

DOI: 10.7667/PSPC170099

基于宽频带转子附加阻尼的双馈型风机 次同步振荡抑制策略

朱玲¹, 许翔², 侯玉强¹, 牛拴保³, 李威¹, 柯贤波³, 魏平³, 常喜强⁴

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211000; 2. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094;
3. 国家电网西北分部, 陕西 西安 710048; 4. 新疆电力公司调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 针对双馈型风电场并网引发的次同步振荡问题进行了研究, 建立了双馈电机以及交流器的等效模型。基于动态等值阻抗解析式分析了并网阻抗特性的关键影响因素。结果表明控制器转子侧内环增益对次同步频带阻抗特性影响较大。在此基础上, 提出了一种基于宽频带转子附加阻尼控制的次同步振荡抑制措施。该抑制措施实施于双馈型风机转子侧变流器控制中, 无须附加装置, 利于工程实现。最后, 通过时域仿真验证了该抑制措施的有效性以及在暂态工况下的适用性。

关键词: 次同步振荡; 宽频带; 附加阻尼控制; 串联补偿; 并网阻抗

A suppression strategy for DFIG subsynchronous oscillation based on broadband rotor additional damping

ZHU Ling¹, XU Xiang², HOU Yuqiang¹, NIU Shuanbao³, LI Wei¹, KE Xianbo³, WEI Ping³, CHANG Xiqiang⁴

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China;
2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. Northwest Division of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;
4. Xinjiang Electric Power Company Dispatching and Communication Center, Urumqi 830002, China)

Abstract: This paper studies the problem of the synchronous oscillation caused by Doubly Fed Induction Generator (DFIG) grid connection, and sets up equivalent model of DFIG motor and converter. Based on dynamic equivalent impedance analytic expression, the key factors of grid-connected impedance characteristics are analyzed. The results show that the internal loop gain of the controller rotor side has a large effect on the impedance characteristics of subsynchronous frequency band. On this basis, the paper puts forward a subsynchronous oscillation suppression method based on broadband rotor additional damping control. The proposed method is implemented on converter control of DFIG rotor side, without additional device and good for engineering application. Finally, the validity and applicability under transient condition of the suppression strategy are verified by time-domain simulation.

Key words: subsynchronous oscillation; broadband; additional damping control; series compensation; grid-connected impedance

0 引言

随着电源组成多样性不断增加以及电网结构复杂性的提高, 在新能源并网的电网中低频振荡以及次同步振荡问题日益突出。当双馈风电场经串补线路

送出时, 系统存在发生次同步振荡(Subsynchronous Oscillation, SSO)的风险^[1-3]。研究双馈风电机组次同步振荡的抑制策略对风电场安全稳定运行有着非常重要的现实意义。

目前关于次同步振荡的研究主要集中于串补^[4]和直流^[5]与传统火电机组^[6]间产生的振荡现象, 风电机组并网引发次同步振荡的产生机理研究较少。文献[7]分析了风速、串补度和控制器参数对风电场次同步振荡的影响, 但缺少机理分析。文献[8]利用

基金项目: 国家电网西北分部资助项目“多电源类型特高压送端电网源协调技术深化研究”; 山西省电力公司项目“山西电网次同步振荡的仿真分析及控制措施”

频率扫描和时域仿真的方法对双馈风电场经串补并网引发次同步振荡的机理进行了定性的分析, 但不够精确。在抑制风电场次同步振荡方面, 现有研究主要集中在基于 FACTS 装置抑制次同步振荡^[9-10]和基于风电机自身控制器抑制次同步振荡^[11]。文献[11]设计了附加功率控制的次同步振荡阻尼控制器, 用来抑制轴系扭振引发的次同步振荡, 但在实际工程中, 风电机组发生的次同步振荡现象中很少出现扭振相互作用。文献[12]基于多输入多输出状态反馈控制, 以定转子 dq 轴电流为输入量, 设计了附加阻尼控制器, 有较好的效果, 但其控制器参数整定过于复杂, 缺乏清晰的物理概念。

本文构建了转子侧变流器、双馈电机和串补线路的等效电路模型, 推导了系统等效阻抗的解析表达式, 通过解析表达式对比了不同转速、串补度和转子侧变流器控制参数对风电场次同步振荡风险的影响, 提出了一种宽频带转子附加阻尼控制的次同步振荡抑制方法。最后采用时域仿真法验证了宽频带转子附加阻尼控制抑制次同步振荡的有效性以及对风机暂稳态运行工况的适用性。

1 双馈风电机转子侧并网阻抗模型

双馈电机的定转子电路通过气隙磁场耦合, 转子磁动势在空间以同步速旋转。定子侧等效电路频率为 f_1 , 转子侧等效电路频率 $f_2 = f_1 - f_r$, 定转子频率关系为 $f_2 = s_{\text{slip}} f_1$, 其中 $s_{\text{slip}} = (f_1 - f_r) / f_1$, $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 为归算至定子侧的定、转子漏抗^[13]。若要获得双馈电机统一的等值电路, 需要进行定转子频率归算^[14], 令转子静止 $f_r = 0$, 转差 $s_{\text{slip}} = 1$ 。保持归算前后定转子磁势平衡, 转子空间磁势不变, 因此转子电流幅值不变。

归算前转子电路方程为

$$(\dot{E}_{2s} - \dot{U}_2) e^{j\omega_2 t} = \dot{I}_{2s} e^{j\omega_2 t} (R_2 + j s_{\text{slip}} X_{2\sigma}) \quad (1)$$

式(1)两端同时乘以 $e^{j(\omega_1 - \omega_2)t} / s_{\text{slip}}$, 可得

$$(\dot{E}_{2s} - \dot{U}_2) e^{j\omega_1 t} / s_{\text{slip}} = \dot{I}_{2s} e^{j\omega_1 t} (R_2 / s_{\text{slip}} + j X_{2\sigma}) \quad (2)$$

频率归算后转子感应电势 $E_2 = E_{2s} / s_{\text{slip}}$, 同时转子漏阻抗、转子外加励磁也变为原来的 $1/s_{\text{slip}}$ 倍。频率归算后的电机等效电路如图 1 所示。

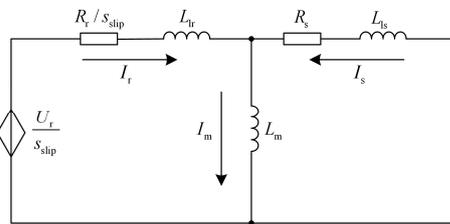


图 1 双馈电机等值电路图
Fig. 1 Equivalent circuit of DFIG

图 1 中: U_r 为转子外加励磁电压; L_{lr} 、 L_{ls} 为电机转子和定子自感; L_m 为励磁互感。

双馈型风机 70% 左右的功率通过转子侧变流器励磁控制直接流入电网, 电机参数以及转子侧控制对双馈风机特性影响关键。双馈风机转子侧变流器控制由功率外环和转子电流内环双环构成, 其中功率外环时间常数大, 调节速度相对较慢, 而转子电流内环时间常数小, 调节速度快。忽略变流器功率外环的影响, 变流器转子侧简化为转子电流内环控制^[13,15], 如图 2 所示。

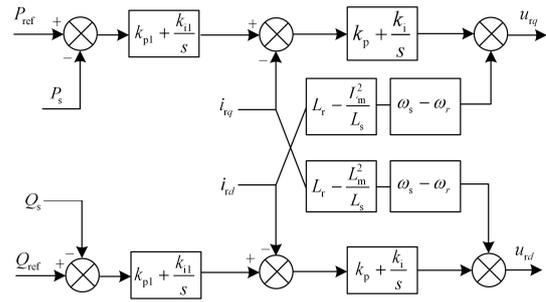


图 2 转子侧控制框图

Fig. 2 Control diagram of rotor side

转子侧电流内环为电流型 PI 控制单元, 控制器要求转子电流跟踪给定信号, 对偏差信号进行 PI 调节, 得到转子控制电压, 可以等效为受控电流源与阻抗并联的等值电路, 受控电流源大小为向量形式的转子流 $i_{td}^* + j i_{tq}^*$, 如图 3 所示。

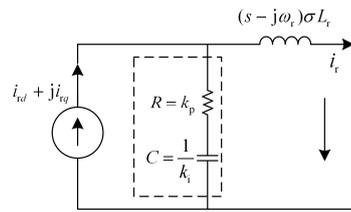


图 3 电流型 PI 控制单元等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of current PI control unit

根据戴维南等值定理将图 3 转换为等效电压源和阻抗串联形式, 频率归算至定子侧并与双馈电机 T 型电路连接, 风电场并网系统模型如图 4 所示。

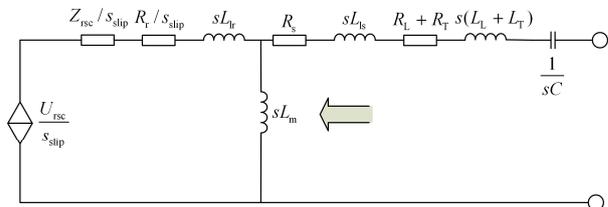


图 4 转子侧控制等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of rotor side control

图 4 中:

$$s_{\text{slip}}(s) = (s - j\omega_r) / s \quad (3)$$

$$Z_{\text{rsc}}(s) = k_p + k_i / s - (s - j\omega_r)(L_r - L_m^2 / L_s) \quad (4)$$

从无穷大电网侧看入, 单台双馈型风电机组的并网等值阻抗表达式为

$$Z_{\text{eq}}(s) = \frac{(Z_{\text{rsc}} + R_r + L_{lr}s_{\text{slip}})L_m s}{Z_{\text{rsc}} + R_r + (L_{lr}s + L_m s)s_{\text{slip}}} + R_s + L_{ls}s \quad (5)$$

假设风电场由 N 台型号相同的风电机组构成, 通过箱式变压器连接于同一点, N 台机组的风速、运行参数均一致, N 台机组并联的风电场等效阻抗可表达为^[16]

$$Z_{n\text{-eq}}(s) = \frac{Z_{\text{eq}}(s)}{N} + R_T + R_L + (L_T + L_L)s + \frac{1}{sC} \quad (6)$$

2 双馈型风机并网引发次同步振荡的关键影响因素

频率-阻抗分析法的基本原理为: 从待研究对象往外“观察”机网构成的整体系统在次同步频率范围内的等值阻抗, 根据获得的频率-阻抗特性来判定次同步振荡的风险, 若等值总电抗存在过零点或接近于 0, 则表示系统存在振荡点, 且振荡频率对应振荡点的频率。若振荡点处的等值电阻小于或接近于 0, 则表明存在振荡风险, 且等值电阻负值越大, 振荡发散速度越快。

根据式(6)、式(7)可知, 双馈机组并网系统的等值阻抗除了与输电线路、电机定转子阻抗等固有参数有关, 还受电机转速和转子侧内环控制参数(k_p 、 k_i)的影响。选取 100 MW 风场为基准容量, 690 V 基准电压, 根据式(8)代入相关参数, 改变转子侧内环控制参数 k_p , 对不同比例增益系数下的系统频率阻抗曲线进行比较, 观察上述参数对双馈风机系统振荡风险的影响。

图 5 显示转子侧内环控制参数 k_p 越大, 系统次

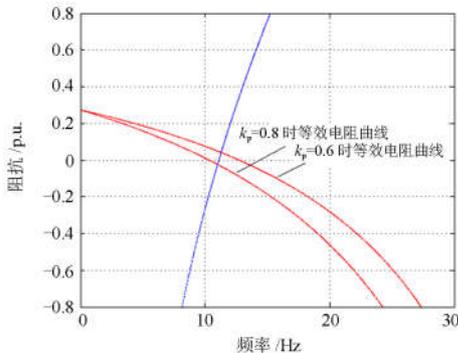


图 5 不同控制参数下系统频率阻抗特性

Fig. 5 System frequency impedance characteristics with different control parameters

同步频带阻尼越弱, 系统次同步频带等值电抗大小不变。从解析式可看出控制器内环增益 k_p 物理意义上表现为转子电阻, k_p 越大, 转子等效电阻越大, 频率归算后表现的等效负电阻也越大, 系统越容易振荡。

3 基于宽频带转子附加阻尼的次同步振荡抑制策略

由双馈风电场经串补并网系统的次同步振荡机理可知, 系统电气谐振频率下, 双馈机组由于转差特性表现为负电阻, 且幅值超过了定子电阻和系统电阻之和, 导致整个系统的等值电阻为负。基于上述分析, 本文提出从增大系统次同步频带阻尼的角度抑制风电场次同步振荡。如在图 3 控制框图中增加一个次同步频带的负电阻, 电阻阻值为 $-K_R$, 如图 6 所示, 其效果与次同步频带减小内环增益参数 k_p 相同, 相当于减小次同步频带转子等效电阻, 考虑发电机转差特性, 频率归算后的等效负电阻也减小, 从而整个系统的阻尼增强。

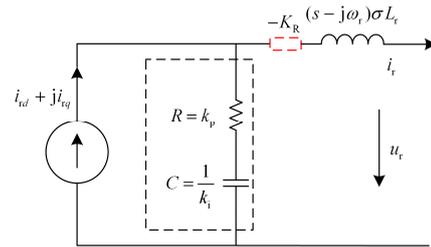


图 6 增加次同步频带负电阻后电流内环电路图

Fig. 6 Current inner-loop circuit with adding sub-synchronous frequency band negative resistance

转子侧电流内环等效电路串联的次同步频带负电阻, 表现在控制框图中具体实现为通过转子电流 d 轴分量、 q 轴分量经滤波器提取次同步频带信号, 相位补偿后比例放大 K_R 倍, 作为转子电压 u_d 和 u_q 的叠加分量, 如图 7 所示。从转子侧闭环传递函数可以看出其物理意义等效于在转子侧引入一个次同步频带的负电阻, 计入转差特性后定子侧等效转子电阻呈正值, 从而使系统等效负电阻减小或者由负值变为正值。

图 7 中 $G(s)$ 为滤波器传递函数, 用于提取次同步频带分量。转子附加阻尼控制中电流次同步频带分量获取是关键, 由于次同步频带范围比较宽, 滤波相位偏移度随谐振频率改变而变化, 直接选用带通滤波器相位补偿难度较大。直流分量无相位问题, 高通滤波相位偏差较小且对抑制措施影响不大, 滤

波器设计采用低通滤波器从 $i_{rd(q)}$ 中提取出直流分量, 高通滤波器从 $i_{rd(q)}$ 中提取高频分量, 然后转子电流 dq 轴分量分别减去直流分量和高频分量。使用 Matlab 软件 Fdatool 工具设计的带通滤波器和使用本文所述方法设计的滤波器滤波结果对比如图 8。

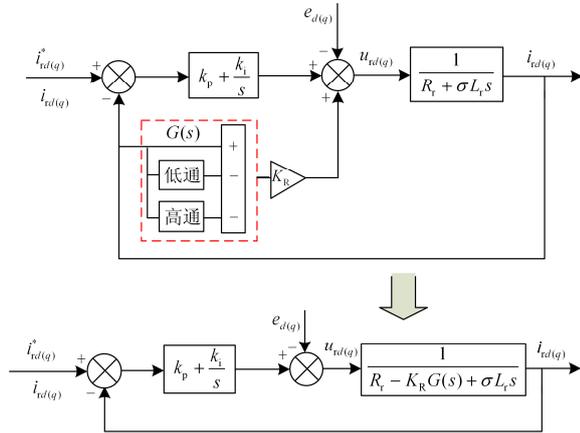


图 7 转子侧闭环传递函数

Fig. 7 Closed-loop transfer function of rotor side

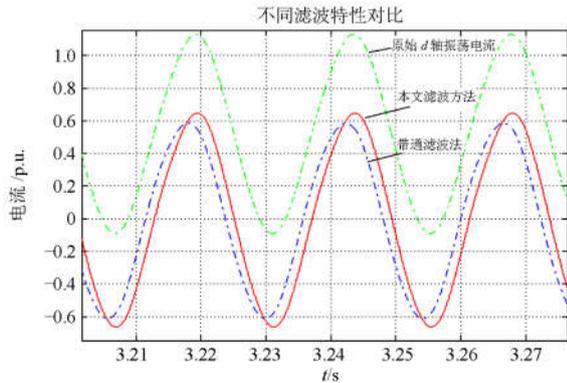


图 8 滤波结果对比图

Fig. 8 Comparison of filter results

从图 8 可看出, 本文所述滤波方法准确保留了次同步频带原始分量, 简化了滤波补偿设计问题。

4 时域仿真验证

在电磁暂态仿真软件中建立了风电场经串补接入电网系统模型。选取风电场接入容量为 75 MW, 由 50 台额定容量为 1.5 MW 的风机构成。采用风电场等值模型, 单台电机模型参数如下: 定子电阻为 0.023 p.u., 电抗为 0.18 p.u.; 转子电阻为 0.016 p.u., 电抗为 0.016 p.u., 激磁电抗为 2.9 p.u.; 开口电压为 1975 V。变压器参数如下: 35/0.69 kV 变压器电抗为 0.025 p.u., 电阻为 0.0008 p.u.; 110/35 kV 变压器电抗为 0.08 p.u., 电阻为 0.0026 p.u。110 kV 线路电感为 0.6 p.u., 电阻为 0.02 p.u。

1) 串补度为 0.5, 电机转速为 0.9 p.u. 情况下, 3 s 时刻变流器内环增益 k_p 由 0.6 增大至 0.8, 电网发生次同步振荡, 其中电流振荡频率为 10.8 Hz, 如图 9 所示。电网电压、电流、有功、无功以及电机转速波形见图 10。

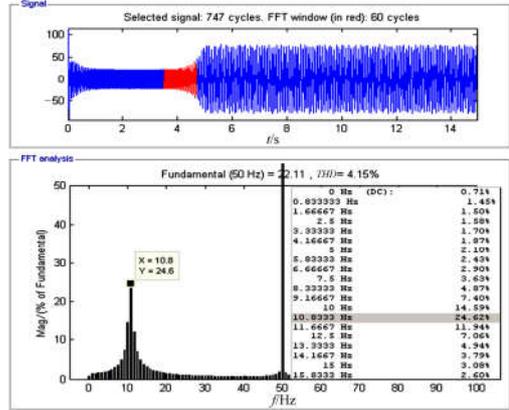


图 9 改变内环增益引起的振荡电流 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis of oscillatory current caused by inner-loop gain change

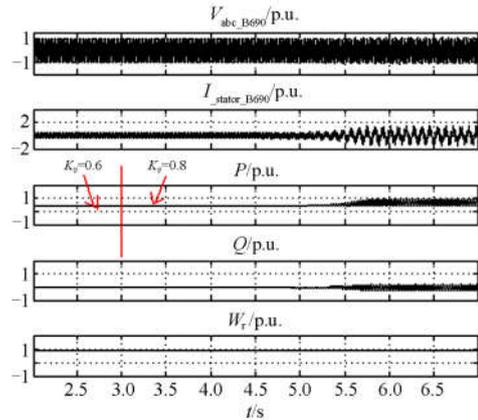


图 10 不同增益 K_p 下风电场输出曲线

Fig. 10 Output curve of wind farm under different gain K_p

2) 在串补度为 0.5 时, 电机转速为 0.9 p.u. 的运行工况下, 当内环增益 $k_p=0.8$ 时系统发生 10.8 Hz 的次同步振荡, 当运行 4.6 s 后投入本文提出的转子附加阻尼抑制措施, 发现次同步振荡现象消失, 系统的电压电流趋于稳定, 有功输出也逐渐稳定, 系统恢复稳定平衡状态, 图 11 给出了上述试验过程中电网电压、电流、有功、无功以及电机转速的波形。

3) 为考察转子附加阻尼控制是否对风机其他运行特性造成影响, 模拟风机稳态功率骤变, 对比有、无转子附加阻尼控制对风机运行特性的影响, 图 12 为风机功率突变时转子 d 轴电流的响应曲线对

比图。模拟风机送出线路三相短路故障, 对比有、无转子附加阻尼控制对风机运行特性的影响, 图 13 为无串补时暂态故障下电网单相电流波形, 图 14 为串补度为 0.5 时暂态故障下电网单相电流波形。

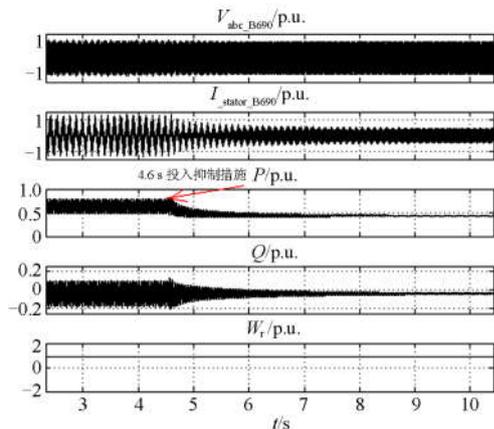


图 11 投入转子附加阻尼后的风电场输出曲线
Fig. 11 Output curve of wind farm with rotor additional damping

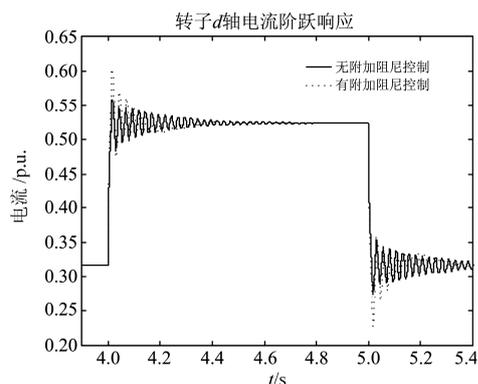


图 12 转子附加阻尼对稳态阶跃响应的影响
Fig. 12 Influence of rotor additional damping on steady-state step response

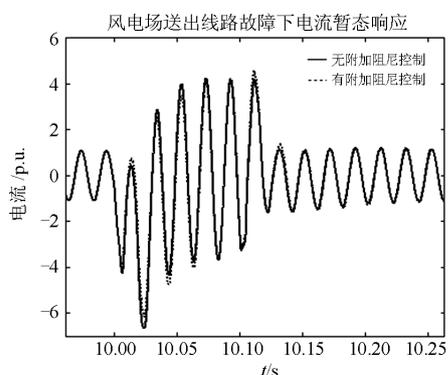


图 13 无串补时转子附加阻尼对暂态电流的影响
Fig. 13 Influence of rotor additional damping on transient current without serial compensation

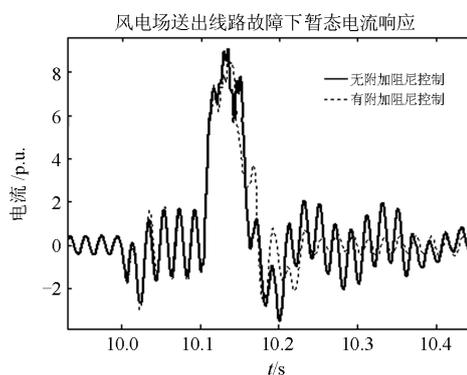


图 14 串补度为 0.5 时转子附加阻尼对暂态电流的影响
Fig. 14 Influence of rotor additional damping on transient current when serial compensation degree is 0.5

仿真结果分析: 图 9 显示内环增益越大, 系统越容易发生次同步振荡, 通过时域仿真, 验证了上文的分析结论。图 11 显示增加转子次同步频带的阻尼后, 电流振荡快速衰减, 该措施有效抑制了系统次同步振荡现象, 且该抑制措施中使用的滤波器带同频带较宽, 可以解决宽范围的系统次同步振荡问题。图 12 考察了转子附加阻尼控制对风机稳态功率骤变时阶跃响应的影响, 仿真对比表明转子附加阻尼控制会使得系统阶跃响应超调量略增大。图 13 和图 14 考察了转子附加阻尼控制对风机暂态故障下电流响应的影响, 发现无串补时系统不存在次同步谐振点, 次同步频带转子附加阻尼控制基本不起作用, 串补度为 0.5 时暂态故障期间短路电流异常增大, 对比曲线发现转子附加阻尼控制可以加快暂态响应恢复稳定的速度。

5 结论

本文重点研究了计及转子侧变流器控制参数影响的双馈风电场经串补输出系统并网阻抗特性, 从物理概念上明晰了转子侧控制器内环增益对经串补送出线路的双馈风电场次同步振荡的影响, 分析了转子侧变流器参数对系统次同步振荡特性的影响。提出一种基于宽频带转子附加阻尼的次同步振荡抑制措施, 同时验证了该控制策略不同运行工况下的适应性。

参考文献

- [1] MIAO Zhixin, FAN Lingling. The art of modeling and simulation of induction generator in wind generation applications using high-order model[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2008, 16(9): 1239-1253.
- [2] MOHAMMADPOUR H A, SANTI E. Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: definitions

- and problem identification — part I[C] // Energy Conversion Congress and Exposition: IEEE, 2014: 812-819.
- [3] MOHAMMADPOUR H A, SANTI E. Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: mitigation methods — TCSC, GCSC, and DFIG controllers — part II[C] // Energy Conversion Congress and Exposition: IEEE, 2014: 1550-1557.
- [4] 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.
- [5] 时伯年, 李树鹏, 梅红明, 等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 113-118.
SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC_HVDC and VSC_HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 113-118.
- [6] 郭磊, 张英敏, 李兴源. 多通道高压直流广域改进射影控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 29-35.
GUO Lei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. Design of multi-channel wide area modified projective controller for HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 29-35.
- [7] 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.
- [8] ZHAO Bin, LI Hui, WANG Mingyu, et al. An optimal reactive power control strategy for a DFIG-based wind farm to damp the sub-synchronous oscillation of a power system[J]. Energies, 2014, 7: 3086-3103.
- [9] 顾威, 李兴源, 陈建国, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.
GU Wei, LI Xingyuan, CHEN Jianguo, et al. Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.
- [10] 李建设, 陈磊, 陈亦平, 等. 基于振荡能量消耗的 HVDC 和 SVC 附加阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 9-15.
LI Jianshe, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Supplementary damping control of HVDC and SVC based on oscillation energy dissipation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 9-15.
- [11] 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, 37(9): 2580-2584.
WANG Bo, LU Jiping, GONG Jianyuan, et al. A method to suppress sub-synchronous oscillation of wind farm composed of doubly fed induction generators with additional rotor side control[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2580-2584.
- [12] LEON A E, SOLSONA J A. Sub-synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 419-428.
- [13] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [14] 战亮宇, 金新民, 张禄. 双馈电机复功率特性研究及四维分析[J]. 电工技术学报, 2010, 27(1): 130-135.
ZHAN Liangyu, JIN Xinmin, ZHANG Lu. Complex power characteristics of doubly-fed induction machine and its four dimension analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 27(1): 130-135.
- [15] 张剑, 肖湘宁, 高本锋, 等. 双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 142-149.
ZHANG Jian, XIAO Xiangning, GAO Benfeng, et al. Mechanism and characteristic study on sub-synchronous control interaction of a DFIG-based wind power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 142-149.
- [16] TAPIA G, TAPIA A, OSTOLAZA J X. Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(4): 909-920.

收稿日期: 2017-01-17; 修回日期: 2017-07-03

作者简介:

朱玲(1986—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源发电及并网接入稳定控制。E-mail: zhuling@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)