- 郭小龙(1981—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为新能源运行与控制。

(上接第217页)

- LIAO Yong, WANG Guodong. VSC-HVDC system control for Grid-connection of DFIG wind farms[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(28): 7-15.
- [22] AMIRNASER Y, REZA I. Voltage-sourced converters in power systems, control, and applications[M]. Hoboken, New Jersey, USA: IEEE Press, 2009.
- 齐方方(1990—),女,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电和电力系统稳定与控制等方面的研究。
- 王海云(1973—),女,博士,教授,硕士生导师,研究方向为风电并网技术和高压直流输电与电力系统稳定性等方面的研究。
- 王维庆(1959—),男,博士生导师,研究方向为风力发电及并网技术。