

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.030

双馈风电场经混合串补外送系统次同步振荡特性

朱鑫要^{1,2,3}, 赵静波¹, 刘建坤¹, 周 前¹, 袁宇波¹, 金 梦⁴

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 南京 210023;
3. 江苏省电力试验研究有限公司, 南京 211103; 4. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 南京 211102)

摘要: 运行经验表明, 双馈风机(doubly fed induction generator, DFIG)经串联补偿线路外送系统存在发生次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO)的风险。文中给出了由静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)和固定电容器组成的混合串补装置结构及控制策略, 设计了串联型柔性交流输电装置次同步频段阻抗特性仿真测试方法, 并分析了SSSC的次同步频段阻抗特性及DFIG经混合串补外送系统的SSO特性。分析结果表明, SSSC的次同步频段等效电抗和等效电阻均为正, 且系统的SSO阻尼随混合串联补偿中SSSC占比、补偿阻抗及补偿电压的增大而增大。文中研究成果可为大规模风电外送系统的规划设计和运行提供指导和参考。

关键词: 混合串联补偿; 静止同步串联补偿器; 双馈风机; 次同步振荡; 次同步频段阻抗特性

SSO Characteristics of Doubly Fed Wind Farm Integrated by Hybrid Series Compensator

ZHU Xinyao^{1,2,3}, ZHAO Jingbo¹, LIU Jiankun¹, ZHOU Qian¹, YUAN Yubo¹, JIN Meng⁴

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Electric Power Research Institute Corporation Limited, Nanjing 211103, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: According to the practical operating experience, wind farms with DFIG(doubly fed induction generator) integrated by series compensated AC transmission lines are confronting with the problem of SSO(subsynchronous oscillation). In this paper, the configuration and control strategy of hybrid series compensator composed by SSSC(static synchronous series compensator) and fixed capacitor are proposed, and testing method for subsynchronous frequency equivalent impedance of series FACTS is presented as well. Consequently, subsynchronous frequency impedance characteristics of SSSC are analyzed, and SSO characteristics of DFIG integrated by hybrid series compensator are studied. The results reveal that the subsynchronous frequency equivalent impedance of SSSC is positive, and the SSO damping is larger with higher proportion of SSSC in hybrid series compensator; in addition, the SSO damping is larger with larger compensation impedance or voltage of SSSC. The research is helpful for the planning and operating of the power system with large scale wind farm integrated.

Key words: hybrid series compensator; static synchronous series compensator; doubly fed induction generator; subsynchronous oscillation; subsynchronous frequency impedance characteristics

0 引言

风力发电是当今世界技术最为成熟、开发量最

大的清洁能源发电形式之一, 而中国陆上风能资源主要分布在远离负荷中心的“三北”(东北、西北和华北)地区, 风电开发的趋势是大规模的风电场集中经

收稿日期: 2018-11-17; 修回日期: 2019-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51607092); 国家电网公司科技项目(基于分布式潮流控制的输电网柔性交流潮流控制研究)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51607092), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research on Flexible AC Power Flow Control Technology of Transmission Network Based on Distributed Power Flow Control).

从式(5)可见,引入式(4)的前馈量后,通过对SSSC注入系统电压 U_{12} 的 d 轴和 q 轴分量偏差反馈,即可实现SSSC换流器出口支路电流方程的 d 轴和 q 轴分了解耦。

对SSSC换流器出口支路电压方程,引入前馈控制量

$$\begin{cases} U_{sed_fed} = r_{se} I_{sed} - \omega_s L_{se} I_{seq} \\ U_{seq_fed} = r_{se} I_{seq} + \omega_s L_{se} I_{sed} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, L_{se} 为SSSC换流器出口支路电感。则可得SSSC换流器出口电压 U_{se} 表达式为

$$\begin{cases} U_{sed} = U_{12d} + U_{sed_fed} + L_{se} \frac{dI_{sed}}{dt} \\ U_{seq} = U_{12q} + U_{seq_fed} + L_{se} \frac{dI_{seq}}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可见,引入式(6)前馈量后,通过对SSSC换流器输出电流 I_{se} 的 d 轴和 q 轴分量偏差反馈,即可实现SSSC换流器出口支路电压方程的 d 轴和 q 轴分了解耦。

根据式(2)~(7),得到SSSC换流器控制系统框图见图2,图2中, U_{12q} 控制回路具备阻抗补偿和电压补偿两种控制模式。

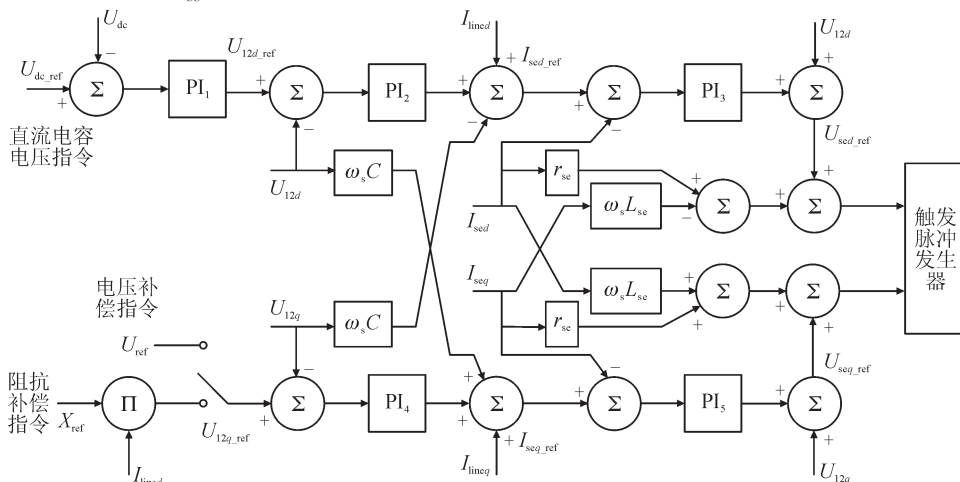


图2 SSSC控制框图

Fig. 2 Control block diagram of SSSC

2 SSSC次同步频段阻抗特性

2.1 SSSC次同步频段阻抗仿真测试方法

混合串补装置中的固定电容器对各频段电流均呈现电容特性,因此可能诱发系统的电气谐振。SSSC装置由串联变压器、电压源型换流器和直流电容等设备组成,无交流电容器,就工频频率而言在控制系统作用下向系统呈现出电容特性。

文中采用仿真测试的方法研究SSSC对次同步频段电流的阻抗特性,测试电路见图3。在工频电流源作用下,SSSC运行于工频稳态;然后,通过扰动电流源向系统注入一系列频率呈整数倍的小幅值次同步频率扰动电流

$$\Delta i_{sub} = \sum A \cos(\lambda \omega_s t + \varphi_\lambda) \quad (8)$$

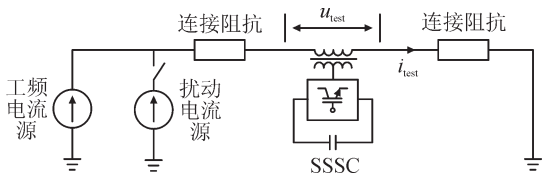


图3 SSSC次同步频段阻抗测试电路

Fig. 3 Testing circuit for SSSC impedance in subsynchronous frequency

式(8)中, $\lambda < 1$ 。

待仿真重新达到稳态后,截取SSSC串联变压器电压 u_{test} 和电流 i_{test} 的仿真结果,并进行Fourier分解得到在次同步频率下的SSSC串联变压器电压 U_{test} 和电流 I_{test} ,利用式(9)即可计算得到SSSC对频率为 ω 的次同步电流等效电抗和等效电阻值。

$$\begin{cases} X(\omega) = \text{Im} \left(\frac{U_{test}(\omega)}{I_{test}(\omega)} \right) \\ R(\omega) = \text{Re} \left(\frac{U_{test}(\omega)}{I_{test}(\omega)} \right) \end{cases} \quad (9)$$

SSSC装置的仿真参数设置详见表1,SSSC控制系统参数见表2,DFIG风电机组电气及轴系参数见表3。

表1 SSSC仿真系统参数

Table 1 Parameters of the simulation model with SSSC

参数	数值
串联变压器变比/(kV/kV)	110/35
直流电容 $C_{dc}/\mu\text{F}$	6 000
直流电容额定电压 U_{dc}/kV	70
换流器出口滤波支路电容 $C/\mu\text{F}$	30
换流器出口滤波支路电感 L_{se}/H	0.004
换流器出口滤波支路电阻 r_{se}/Ω	0.2

表 2 SSSC控制系统参数			
Table 2 Parameters of the SSSC control system			
参 数	数 值	参 数	数 值
k_{p1}	0.952 4	k_{i1}	1.523 8
k_{p2}	0.063 5	k_{i2}	30.158 0
k_{p3}	6.666 7	k_{i3}	587.300 0
k_{p4}	0.095 2	k_{i4}	39.682 0
k_{p5}	6.031 7	k_{i5}	587.300 0

注:表 2 各参数的下标 P 表示 PI 环节的比例环节增益;下标 I 表示 PI 环节的积分环节增益;下标 1~5 分别表示图 2 中对应的 PI 环节参数。

表 3 DFIG 电气及轴系参数			
Table 3 Electric and shaft parameters of the DFIG			
参数	$R_s/\text{p.u.}$	$L_{ls}/\text{p.u.}$	$L_{md}/\text{p.u.}$
数值	0.023	0.104	2.930
参数	$R'_r/\text{p.u.}$	$L'_r/\text{p.u.}$	$L_{mq}/\text{p.u.}$
数值	0.036 9	0.106 0	2.930 0
参数	H_l/s	H_g/s	$K/\text{p.u.}$
数值	3.84	0.71	0.79

2.2 SSSC 工作于阻抗补偿模式

控制 SSSC 工作于阻抗补偿模式,并分别设置其工频输出阻抗为 $-j5\ \Omega$ 、 $-j10\ \Omega$ 和 $-j15\ \Omega$,测试分析得到 SSSC 装置对次同步频段电流的等效阻抗见图 4。

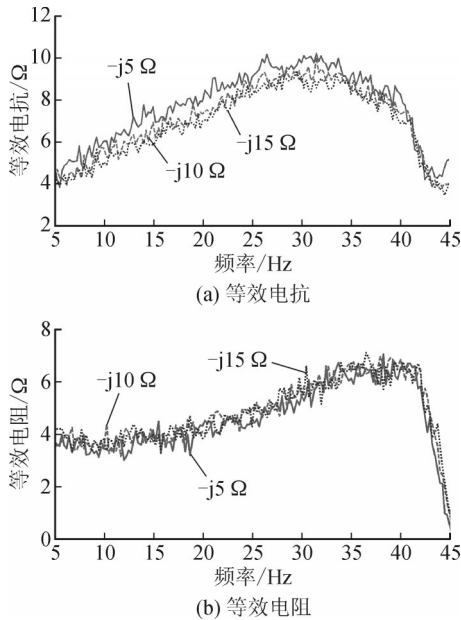


图 4 阻抗补偿模式下 SSSC 次同步频段等效阻抗

Fig. 4 Subsynchronous frequency equivalent impedance of SSSC with impedance compensation mode

由图 4 可知,在阻抗补偿模式下,SSSC 装置对

次同步频段电流的等效电抗和等效电阻均大于零;图 4(a)表明,SSSC 在次同步频段内的等效电抗随着其工频容性电抗补偿值的增大而有略微减小。

2.3 SSSC 工作于电压补偿模式

控制 SSSC 共组于电压补偿模式,并分别设置其输出的工频补偿电压分别为 5、10、20 kV,测试分析得到 SSSC 装置对次同步频段电流的等效阻抗见图 5。

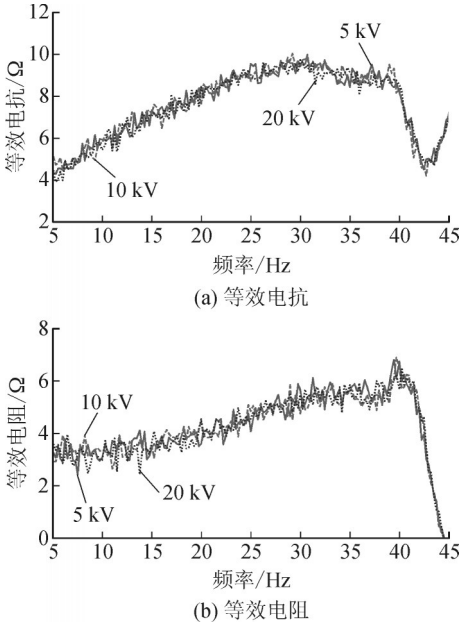


图 5 电压补偿模式下 SSSC 次同步频段等效阻抗

Fig. 5 Subsynchronous frequency equivalent impedance of SSSC with voltage compensation mode

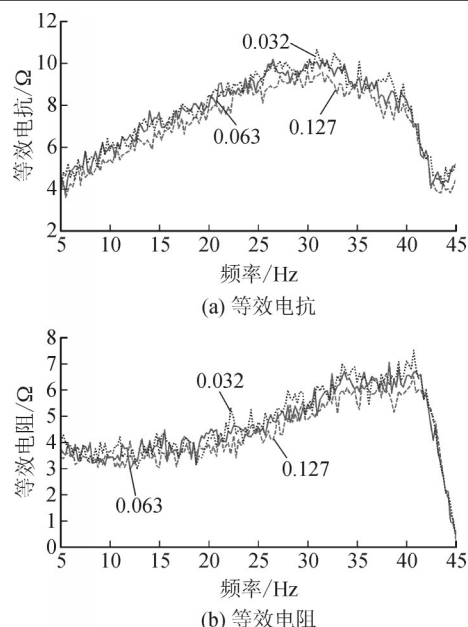
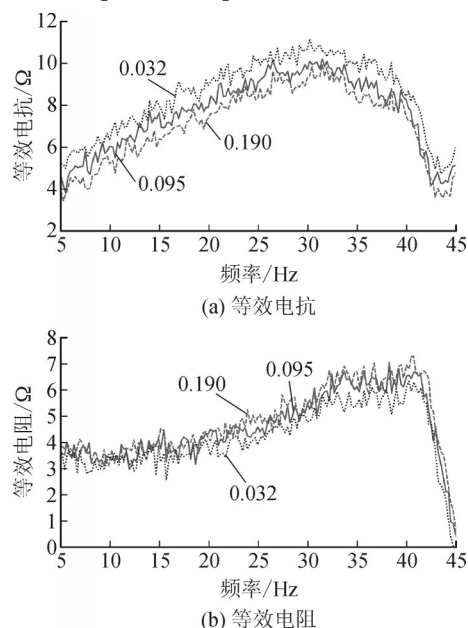
由图 5 可知,在电压补偿模式下,SSSC 装置对次同步频段电流的等效电抗和等效电阻均大于零,且等效电抗和等效电阻基本不随其工频电压补偿值变化。

由上述阻抗特性分析可知,SSSC 在阻抗补偿和电压补偿两种控制模式下的次同步频段等效电抗和等效电阻均为正。

2.4 SSSC 控制参数的影响

当 SSSC 分别工作于阻抗补偿模式和电压补偿模式时,分别分析了直流电压控制回路、阻抗/电压补偿控制回路参数对其等效阻抗的影响。分析发现,直流电压控制回路、阻抗/电压补偿控制回路中 PI 控制参数中的积分放大倍数对 SSSC 次同步频段的阻抗特性影响很小。

当 SSSC 工作于阻抗补偿模式时,直流电容电压控制回路参数 k_{p2} (PI 环节比例放大倍数)、阻抗控制回路参数 k_{p4} (PI 环节比例放大倍数)对 SSSC 次同步频段等效阻抗的影响分别见图 6、7。

图6 k_{p2} 对SSSC次同步频段等效阻抗的影响Fig. 6 Impact of k_{p2} on the subsynchronous frequency equivalent impedance of SSSC图7 k_{p4} 对SSSC次同步频段等效阻抗的影响Fig. 7 Impact of k_{p4} on the subsynchronous frequency equivalent impedance of SSSC

由图6、7可知,随着直流电压控制回路、阻抗/电压补偿控制回路中PI控制参数中的比例放大倍数的增大,SSSC等值电抗逐渐变小、等值电阻基本不变。

当SSSC工作于电压补偿模式时,直流电压控制回路、阻抗/电压补偿控制回路中PI控制参数中的比例放大倍数对SSSC等值阻抗的影响与阻抗补偿模式时类似,此处不再赘述。

3 算例分析

DFIG风电场经混合串补外送算例系统结构见

图8。容量为2 000 MW的大型DFIG风电场经单回500 kV交流线路接入等值系统,且线路上装设有混合串联补偿装置。

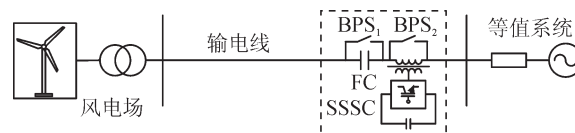


图8 风电场经混合串补外送系统接线图

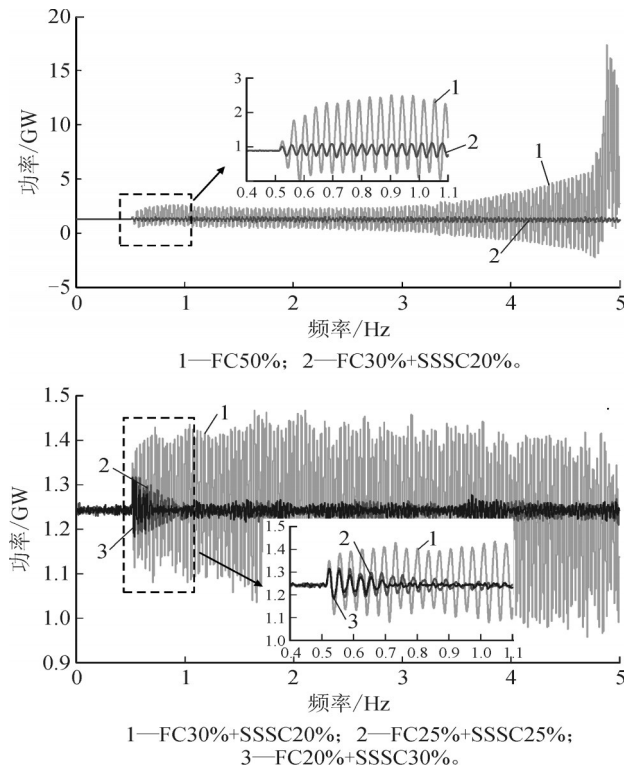
Fig. 8 Single-line diagram of wind farm integrated by hybrid series compensator

利用PSCAD/EMTDC仿真平台搭建了上述算例系统电磁暂态仿真模型,以仿真分析SSSC阻抗补偿模式和电压补偿模式对DFIG经混合串补外送系统SSO特性的影响。

仿真设置为:初始状态时合上BPS₁旁路固定电容器,0.5 s时打开BPS₁将固定电容器投入运行。

3.1 SSSC工作于阻抗补偿模式

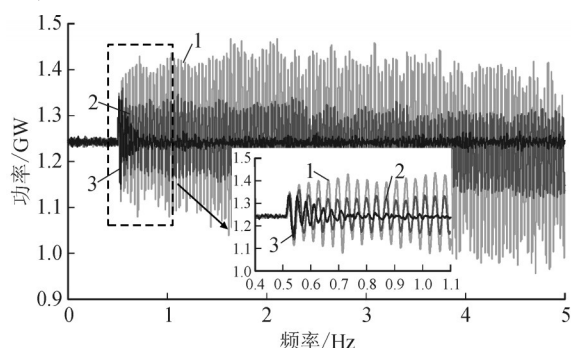
1)固定混合串补装置总串补度。设置SSSC工作于阻抗补偿模式,并设置混合串联补偿装置对输电线路的补偿度为50%,改变混合补偿装置中SSSC补偿阻抗的占比,分别设置SSSC输出的工频阻抗补偿度为20%、25%、30%,得到风电场的输出功率仿真结果见图9。

图9 混合串补中SSSC占比不同时风电场有功出力
Fig. 9 Power flow of the wind farm with variable proportion of SSSC in hybrid series compensator

由图9可知,当风电场仅通过50%的固定电容补偿线路外送时,系统SSO快速发散失稳;由于工作

于阻抗补偿模式的SSSC次同步频段等效电抗和等效电阻均为正,混合串补中SSSC占比为40%时(SSSC输出的工频阻抗补偿度为20%),风电场出力基本处于等幅振荡状态,系统SSO问题得到一定改善;进一步提高混合串补中SSSC占比,系统SSO稳定。

2)SSSC补偿阻抗不同。设置SSSC工作于阻抗补偿模式,并固定混合串补装置中的固定电容器对线路的补偿度为30%,分别设置SSSC输出的工频阻抗补偿度为20%、30%、40%,得到风电场的输出功率仿真结果见图10。由图10可知,随着SSSC补偿阻抗的增大,系统SSO阻尼逐渐增大,风电场出力振荡幅值减小并趋于稳定。



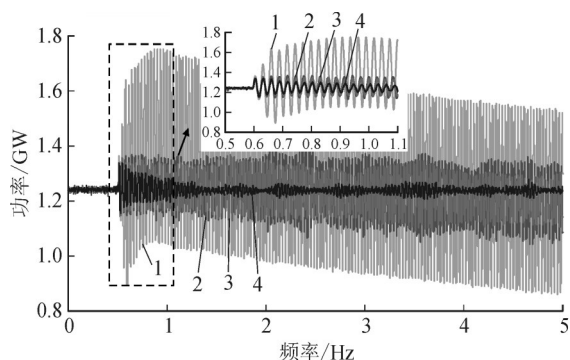
1—FC30%+SSSC20%; 2—FC30%+SSSC30%; 3—FC30%+SSSC40%。

图10 SSSC补偿阻抗不同时风电场有功出力

Fig. 10 Power flow of the wind farm with variable compensation impedance of SSSC

3.2 SSSC工作于电压补偿模式

设置SSSC工作于电压补偿模式,并固定混合串补装置中的固定电容器对线路的补偿度为30%,分别设置SSSC输出的工频补偿电压为5、10、20 kV,得到风电场的输出功率仿真结果见图11。



1—No SSSC; 2—SSSC 5 kV; 3—SSSC 10 kV; 4—SSSC 20 kV。

图11 SSSC补偿电压不同时风电场有功出力

Fig. 11 Power flow of the wind farm with variable compensation voltage of SSSC

由图11可知,当风电场仅通过30%的固定电容补偿线路外送时,系统SSO不稳定;由于工作于电压补偿模式的SSSC次同步频段等效电抗和等效电阻均为正,SSSC投入运行后,风电场出力振幅逐渐减

小;进一步提高混合串补中SSSC的补偿电压值,系统SSO稳定。

由上述分析可知,由于SSSC在阻抗补偿和电压补偿两种控制模式下的次同步频段等效电抗和等效电阻均为正;因此,较之于纯固定电容补偿,含SSSC的混合串补装置有助于改善系统的SSO问题。同时,随着SSSC补偿阻抗或补偿电压的增大,SSSC装置对系统电压的调节作用增强,系统的SSO阻尼亦随之增大。

4 结论

文中回顾了混合串补装置的结构及控制策略,设计了电力装置次同步频段阻抗特性仿真测试方法,然后研究了SSSC的次同步频段阻抗特性、DFIG经混合串补外送系统的SSO特性。

1)采用 dq 解耦矢量控制的SSSC在阻抗补偿、电压补偿控制模式下的次同步频段等效电抗和等效电阻均为正。

2)较之于纯固定电容补偿,由固定电容器和SSSC组成的混合串补装置有助于改善系统的SSO问题。

3)系统的SSO阻尼随混合串联补偿装置中SSSC占比、补偿阻抗及补偿电压的增大而增大。

由于造价较高,限制了混合串补装置中SSSC装置的容量;因此,后续将开展利用混合串补装置中SSSC附加控制提高风电经混合串补外送系统SSO阻尼的研究,以进一步支撑风电外送系统的规划设计和运行。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [2] 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 in fault ride through for wind power system in the terminal of the power system[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 192-196.
- [3] 陈国平,李明节,许 涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [4] ZHU X Y, SUN H S, WEN J Y, et al. Improved complex

- torque coefficient method using CPCM for multi-machine system SSR analysis[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2014, 26(5):2060-2068.
- [5] 朱鑫要,孙海顺,陈 萌,等.一种构建网络状态空间模型的新方法及其在SSR研究中的应用[J].中国电机工程学报,2014,34(4):605-612.
ZHU Xinyao, SUN Haishun, CHEN Meng, et al. A novel approach to construct the state-space model of power system grid and its application in SSR study[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):605-612.
- [6] 张宋彬,江全元,陈跃辉,等.含DFIG风机的电力系统次同步谐振附加阻尼控制器设计[J].电力自动化设备,2014,34(6):36-43.
ZHANG Songbin, JIANG Quanyuan, CHEN Yuehui, et al. Design of additional SSR damping controller for power system with DFIG wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):36-43.
- [7] 高本锋,刘 晋,李 忍,等.风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J].电工技术学报,2015,30(16):154-161.
GAO Benfeng, LIU Jin, LI Ren, et al. Studies of sub-synchronous control interaction in wind turbine generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16):154-161.
- [8] 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.
- [9] 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 transmission system in guyuan farms[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1):321-328.
- [10] WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, 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.
- [11] 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.
- [12] 刘黎明,康 勇,陈 坚,等.SSSC建模、控制策略及性能[J].电工技术学报,2006,21(9):37-43.
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Static synchronous series compensator: Modeling, control scheme and performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9):37-43.
- [13] 朱鑫要,赵静波,周 前,等.一种提高系统稳定性的静止同步串联补偿器控制策略[J].电力工程技术,2017,36(3):28-32.
ZHU Xinyao, ZHAO Jingbo, ZHOU Qian, et al. Control strategy of static synchronous series compensator to improve power system stability[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):28-32.
- [14] CARPANEN R P, RIGBY B S. An improved SSSC-based power flow controller design method and its impact on torsional interaction[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012(43):194-209.
- [15] GYUGYI L, SCHAUDER C D, SEN K K. Static synchronous series compensator: A solid-state approach to the series compensation of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1):406-417.
- [16] PILLAI G N, GHOSH A, JOSHI A. Torsional interaction studies on a power system compensated by SSSC and fixed capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3):988-993.
- [17] JOWDER F A, OOI B T. Series compensation of radial power system by a combination of SSSC and dielectric capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):458-465.
- [18] 高本锋,肖湘宁,赵成勇,等.混合串联补偿装置抑制次同步谐振的研究[J].电工技术学报,2010,25(11):142-147.
GAO Benfeng, XIAO Xiangning, ZHAO Chengyong, et al. Study of hybrid series compensator on sub-synchronous resonance damping[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11):142-147.
- [19] 郑 翔,徐 政,屠卿瑞,等.静止同步串联补偿器次同步谐振多模式阻尼控制器设计[J].高电压技术,2011,37(9):2321-2327.
ZHENG Xiang, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Static synchronous series compensator multimode damping controller design for subsynchronous resonance suppression[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9):2321-2327.
- [20] BONGIORNO M, SVENSSON J, ANGQUIST L. On control of static synchronous series compensator for SSR mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2):735-743.
- [21] RAJARAM T, REDDY J M, XU Yunjian. Kalman filter based detection and mitigation of subsynchronous resonance with SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2):1400-1409.

朱鑫要(1987—),男,博士,工程师,主要从事电力系统稳定分析与控制、电力系统次同步振荡、新能源并网、HVDC & FACTS等研究。

赵静波(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统稳定分析、电力系统规划等研究。

刘建坤(1980—),男,研究员级高级工程师,主要从事电力系统分析、电力系统规划、FACTS等研究。