

新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究

李明节¹, 于钊¹, 许涛¹, 贺静波¹, 王超¹, 谢小荣², 刘纯³

(1. 国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031;

2. 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;

3. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Study of Complex Oscillation Caused by Renewable Energy Integration and Its Solution

LI Mingjie¹, YU Zhao¹, XU Tao¹, HE Jingbo¹, WANG Chao¹, XIE Xiaorong², LIU Chun³

(1. National Power Dispatching and Control Center, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In this paper, several oscillation cases caused by wind power integration are presented and oscillation problems caused by large-scale power electronic convertors connected to power grid are summarized. Based on theoretical analysis and engineering practice of a sub-synchronous oscillation event in Qomul, Xinjiang, risks, challenges and engineering solutions of the oscillation are illustrated. Finally, directions of further theoretical and engineering technical study are proposed.

KEY WORDS: renewable energy; sub-synchronous oscillation; stability

摘要: 介绍了风电机组并网引发的振荡事件, 总结了由大规模电力电子变流器接入电网引起的振荡稳定性问题。在此基础上, 结合在新疆哈密次同步振荡事件上的理论分析和工程实践, 分析了大规模新能源接入电网后存在的振荡风险、面临的技术挑战以及目前的工程解决方案, 从理论研究和工程技术 2 方面提出了下一步的研究方向。

关键词: 新能源; 次同步振荡; 稳定性

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.3049

0 引言

以风电为代表的新能源近年来发展迅猛^[1-3]。2015 年, 全国新增风电装机容量 31.73GW, 同比增长 32.8%; 累计装机容量 128.3GW。然而, 与传统旋转发电机不同, 新能源机组多采用电力电子变流器接入电网, 变流器与电网相互作用, 可能引发

谐振或振荡问题, 造成机组跳闸乃至设备损坏, 危及电网的安全稳定运行^[4-8]。近年来, 世界各地发生了与新能源机组相关的多种形态振荡稳定性问题, 典型的如, 2009 年 10 月, 美国德州某风场的双馈风机群与串补电网间发生频率约 20Hz 的次同步谐振(sub-synchronous oscillation, SSR)事故, 造成大量风机的撬杠电路损坏和脱网^[9]; 2011 年以来, 我国河北沽源地区风电场发生了上百次由风电机组与串补电网相互作用而引发的次同步谐振, 其频率在 3~10Hz 内变化, 曾造成变压器异常振动和大量风机脱网^[4-5]; 2015 年以来, 我国新疆哈密地区频繁出现风电机组参与的次同步振荡, 频率在 20~40Hz 内变化, 次同步振荡功率穿越 35/110/220/500/750 kV 多级电网, 甚至激发汽轮机组轴系扭振, 造成 300 km 外的某电厂机组全跳和特高压直流功率骤降的事故。

随着新能源大规模并网以及其他大容量电力电子装置的广泛应用, 尤其是在我国西部、北部地区高度集中地接入, 振荡稳定性问题正越来越成为巨大的潜在风险, 若不能及时系统全面地研究应对策略和解决措施, 可能会给设备厂商、发电企业和电网公司造成巨大的经济损失, 甚至可能造成大范围稳定性事故, 危及电网的安全可靠运行, 影响国家能源战略的顺利实施^[10-16]。

本文以国内的典型风电场次同步振荡事件为基础, 分析振荡特点、研究现状和面临的挑战, 提出新能源发电并网系统的振荡稳定性问题的研究思路 and 应对策略。

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGXJ0000KXJS1500672, SGXJ0000KXJS1500669, SGXJ0000KXJS1500671, SGXJ0000KXJS1500670)。

Project Supported by State Grid Science & Technology Project (SGXJ0000KXJS1500672, SGXJ0000KXJS1500669, SGXJ0000KXJS1500671, SGXJ0000KXJS1500670)。

1 新能源机组并网引发的振荡稳定性问题

1.1 新疆哈密地区直驱风电机群参与的次/超同步振荡

图 1 所示为 2015 年新疆哈密地区电网的示意图。该地区是典型的风电大规模集中接入系统, 当地负荷规模小, 基本没有常规电源接入。北部有 18 座风电场, 以直驱风机为主力机型, 总规模约 1500MW, 风电经 35/110/220kV 线路汇集到变电站 D, 随后通过双回 220kV 线路输送到变电站 F, 经过升压变压器 (220kV/750kV) 升压后风电注入 750kV 网络。在变电站 H 接有 2 个火电厂, 即电厂 M 和 N。电厂 M 有 4 台同型号的 660MVA 机组, 电厂 N 有 2 台同型号的 660MVA 机组。电厂 M 和 N 中的机组各有 3 个扭振模式。风电场和火电厂之间的距离在 300 km 左右。变电站 H 同时为特高压直流换流站, 直流电压等级为 ± 800 kV, 输送容量 8000MW, 送往中部负荷中心。

2015 年 7 月 1 日, 该系统出现了次同步频率范围内的持续的功率振荡。11:53—11:55, 振荡导致电厂 M 的 #1、#2、#3 机组(#4 机组检修, 未并网) 轴系扭振保护相继动作跳闸, 共损失功率 128 万 kW, HVDC 功率紧急由 450 万 kW 降至 300 万 kW, 事故造成该地区电网频率从 50.05Hz 降为 49.91Hz。

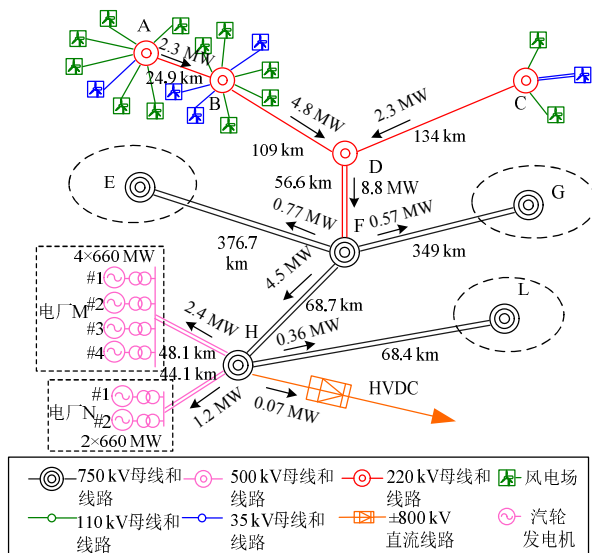


图 1 新疆某风电系统拓扑图

Fig. 1 Topology of wind power system in Xinjiang

图 2 所示为 9:46—9:47 该地区中某风电场输出有功功率波形。可见, 在 9:46:40 时刻, 线路有功功率迅速振荡发散, 随后进入持续的振荡状态。变电站 D 至 F 之间 220 kV 线路中次同步电流分量的频率变化情况(7 月 1 日 9:46—13:05)如图 3 所示。可见, 线路电流中次同步分量的频率的变化范围为

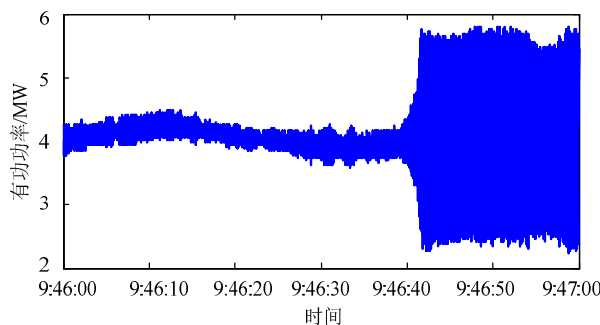


图 2 某风电场功率(新疆哈密地区)

Fig. 2 Power flow in a wind farm (Qomul, Xinjiang)

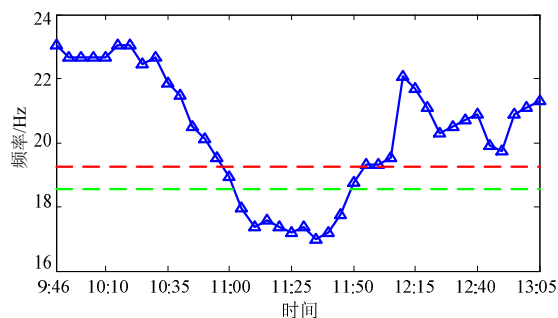


图 3 次同步振荡频率

Fig. 3 Frequency of SSR

83Hz 超同步频率分量。当次同步电流分量的频率与汽轮机组轴系扭振频率互补时, 激发了机组的轴系扭振。如图 3 所示, 当次同步电流分量的频率依次穿过电厂 M(模式 3 互补频率, 图 3 中红色虚线) 和 N(模式 2 互补频率, 图 3 中绿色虚线) 机组相应的模式互补频率时, M、N 电厂机组轴系相应出现扭振, 现场扭振保护装置录波验证了这一点。其中, 在 10:55—10:59 和 11:41—11:45 时段内, 次同步电流分量的频率穿越了电厂 N 中机组模式 2 互补频率。由于穿越时间较短, 电厂 N 中机组的扭振保护未动作。在 10:48-10:53 时段, 次同步电流分量的频率穿越了电厂 M 中机组的模式 3 互补频率。同样由于时间较短, 机组的扭振保护未动作。11:50—11:55, 次同步电流频率长时间在电厂 M 中机组模式 3 互补频率附近驻留(驻留时间约为 360s), 激发出机组的轴系扭振, 导致机组(#2、#1、#3)相继扭振保护动作跳机。

1.2 河北沽源地区双馈风电机群-串补输电系统的次同步谐振

沽源风电场位于我国河北省西北部地区, 电网示意图如图 4。截至 2014 年 12 月, 24 座风电场以辐射状接入沽源、察北、义缘、白龙山 220kV 变电站。然后功率通过 2 条 500kV 同塔双回串补线路送出。沽源风电场共安装了双馈风力发电机、永磁直驱风机和绕线式感应发电机 3 种风力发电机。风电场总装机容量为 3426.55MW, 3 种风机总容量分别占

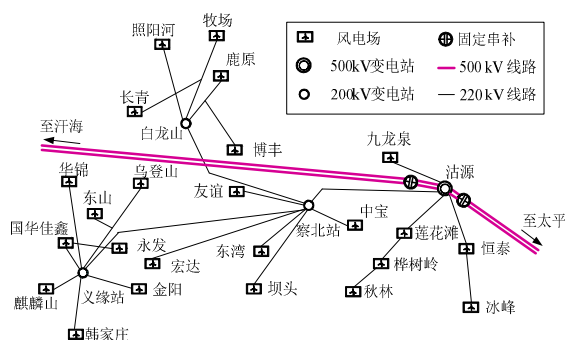


图4 沽源风电场电网拓扑图

Fig. 4 Topology map of Guyuan wind farm

82.8%, 15.4%和 1.8%。因此, 沽源风电场主要由双馈风机组成。

自 2010 年串补开始投入使用, 风电场就开始检测到不正常的电气振荡现象。由于当时振荡极少发生, 而且对正常运行没有明显影响, 因此振荡起初并未受到足够的重视。但是, 随着越来越多的风电场接入该地区, 次同步谐振现象开始频繁发生。从 2012 年底到 2013 年底, 发生了多达 58 次振荡事件。频繁的振荡现象严重影响了系统的安全运行, 直接后果就是, 次同步谐振事件中由于功率发散引起上千台次风机的脱网, 导致风电场的功率骤减。同时, 次同步谐振产生的大量谐波引起变压器不正常振动和噪声, 危及电力设备安全。

如图 5 所示, 以 2013 年 3 月 19 日振荡事件为例。根据沽源变电站升压变压器的记录显示, 起初风电场的功率较低, 只有总容量的 13%, 功率从 14:12:15 开始发散振荡, 之后幅值迅速增加, 到 14:12:48, 振荡功率幅值大约增长了平均值的 25%。大量风机由于谐波过高开始脱网。随着并网风机数量逐渐减少, 平均功率也逐渐降低。直到 14:14:03, 由于一套串补退出运行, 振荡才逐渐停止。此次振荡持续了 108 s, 功率从 219.5MW 降至 74.5MW, 损失了 66% 的功率。

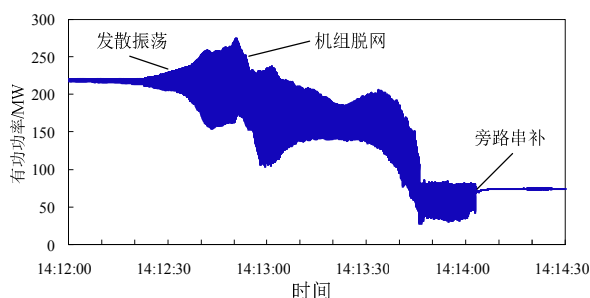


图5 某风电场功率(河北沽源地区)

Fig. 5 Power flow in a wind farm (in Guyuan, Hebei Province)

1.3 新能源并网次/超同步谐振/振荡的主要特点

上述新能源并网次同步谐振/振荡现象的共同点是, 机理上涉及多变流器间及其与大电网之间的

动态相互作用, 由于电力电子变流器具有快速响应特性, 引起的振荡频率高于传统低频振荡(0.1~2.5Hz), 低于电网整数倍高次谐波; 振荡特性(频率、阻尼及稳定性)受多变流器(群)聚合效应以及电网诸多参数、乃至风光等外部条件的影响, 具有影响因素复杂、大范围时变等特征; 受变流器及其元件的容量限制, 极易进入控制限幅, 导致振荡往往始于小信号负阻尼失稳, 而终于非线性持续振荡。这不仅与传统机电低频振荡有明显不同, 也跟传统由汽轮机轴系参与的次同步谐振/振荡有本质区别。

这种多变流器-电网间相互作用引发的新型次同步振荡, 对系统形成次同步谐波源, 谐波能量注入系统, 可引起电压、电流大幅波动, 引起变流器等电力设备过压、过流保护动作, 也可引起变压器振动、电容器损坏等, 当周边有常规机组时, 还可能引起机组轴系扭振, 严重威胁现代电网的设备安全、系统稳定和用电质量, 在我国已成为影响风光等新能源大规模接入和消纳的现实问题。

1.4 振荡机理分析

新能源并网振荡是近年来出现的新问题, 国内外研究总体还处在探索阶段。关于双馈风机并网稳定性问题, 从美国德州和冀北沽源陆续发生振荡事件后, 得到了学术界的广泛重视, 取得了系列研究成果^[4-5, 11-13]。而直驱风机并网的振荡稳定性鲜有报道, 新疆哈密“7.1”事件是世界范围内首次见诸报道的直驱风机引起的次同步振荡事件, 也是迄今为止唯一一起风电并网振荡引起火电机组扭振跳闸事件。本文主要针对哈密“7.1”事件, 研究新能源并网稳定性问题。“7.1”事件暴露出新能源并网不仅存在次同步振荡风险, 而且振荡传播范围广, 影响广大常规机组的安全运行。全国有 1.4 亿 kW 风机, 如果发生次同步振荡, 按照“7.1”事件中振荡源和火电跳闸地点之间 300 km 距离简单推算, 将有 2 亿~3 亿 kW 火电机组受到振荡的威胁。事件发生后, 国调中心高度重视, 组织国内高校、科研院所和风机制造厂家, 从机理分析、监测预警、安全控制、抑制措施等方面进行了技术攻关, 已经取得初步进展, 但也面临诸多挑战。

电力电子变流器具有很强的非线性, 控制环节也较为复杂, 如图 6 所示, 需要考虑有功、无功、电压、电流以及锁相环(phase locked loop, PLL)等控制的共同作用^[4-24]。目前, 对于电力电子变流器并网稳定问题的理论分析主要沿用线性系统理论, 在运行点做小干扰分析, 采用线性系统稳定判据及

振时, 激发电机组轴系大幅扭振, 如图9所示。

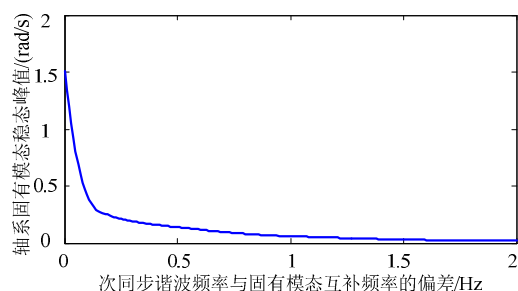


图9 次同步谐波频率与汽轮机组轴系扭振振幅的关系
Fig. 9 Relationship between sub-synchronous harmonics frequency and shaft vibration amplitude

综上, 风机次同步振荡及其引发火电机组跳闸的基本原理已经明确。由于实际系统远比理论研究工况复杂, 进一步如多机群间相互作用的振荡机理等还在继续深入研究。

2 新能源并网次同步振荡问题工程解决方案

2.1 次同步振荡监测与控制系统

机理分析表明, 风机在弱交流系统中, 其控制性能可能恶化, 当并网台数、出力等满足一定条件时, 风机存在振荡风险。“7.1”事件后, 国调中心组织在哈密地区进行了大量现场试验, 试图重现振荡现象。试验过程中次同步振荡多次发生, 但由于与风机并网台数、出力、机端电压等多个时变的因素相关, 振荡呈现出很强的随机性, 并不存在一个振荡发生的典型工况, 使得类似 PSS 等传统主动阻尼控制解决方案面临巨大困难。经过多方研究, 为尽快解决哈密地区风电并网发电问题, 在继续加强理论研究的同时, 采取了工程上“源头治理”的实用方案, 直接针对振荡的风机采取措施。

首先, 是对现有系统进行升级, 建立针对风机次同步振荡的监测与控制系统。“测”是“控”的基础, 现有电网运行监控系统中, 如 SCADA 和 WAMS, 主要侧重于潮流、电压等工频相量信息, 采样率低。如现有 PMU/WAMS 的上传速率为 50/100 Hz, 虽然通过信号分析技术可从基波相量信息中提取次同步频率信息, 但由于采样率低, 得到的次同步谐波频率、幅值信息并不准确, 仅能用于次同步振荡的在线预警, 无法对次/超同步振荡实施精确广域监测, 为解决这一问题, 构建次/超同步广域动态监测系统: 即利用 PMU 本地高精度(1200Hz)采样, 同时开发长周期存储和远程传送功能, 对次同步谐波进行高精度录波和离线提取。

目前, 次同步监测系统已在新疆哈密地区以及国调、新疆调度中心部署完成, 覆盖了“7.1”次同步振荡事件中谐波能量传播的关键路径和节点。

“7.1”事件后, 哈密地区又发生过数十次小范围振荡, 监测系统均有效预警和记录了次同步振荡现象。

其次, 在加强监测的同时, 建立了次同步振荡安全自动控制系统。哈密地区风机是次同步振荡源, 且风机并网规模越大, 振荡风险越高。新部署的哈密地区次同步振荡安全自动控制系统, 能够在线监测关键节点次同步振荡信号, 当次同步振荡幅值和持续时间达到一定值时, 分轮次切除哈密地区并网风机, 有效防止持续次同步振荡引发火电机组轴系扭振并脱网, 影响电网安全稳定运行。截至 2015 年底, 次同步安控系统正确动作 8 次, 次同步振荡在切除风机后均得以平息, 如图 10 所示, 保证了后续没有再发生火电机组跳闸的情况。

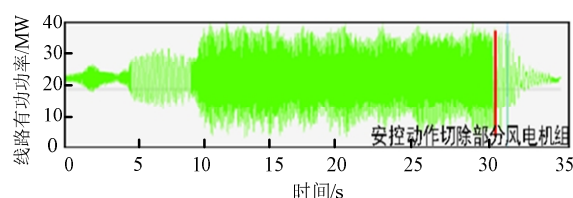


图10 安控系统动作前后振荡曲线
Fig. 10 Oscillation curves before and after SSO security system action

2.2 优化风机控制器参数

风机引发的振荡稳定性问题是电力系统中出现的新问题, 在“7.1”事件之前, 这个问题没有得到充分认识, 风机参数设计通常以强交流系统作为标准运行工况, 以工频段运行性能作为主要优化目标, 导致现有风机控制参数对弱电网工况的适应性不足, 是风机在次同步频段呈弱阻尼进而引发振荡的根本原因。尤其与欧美等国家不同的是, 我国新能源大多远离负荷中心, 分布在地广人稀的西部、北部地区, 容易形成新能源经过弱系统集中接入的情况, 因此发生次同步振荡的风险远高于其他国家。研究表明, 风机控制器参数是影响其并网振荡稳定性的重要因素。充分挖掘风机自身潜力, 改善风机阻抗特性, 使其在弱交流系统下具备稳定运行能力, 是解决次同步振荡问题的根本措施。

从 2016 年初开始, 国调中心联合科研院所和风机厂家, 着手优化出了几套控制器参数, 在实际系统中进行测试后开始推广应用, 已经取得良好效果。在风机参数整改后, 新疆哈密地区监测到的次同步振荡次数整体呈下降趋势。

针对其他广大风电机组的潜在次同步振荡风险, 国调中心组织对风电规模、类型、接入系统强度、风电运行等情况进行排查, 同时要求各调度机

构、风机运行单位密切监视风机运行,一旦发现振荡问题,借鉴解决新疆哈密振荡问题的经验,采用类似的工程解决方案,防止对电网产生进一步的影响。截至目前,还未发现大面积振荡并影响火电机组运行的情况。

3 面临的挑战和下一步研究方向

3.1 面临的挑战

次同步振荡研究工作面临的挑战,首先是新能源机群的聚合等值问题,实际系统中成百上千台风机经不同阻抗接入系统,并且混杂多种风机类型和动态无功补偿装置,建模分析十分困难。其次,变流器本身的强非线性,使得其频率特性随不同工况变化较为敏感,不易进行准确的测量。对实际系统进行电磁暂态仿真计算,更是面临维数灾的问题,难以完整和准确地复现振荡情况。从国内外已有研究成果来看,现有方法均有其局限性:

1) 研究对象大多针对单一或数个变流器开展,聚焦于变流器自身的控制稳定性,偏重百千 Hz 级的谐波动态,较少考虑多变流器之间及其与复杂交直流混合电网之间的次同步频率相互作用与稳定性。

2) 分析方法上,传统的特征值分析或阻抗分析,当扩展到实际包括数千台逆变器和数万个节点的大电网系统时,都面临难以克服的等值难题和维数灾问题。

3) 控制技术上,偏重于变流器自身稳定的个体化、局部性的控制目标和方法,尚不足以解决多变流器-大电网相互作用引发的系统级次同步振荡问题。

3.2 理论研究方面

随着新能源和柔性交直流输电设备的大量应用,电力电子设备高比例渗透电力系统是未来发展的必然趋势。理论方面迫切需要加强研究,创新提出理论和方法,分析这种趋势给电力系统运行带来的影响,加深对问题的认识和理解。需要重点关注的研究方向包括但不限于:

1) 巨量电力电子设备及其与电网相互作用机理和研究方法,进一步深入剖析次/超同步振荡机理、影响因素和参与因子。

2) 新能源聚合等值建模及仿真方法,解决次/超同步振荡仿真分析面临的维数灾问题。

3) 次/超同步振荡在电网中的传播理论,常规机组、直流以及其他电网元件的次/超同步频率响应特性及建模分析方法。

4) 计及电力电子非线性特性的建模分析方法,揭示强非线性对振荡特性的影响。

5) 风机侧、风电场侧(含静止无功补偿装置)、电网侧次/超同步振荡阻尼控制技术。

3.3 工程技术方面

工程上以解决问题为导向,由于新能源机群相互影响机理复杂,必须寻求解耦和简化的解决方案。基于在沽源、新疆次同步振荡问题上的工程实践,下一步将重点关注以下研发方向:

1) 风机侧。研究风机次/超同步频率段阻抗特性实测方法,研究合理的阻抗特性范围,指导风机控制器参数设计。通过实测建模、参数优化等一系列标准化要求,确保风机性能,保证风机在一定的系统条件下,在保证自身稳定的前提下,改善其接入弱电网运行的动态性能。

2) 风电场侧。风电场侧通常加装有动态无功补偿装置(SVC 或 SVG),具有快速响应特性,如参数配置不当,可能恶化次同步振荡。研究表明,通过在动态无功补偿装置上附加次同步振荡阻尼控制,能够产生抑制作用。同时,风机或风电场侧可研究加装专门针对次同步振荡的保护,当检测到自身振荡时从电网中切除,防止振荡进一步放大和扩散。

3) 电网侧。从原理来看,风机次同步振荡内因是自身阻抗特性差、控制参数不合理,外因是与电网电气联系弱、短路容量低。加强风机并网系统强度,必然有利于减少次同步振荡风险。但由于我国风能资源丰富地区大多远离负荷中心,电网较为薄弱,加强风电场接入系统强度的代价高昂,会直接转化为风电电价成本,影响风电在电力市场中的竞争力。下一步,将在风电场接入系统设计和运行阶段,开发基于阻抗分析方法的大规模风机并网次同步振荡风险分析工具,开展新能源并网振荡稳定性仿真计算,排查次/超同步振荡风险,指导新能源接入规模,避免超出正常风机性能的极弱系统条件和高风险运行方式。

4) 运行层面。建立风电场次同步振荡广域监控系统,实现实时监测和预警。研发在单机及风电场侧加装次同步振荡保护装置,在高风险地区部署次同步振荡安控装置,在高风险火电机组侧配备必要的扭振保护,控制次同步振荡影响范围。

通过工程解决方案,目前新疆地区次同步振荡问题得到有效控制。下一步,将结合实践经验,进一步加强研究,制定标准化、流程化解决方案,从风机研制、规划设计、调度运行、紧急控制各层面层层把关,有效控制次同步振荡风险。

4 结语

能源结构优化和转型升级是我国国家战略,加快发展新能源是能源电力发展的必然趋势。大规模、高比例新能源并网对传统电力系统结构和特性的影响必须引起高度重视,新疆、沽源风电次同步振荡事件已经显露冰山一角,展现出了新的振荡稳定性概念、机理、形式和影响方式。面对新形势和新问题,本文在总结运行实践经验基础上,做进一步的深入思考,希望抛砖引玉,引起广大电力专家、学者们关注,共同研究提出新的理论、方法和技术,解决大规模新能源运行的世界级难题。

参考文献

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
Li Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991(in Chinese).
- [2] 贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1839-1844.
He Jingbo, Zhuang Wei, Xu Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844(in Chinese).
- [3] 贺静波, 万磊, 霍超, 等. 高压直流输电非典型工况下过电压异常风险分析[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3459-3463.
He Jingbo, Wan Lei, Huo Chao, et al. Abnormal over-voltage risk analysis of HVDC transmission on atypical conditions[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3459-3463(in Chinese).
- [4] 董晓亮, 谢小荣, 杨煜, 等. 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[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 189-193.
Dong Xiaoliang, Xie Xiaorong, Yang Yu, et al. Impacting factors and stable area analysis of subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to series-compensated power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 189-193(in Chinese).
- [5] 胡应宏, 邓春, 谢小荣, 等. 双馈风机-串补输电系统次同步谐振的附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1169-1173.
Hu Yinghong, Deng Chun, Xie Xiaorong, et al. Additional damping control of DFIG series compensated transmission system under sub-synchronous resonance[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1169-1173(in Chinese).
- [6] 张鹏, 毕天姝, 贺静波. 基于模态电流注入方法抑制次同步谐振的阻尼控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6011-6017.
Zhang Peng, Bi Tianshu, He Jingbo. Damping controlling scheme in ssr mitigation based on modal current injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6011-6017(in Chinese).
- [7] Zhao M, Yuan X, Hu J, et al. Voltage dynamics of current control time scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(4): 1-13.
- [8] 何湘宁, 宗升, 吴建德, 等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5162-5170.
He Xiangning, Zong Sheng, Wu Jiande, et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5162-5170(in Chinese).
- [9] Adams J, Pappu V A, Dixit A. ERCOT experience screening for Sub-Synchronous Control Interaction in the vicinity of series capacitor banks[C]/IEEE PES General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2012: 1-5.
- [10] 毕天姝, 孔永乐, 肖仕武, 等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 10-15.
Bi Tianshu, Kong Yongle, Xiao Shiwu, et al. Review of sub-synchronous oscillation with large-scale wind power transmission [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 10-15(in Chinese).
- [11] Wang L, Xie X, Jiang Q, 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.
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [14] Liu Z, Liu J, Bao W, et al. Infinity-norm of impedance-based stability criterion for three-phase AC distributed power systems with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3030-3043.
- [15] Wen B, Boroyevich D, Burgos R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [16] 许津铭, 谢少军, 张斌峰. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153-4166.
Xu Jinming, Xie Shaojun, Zhang Binfeng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4153-4166(in Chinese).
- [17] 陈新, 张旸, 王赞程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4559-4567.
Chen Xin, Zhang Yang, Wang Yuncheng. A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4559-4567(in Chinese).
- [18] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.
Xu Dezhi, Wang Fei, Mao Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71(in Chinese).
- [19] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16.
Xie Ning, Luo An, Ma Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16(in Chinese).

- [20] van der Meer A, Gibescu M, van der Meijden M, et al. Advanced hybrid transient stability and EMT simulation for VSC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1057-1066.
- [21] Kunjumammed L, Pal B, Oates C, et al. Electrical oscillations in wind farm systems: analysis and insight based on detailed modeling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 51-62.
- [22] Cespedes M, Sun J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [23] Hamefars L, Bongiorno M, Lundberg S. In-put-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [24] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
- Wu Heng, RuanXinbo, Yang Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in

weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268(in Chinese).



李明节

收稿日期: 2016-11-30。

作者简介:

李明节(1963), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制、新能源运行管理、电网运行管理等方面研究工作, E-mail: li-mingjie@sgcc.com.cn;

于钊(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制等方面研究工作;

许涛(1976), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制等方面研究工作;

贺静波(1983), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制等方面研究工作。

(责任编辑 李兰欣)