

DOI: 10.7667/PSPC162120

次同步振荡监测控制系统的研究与实现

刘革新, 白杨, 任祖怡, 朱晓彤, 王新宝, 杨利民

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 研究了一种次同步振荡监测控制系统, 由监测控制装置、同步相量测量单元(PMU)和监测分析主站三部分构成。监测控制装置通过功率轨迹跟踪的辨识技术, 快速准确地识别次同步振荡工况。同时结合火电机组的模态频率特征, 以分轮分级的控制策略, 在火电机组扭振保护动作前快速平息电网次同步振荡。提出了次同步振荡的全景分析方案, 通过召唤 PMU 的连续录波文件, 在监测分析主站实现了全网次同步振荡状态的自动计算和直观展示, 为次同步振荡机理研究创造了有利条件。最后, 通过工程应用案例验证了系统的可行性和有效性。

关键词: 次同步振荡; 间谐波; 轨迹跟踪; 功率振幅; 模态频率; 全景分析; 监测控制

Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation

LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, ZHU Xiaotong, WANG Xinbao, YANG Limin

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: A monitoring and control system of sub synchronous oscillation is composed of three parts: the monitoring and control device, the synchronous Phasor Measurement Unit (PMU) and the monitoring and analysis main station. The detection and control device identifies sub synchronous oscillation conditions quickly and accurately through the power tracking trajectory identification technique, meanwhile combining with the modal frequency characteristics of thermal power unit, and using the control strategy of the wheel grading, quells the sub synchronous oscillation of power grid quickly before thermal power unit torsional vibration protection action. The SSO panoramic analysis scheme is proposed. By calling continuous recording file of PMU, it achieves automatic calculation of the whole network sub synchronous oscillation state and visual display in the monitoring and analysis master station, which creates favorable conditions for the research of sub synchronous oscillation mechanism. At last, the feasibility and effectiveness of the system are verified by the case of engineering application.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/14-JS-188).

Key words: sub synchronous oscillation (SSO); inter harmonic; trajectory tracking; power amplitude; modal frequency; panoramic analysis; monitoring and control

0 引言

次同步振荡属于系统的振荡失稳。它是由电力系统中一种特殊的机电耦合作用引起的, 其最大的危害是, 严重的机电耦合作用可能直接导致大型汽轮发电机组转子轴系的严重破坏, 造成重大事故, 危及电力系统的安全运行^[1]。近年来国家电网大规模新能源电源并网与直流送出工程的推进, 导致大量电力电子装备应用, 在电网中可能会引入间谐波, 进一步引起次同步振荡, 严重危害电力系统安全。尤其是风力发电系统的结构、并网方式与传统火力

发电机组相比均有本质的区别, 而且风电场群又是由多种类型风电机组构成, 导致大规模风电基地外送的次同步振荡问题变得十分复杂^[2]。

当前国内对于大规模新能源区域发生次同步振荡的监测、控制手段还不高, 主要体现在:

1) 同步相量测量单元(PMU)上送广域测量系统(WAMS)的电流、电压等电气量为相量数据, 并且上送数据的频率较低(通常小于 50 Hz), 不满足次同步振荡分析的数据要求。

2) 基于嵌入式装置的辨识次同步振荡技术仍然缺乏深入研究。比如文献[3]将次同步振荡与低频振荡同等对待。文献[4]没有研究间谐波电流次同步分量和超同步分量并存的计算方法和效果。文献[5]

通过发电机组的定子电流和转子电流来辨识次同步振荡, 仅适用于电厂侧。文献[6]提到的辨识算法, 需要大量的迭代以及内积运算, 不易在嵌入式装置中实现。

3) 缺乏平息电网次同步振荡的控制策略, 仅在火电机组有扭振保护一道防线。一旦次同步振荡造成扭振保护动作后, 火电机组被迫停机, 将给地区供电的可靠性带来不利影响。

4) 大规模新能源区域发生次同步振荡的机理仍在探索中, 需要历次振荡过程中整个电网的数据来提供支撑。现有的 WAMS 还不能提供这些数据, 也不能进行分析和展示, 无法直观地评估次同步振荡的影响范围。

基于上述原因, 本文研究了一种次同步振荡监测控制系统, 一方面能及时采取安全有效的控制措施, 有效平息该区域的次同步振荡, 避免振荡对交、直流电网设备产生不利影响; 另一方面能对电网的次同步振荡现象进行准确地监测、分析, 直观地展示次同步振荡的传播范围及发展过程。

1 监测控制系统的架构及功能

设计的次同步振荡监测控制系统架构如图 1 所示, 由以下三部分组成:

- 1) 监测控制装置;
- 2) 同步相量测量单元(PMU);
- 3) 监测分析主站。

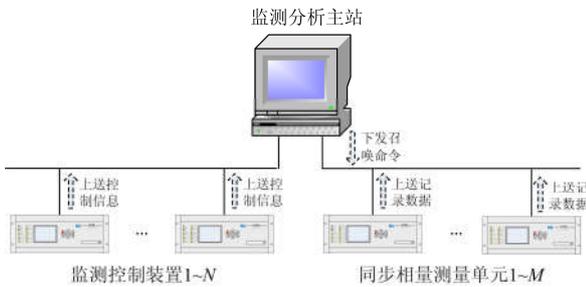


图 1 监测控制系统的架构

Fig. 1 Architecture of monitoring and controlling system

监测控制装置完成次同步振荡的辨识及控制功能。当电力系统发生次同步振荡时, 监测控制装置采用灵敏、可靠的次同步振荡辨识方法及有效的控制策略, 发出告警或者采取解列、切机等控制措施, 平息次同步振荡事故。从大规模新能源电网历次的次同步振荡事件看, 风电、光伏等新能源站点并网线路的间谐波含量很大, 造成次同步振荡的可能性最大, 因此建议优先在这些站点部署监测控制装置。

同步相量测量单元负责实时记录电网各厂站各间隔的电流、电压采样值, 长时间连续保存各监视支路的采样数据, 实时记录次同步振荡事件发展的每个过程。同时接收监测分析主站的召唤命令, 及时上送监测分析主站计算、分析所需的连续录波数据。由于 PMU 在电网各厂站中基本全部部署, 所以可以保证观测、分析数据的完整性。

监测分析主站收到监测控制装置的告警或动作信息后, 对区域电网相关的同步相量测量单元下发召唤记录数据的命令。待收到所有 PMU 的数据后, 精确统一计算全网各支路次同步振荡的特征频率及间谐波含量, 分析次同步振荡的影响范围, 直观展示次同步振荡事件的发展过程。监测分析主站在整个区域电网部署一套即可。

2 次同步振荡的辨识技术

要实现次同步振荡的监测控制功能, 首先必须灵敏、可靠地辨识出次同步振荡特征。从次同步振荡的电气量特征发现, 电流和电压都含有次同步分量和超同步分量, 仅从电流中提取次同步振荡特征很难保证辨识的灵敏性, 而功率代表了电流、电压综合特征, 从三相总瞬时功率的变化轨迹可以准确、灵敏地判断次同步振荡是否发生, 并且易于在嵌入式装置中实现。三相总瞬时功率 P 计算方法如下。

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a \times I_a + U_b \times I_b +$$

$$U_c \times I_c = \frac{3}{2} U_m \times I_m \times \cos \theta$$

式中: U_m 、 I_m 分别为电压、电流的幅值; θ 为电压超前电流的相角。

电网稳定正常运行时, 各支路三相电流、三相电压以正序对称分布, 三相总瞬时功率 P 为恒定值。但发生次同步振荡后, P 不再为恒定值, 通过 P 的变化轨迹(见图 2)可以判别出次同步振荡状态, 具体的辨识方法如下。

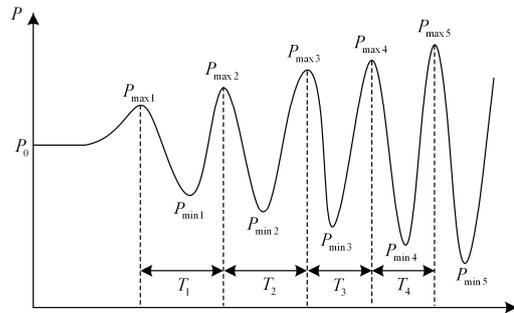


图 2 次同步振荡后功率的变化轨迹

Fig. 2 Change of power after the sub synchronous oscillation

1) $|P - P_0| > P_{qd}$, P 为当前瞬时值, P_0 为几秒前的平均功率, P_{qd} 为次同步振荡启动门槛。

2) $P_{\max_k} - P_{\min_k} > P_{dz}$, P_{\max_k} 为第 k 个次同步振荡周期的最大功率, P_{\min_k} 为第 k 个次同步振荡周期的最小功率, P_{dz} 为辨识次同步振荡的功率振幅门槛。

3) $T_{\max} > T_k > T_{\min}$, T_{\max} 为辨识次同步振荡的周期高门槛, T_{\min} 为辨识次同步振荡的周期低门槛。

4) $N > N_{set}$, N_{set} 为辨识次同步振荡的振荡次数定值。

通过设置上述 4 个条件, 可以准确辨识出次同步振荡的功率振幅特征, 有效地将次同步振荡与系统潮流转移、短路故障、低频振荡等工况区分开, 完美地保证了监测控制性能的可靠性和灵敏性。

3 次同步振荡的控制策略

从目前新能源电源并网区域次同步振荡机理的研究成果看, 电力电子设备是激发次同步振荡不可忽视的一个因素, 但目前电网对于次同步振荡的抑制措施仍仅限于在火电机组侧安装扭振保护, 这是不够的。在这些区域应该增设一道控制防线, 当控制装置检测到次同步振荡后, 优先切除风电、光伏等疑似振荡源, 尽量避免火电机组扭振保护动作, 从而保证这些区域的火电机组能正常运行。下面举例说明这道防线的控制策略。

图3为一个典型风电汇集区域的电网结构图, 图中有2个风电汇集站, 每个风电汇集站连接了多个风电场, 两个风电汇集站通过级联与220 kV变电站C相连, 控制装置安装在风电汇集站A和B, 具体的控制策略如下。

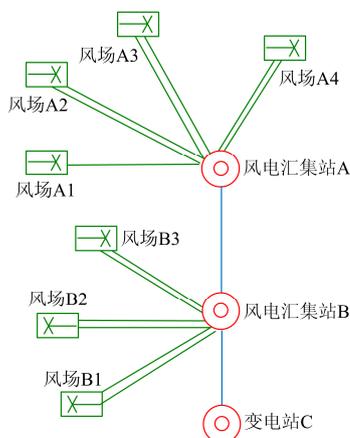


图3 典型风电汇集区域的电网结构图

Fig. 3 Structure of typical wind power collection area

1) 检测各风电场 110 kV 出线、变电站间 220 kV 级联线路的功率振幅特征。

2) 计算各监视支路的功率振幅 $P_{\max_k} - P_{\min_k}$, 在各轮控制对象里分别按功率振幅的大小进行排序。

3) 对控制对象进行分轮分级控制, 各轮次动作时间逐渐递增, 各轮次动作门槛逐渐递增, 控制对象范围也逐渐变大。第一轮在风电汇集站内选择功率振幅最大的一个风电场切除。第二轮比较不同汇集站风电场的功率振幅之和, 切除功率振幅大的汇集站所有风电场。第三轮切除风电汇集站 A 和 B 下属的所有风电场。如果风电场 A1 为振荡源, 那么控制装置会在第一轮切除风电场 A1; 如果风电场 A1~A4 都为振荡源, 并且每条风电场线路的振幅都不大, 不满足第一轮动作条件, 但满足第二轮动作条件, 则切除风电场 A1~A4; 如果风电场 A1~A4、B1~B3 都为振荡源, 并且每条风电场线路的振幅都不大, 不满足第一轮动作条件, 也不满足第二轮动作条件, 但满足第三轮动作条件, 则切除风电场 A1~A4、B1~B3。

4) 提取次同步振荡功率的特征频率信息, 若次同步振荡功率的特征频率与电网火电机组的模式频率吻合时, 结合低动作门槛快速动作, 尽可能快速平息电网次同步振荡, 避免火电机组的扭振保护动作; 若判断出不吻合, 则结合高动作门槛延时动作, 保证动作的可靠性。

4 次同步振荡的全景分析方案

次同步振荡机理研究中遇到一个很大的困难就是无法获知整个区域电网各测点在次同步振荡过程中的电气量状态。传统相量测量单元(PMU)的数据质量不满足次同步振荡监测分析的要求, 另外传统 WAMS 主站不具备分析和展示功能, 因而无法给调度运行人员处理次同步振荡事故分析提供强有力的技术支持。为满足次同步振荡全景分析的需求, 建议同步相量测量单元和监测分析主站需要具备以下功能。

1) 同步相量测量单元(建议用 PMU)支持长时间的连续录波功能, 每分钟按标准 COMTRADE 格式形成一次连续录波的波形文件, 并配置大容量存储介质, 保存至少 72 h 连续录波的波形文件。录波的采样率建议在 1.2 kHz 以上。

2) 监测分析主站能够通过手动或者条件触发召唤电网所有同步相量测量单元的波形。

3) 监测分析主站能够对每个测点的录波数据进行计算分析, 得出该测点在次同步振荡过程中的

相关特征量，包括振荡频率、幅值等。

4) 监测分析主站能够图形展示各测点电流、电压间谐波的含量。

5) 监测分析主站能够在电网拓扑图中展示次同步振荡的影响范围。

5 工程应用

根据上述思路设计的次同步振荡监测控制系统，并已经在新疆哈密地区实施，投运近一年时间，期间经历了几十次次同步振荡，动作行为全部正确，不仅快速有效平息了哈密地区的次同步振荡，并且为该区域次同步振荡机理研究创造了条件。下面以一个工程应用案例来说明。

2016年7月29日19时25分，新疆哈密望洋台地区发生次同步振荡，图4为望洋台东风电汇集站各条110 kV风电场进线瞬时功率图。其中110 kV广望东风一线功率振幅最大(约为6 MW)，超过了低动作门槛(5 MW)，同时控制装置检测到功率的特征频率为26.4 Hz，正好与花园电厂火电机组模态2频率吻合，满足第一轮动作条件后控制装置发令切除了中广核望洋台东风电场，成功平息了该地区次同步振荡，避免了激发花园电厂火电机组轴系扭振动作。从图4可以看出，控制装置动作前，各条110 kV风电场进线功率的平均值各不相同，功率振幅都随着时间缓慢增大，次同步振荡与各风电场出力并无明显关联。控制装置动作后，除广望东风一线外，各条110 kV风电场进线功率的平均值与动作前基本相同，但是功率振幅都迅速降低，体现了控制措施的有效性。

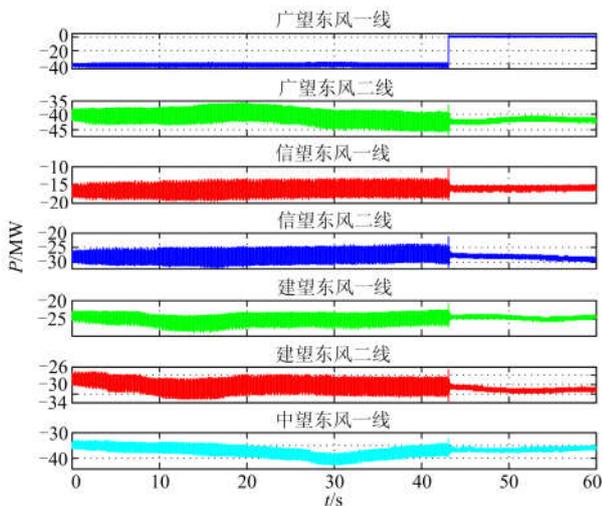
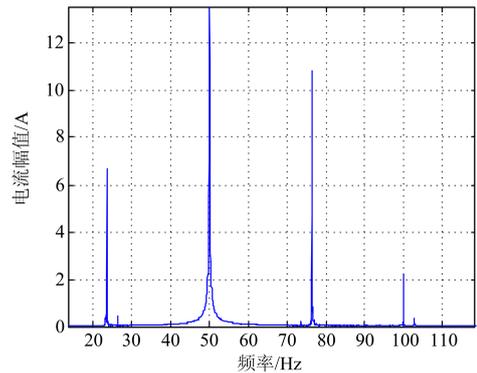
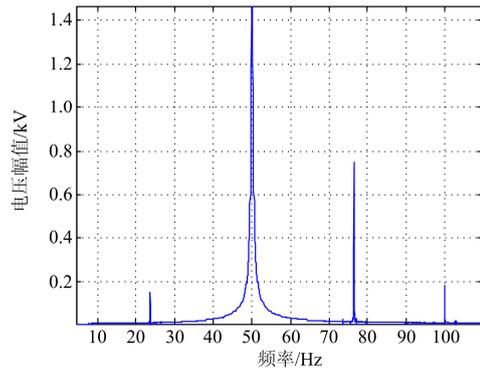


图4 望洋台东风电汇集站110 kV线路功率变化
Fig. 4 110 kV lines power change of Wang Yang Tai Dong collection station

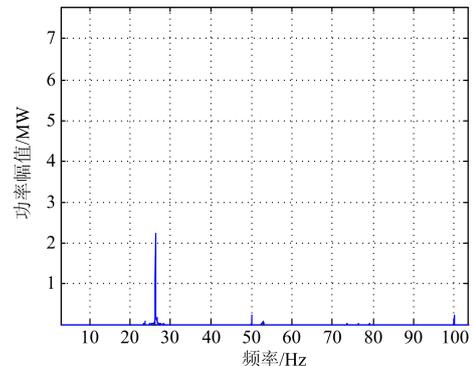
监测分析主站收到监测控制装置的动作信号后，自动上召了哈密地区相关厂站的PMU录波数据。图5为次同步振荡发生后广望东风一线电流、电压及瞬时功率的频谱分析图，可以看出广望东风一线电流中23.6 Hz间谐波分量幅值约为6.7 A，占基波2.2%，76.4 Hz间谐波分量幅值约为10.8 A，占基波3.6%，100 Hz二次谐波幅值约为2.2 A，占基波0.7%。广望东风一线电压中23.6 Hz间谐波分量幅值约为0.16 kV，占基波0.2%，76.4 Hz间谐波分量幅值约为0.7 kV，占基波0.7%，100 Hz二次谐波幅值约为0.2 kV，占基波0.2%。广望东风一线瞬时功率中23.6 Hz幅值约为2.3 MW。



(a) 广望东风一线电流频谱



(b) 广望东风一线电压频谱



(c) 广望东风一线功率频谱

图5 广望东风一线电气量频谱分析

Fig. 5 Frequency spectrum analysis of electric quantity in Guang Wang Dong Feng line 1

通过次同步振荡监测分析主站将本次次同步振荡过程中哈密地区电网主要线路的电流间谐波分布图展示出来,如图 6 所示(图中电流间谐波的大小全部折算至 220 kV 电压等级)。从图中可以清晰地看出,220 kV 塘望东线间谐波电流的次同步和超同步

分量含量最高,造成本次次同步振荡的源头可能来自望洋台东汇集站的风电场,按照控制策略,第一轮优先切除下属风电场中振幅最大的中广核风电场,平息了本次次同步振荡事件。

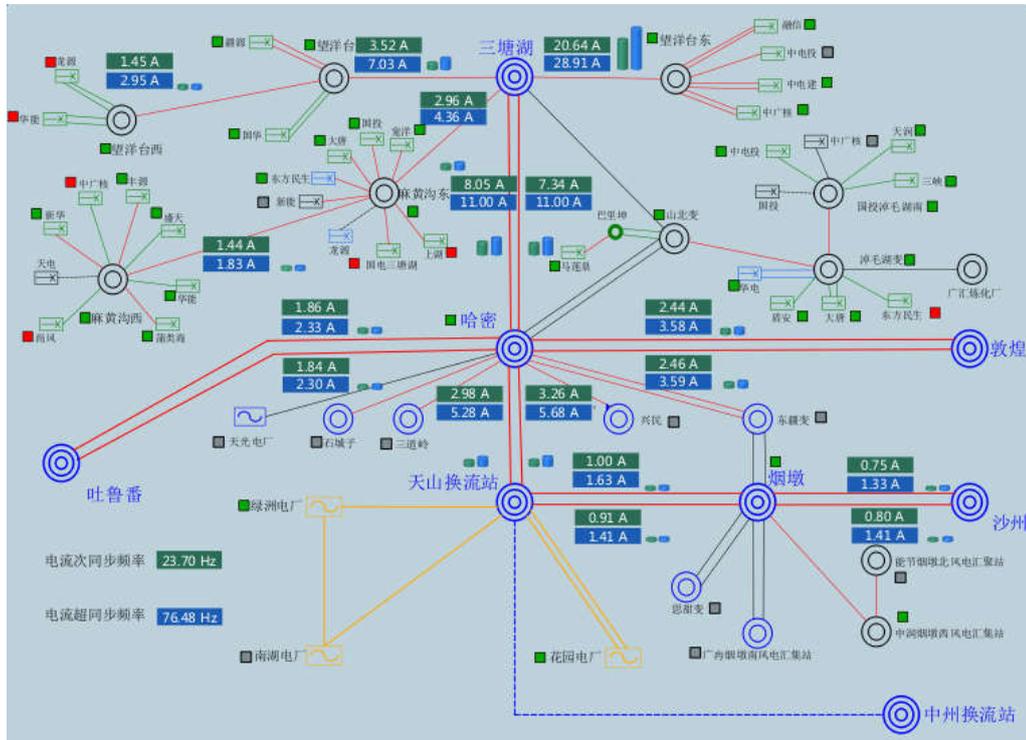


图 6 新疆哈密地区的间谐波含量分布图

Fig. 6 Distribution of the inter-harmonic content in Hami area in Xinjiang

6 结论

治理电网的次同步振荡,首先应该研究其机理,对次同步振荡的源头进行改进,比如优化电力电子设备的控制参数,优化新能源区域电网的运行方式或者网络架构等,这是治理措施中的第一道防线。本文研究的次同步振荡监测控制系统,是治理措施中的第二道防线,通过功率轨迹跟踪的次同步振荡辨识技术,结合火电机组的模式频率特征,采用分轮分级的控制策略,可有效平息区域电网的次同步振荡。同时,本系统满足了次同步振荡事故全景分析的需求,实现了全网次同步振荡状态的自动计算和直观展示,提高了次同步振荡事故分析的效率,也丰富了次同步振荡产生及传播机理的研究手段。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王倩, 刘辉, 栗然, 等. 大规模风电引发次同步振荡机理及分析方法综述[J]. 华北电力技术, 2014(6): 10-15.
WANG Qian, LIU Hui, LI Ran, et al. Summary about mechanism and mitigation of SSR when wind power connecting grid[J]. North China Electric Power, 2014(6): 10-15.
- [3] 张敏, 沈健, 侯明国, 等. 相量测量单元实现次同步振荡在线辨识和告警的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 143-152.
ZHANG Min, SHEN Jian, HOU Mingguo, et al. Discussion on on-line identification and warning of subsynchronous oscillation for phasor measuring unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 143-152.
- [4] 王茂海, 齐霞. 电力系统次同步振荡分量的快速在线检测算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 149-154.

WANG Maohai, QI Xia. Fast online detection method for power system sub-synchronous oscillation components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 149-154.

[5] 王茂海, 高洵, 王蓓, 等. 基于广域测量系统的次同步振荡在线监测预警方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 98-102.

WANG Maohai, GAO Xun, WANG Bei, et al. Online early-warning of sub-synchronous oscillations based on wide area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 98-102.

[6] 董飞飞, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于阻尼正弦原子分解的次同步振荡模态辨识[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 119-125.

DONG Feifei, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Subsynchronous oscillation modal identification based on damping sine atomic decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 119-125.

[7] 高本峰, 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] 熊杰锋, 李群, 袁晓冬, 等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 125-132.

XIONG Jiefeng, LI Qun, YUAN Xiaodong, et al. Detection methods of harmonics and inter-harmonics in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 125-132.

[9] 鹿建成, 李啸骢, 黄维, 等. 基于 SSSC 和励磁协调抑制次同步振荡的线性最优控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 107-111.

LU Jiancheng, LI Xiaocong, HUANG Wei, et al. Linear optimal controller of static series synchronous compensator and excitation to suppress sub-synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 107-111.

[10] 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.

[11] 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.

[12] ZHAO Jinqun, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-19. DOI 10.1186/s41601-016-0013-1.

收稿日期: 2016-12-29; 修回日期: 2017-02-14

作者简介:

刘革新(1980—), 男, 硕士, 高工, 主要研究方向为继电保护及安全稳定控制; E-mail: liugm@nrec.com

白杨(1971—), 男, 硕士, 高工, 主要研究方向为继电保护及安全稳定控制; E-mail: baiy@nrec.com

任祖怡(1972—), 男, 研究员级高工, 主要研究方向为继电保护及安全稳定控制。E-mail: renzy@nrec.com

(编辑 张爱琴)