DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.006

英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考

樊陈[1]，姚建国[1]，张琦兵[2]，徐春雷[2]，任辉[1]，窦仁晖[1]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，江苏 南京 210003；
2. 国网江苏省电力有限公司，江苏 南京 210024）

摘　要：2019 年 8 月 9 日，英国电网发生大停电事故，造成英国伦敦在内的部分城市停电，影响人口 100 万左右。文中对该事故进行总结分析，为我国电网的安全稳定运行提供借鉴和参考。首先，对此次新能源电厂发生的振荡事件进行分析，总结此次振荡事件所呈现的典型特征，梳理其存在的遗留问题；其次，对以该事件为代表的一系列由新能源厂站触发的振荡事件进行思考，论述新能源大规模并网后电网振荡呈现的新特点；最后，针对现有测量技术在振荡监测上存在的不足，提出采用宽频测量技术实现振荡实时监测，并给出具体的工程实施方案，为电力电子化电网振荡的实时监测提供参考。

关键词：大停电；电网振荡；实时监测；电力电子化电网；宽频测量
中图分类号：TM712　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2096-3203(2020)04-0034-08

0　引言

2019 年 8 月 9 日 16 时 52 分，英国发生大停电事件，约 100 万人受到停电影响。这是自 2003 年“伦敦大停电”以来，英国发生的规模最大、影响人口最多的停电事故。

应英国能源监管机构（Office of Gas and Electricity Markets，OFGEM）要求，英国电网运行商（electricity system operator，ESO）于 2019 年 8 月 16 日发布了事故调查的临时报告，对整个事件从电网角度进行了初步的分析[1]。2019 年 9 月 6 日，ESO 发布了最终的调查报告，该报告在临时报告的基础上增加了事故原因的总结和反思，以及今后应对此类事件的经验，同时汇总了整个事故中所有涉及企业的分析报告，包括风电厂、发电厂、医院、铁路等，作为附录一并发布[2—3]。

英国“8·9”停电事件的整个过程，文献[4—5]分别从频率稳定控制和对我国电网安全运行分析的角度进行了分析论述，但对此次大停电事件中的振荡过程缺乏详细的分析和讨论，而新能源电厂因振荡引发的风机脱网以及引起的连锁反应是此次大停电事件的一个突出特点。因此，文中在对英国大停电事故进行总结分析的基础上，重点对事件中的振荡过程进行了详细讨论，同时针对未来电力电子化电网的宽频振荡问题，提出了电网振荡实时监测的思路及其工程部署实施方案，为我国新能源大规模接入下电网的安全稳定运行监测和控制提供参考。

收稿日期：2020-01-19；修回日期：2020-02-23
基金项目：国家电网有限公司科技项目（5108-202055023A-0-0-00）

1　事故简介

综合文献[1—5]的分析可知，英国“8·9”大停电是由低频减载（low frequency demand disconnection，LFDD）所致，整个事件共损失功率 1 878 MW。LFDD 动作符合事前设定，是正确的动作行为，避免了事故的进一步扩大，有效保障了英国电网的主体安全。整个事故造成了机场、火车站、医院等企业停电，由于停电发生在周五下班时间，机场、火车站的停电导致了旅客大量滞留。即使在停电恢复后，受影响的 100 多列火车由于自身原因，有一半无法远程启动，需要人工前往现场恢复，进而导致了事故影响时间延长。事故中这些受影响的机场、车站等都在 LFDD 所需切除的负荷范围内，停电符合其安全稳定设置要求。事故后，英国 ESO 已提交申请对低频减载相关设置进行调整，优先确保机场、火车站等重要负荷的用电保障。

从整个事件过程来看，雷击线路故障切除后，分布式能源因相量偏移保护动作损失 150 MW；之后引起风电厂并网点的振荡并导致霍恩（Hornsea）风电厂脱网 737 MW；接着小巴福德（Little Barford）电厂切机 244 MW，引起频率快速跌落，导致大量分布式电源因频率变化率保护动作而损失 350 MW；最后小巴福德电厂又先后损失 210 MW，187 MW。整个停电事件功率总计损失 1 878 MW，其中仅霍恩风电厂和小巴福德电厂总计损失功率 1 387 MW，具体功率损失如图 1 所示。

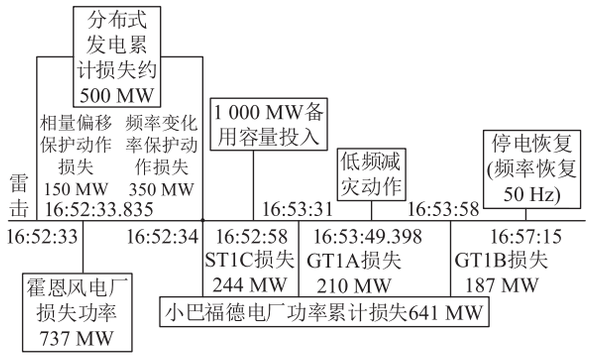


图 1 英国大停电功率损失时序

Fig.1 Time sequence of UK power loss of blackout

由图 1 可知,主要功率损失分为 3 个方面:霍恩风电厂损失 737 MW、小巴福德电厂损失 641 MW 和分布式能源累计损失 500 MW。其中损失功率最大的是霍恩风电厂,对整个大停电在一定程度上有决定性影响。小巴福德电厂在整个事故中有 3 次功率损失,第 1 次机组跳闸是由于 ST1C 机组三相信号测速不一致,损失 244 MW;第 2 次由于 GT1A 机组压力过大而跳闸,损失 210 MW,而此时电网正启动后备资源进行频率恢复,且频率正在逐步回升,也正是此次的功率损失导致了最后频率恢复的失败,最终引起了 LFDD 动作;第 3 次是 LFDD 动作后,在系统逐步恢复到 50 Hz 的过程中,小巴福德 GT1B 机组因压力过大长时间告警被人工切机,损失功率 187 MW,这一功率损失发生在停电事故之后。

2 霍恩风电厂振荡分析

从整个调研报告来看,霍恩风电厂的功率损失对整个停电的影响最大,而且完全出乎意料,文中重点针对风电厂的振荡问题进行分析。

2.1 振荡事件过程

霍恩海上风电厂的装机容量为 1.2 GW,由 174 台 7 MW 的风机组成,分成 Hornsea 1A、Hornsea 1B、Hornsea 1C 3 部分,每部分均有 400 MW 规模,通过各自的海上交流汇集变电站、海上无功补偿站接入陆地高压变电站。在大停电发生前,风电厂实际出力 799 MW。

振荡的起因是雷击导致线路单相接地故障,雷击的准确时间文献[1—3]均未明确给出,但从保护装置的记录看,16:52:33.490 发生故障,74 ms 后(16:52:33.564)故障切除,故障切除后的 271 ms(16:52:33.835),霍恩风电厂出力从 799 MW 下降到 62 MW,Hornsea 1B 和 Hornsea 1C 出力均降为 0,仅 Hornsea 1A 仍保持出力 62 MW,如图 2 所示。同时风电厂风机系统的电压也从 34 kV 跌落到 20 kV,引起风机 690 V 系统过电流保护动作,导致风机大规模脱网,如图 3 所示。

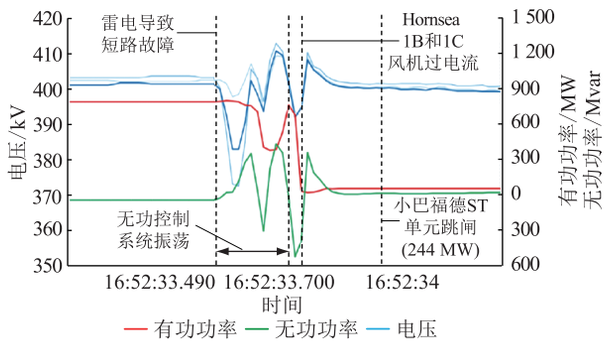


图 2 霍恩风电厂并网点电压和有功及无功

Fig.2 Connection point voltage, active power and reactive power of Hornsea wind power grid

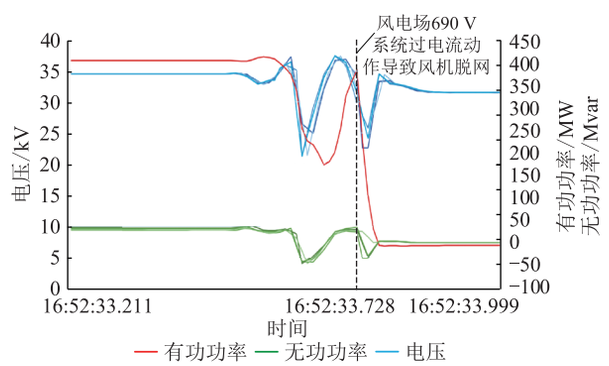


图 3 霍恩风电厂风机系统电压和有功及无功

Fig.3 The profile of Hornsea1B wind turbine voltage, active power and reactive power

根据整个振荡持续时间可知,风电厂并网点的电压无功控制系统在遭受雷击后就开始启动,从 16:52:33.490 开始,呈现了近似 2 个周期的振荡,16:52:33.700(持续 210 ms)后,风机过流保护动作。从 16:52:33.728 跳闸到 16:52:33.835,所有机组全部脱网(持续时间 107 ms),有功功率从 799 MW 跌落至 62 MW。从振荡情况分析,无功功率系统振荡持续约 2 个周期,整个持续时间约 210 ms,单个振荡周期约 105 ms,振荡频率约 10 Hz。

2.2 振荡事件分析

从英国 ESO 最终发布的调查报告及整个电网的仿真分析可知,即使在 1 000 MW 功率缺失的情况下,整个电网仍能够稳定运行,且风电厂的所有控制系统参数都符合其安全稳定计算原则。对于此次遭受雷击后引起的振荡导致风机大规模脱网的原因,霍恩风电厂运营商 Orsted 总结为在次同步振荡频率范围内阻尼不足,即在遭受雷击后,风电并网点成为了弱电网,进而引起无功控制系统振荡,导致并网处电压波动,使得风电厂汇集站的电压跌落过大,触发了过电流保护动作,引发风机大

规模脱网。

虽然此次振荡的频率为 10 Hz 左右，属于次/超同步振荡频率范畴，但此次振荡与国内外大量次/超同步振荡存在显著差异，具体如下：

（1）振荡出现显著的电压波动。国内外目前所遇到的次/超同步振荡主要特征是功率出现振荡，由于电压都是测量的母线电压，因此幅值并没有明显波动。而此次振荡发生时电压出现了较大幅度的波动（最大波动从 400 kV 跌落到 370 kV，波动幅度接近 7.5%），这与当前大量出现的次/超同步振荡的共性特征存在差异。

（2）振荡持续时间较短。次/超同步振荡从起振到传播、持续振荡，其持续的时间一般较长，从几十秒到几分钟，甚至几小时不等。但此次振荡仅持续 100 ms 左右，最终是风机的过电流保护切除了故障。国内外已经出现的次/超同步振荡绝大多数未引起继电保护动作，即使引起了保护动作，振荡也是持续了相对较长的时间（几十秒以上甚至更长），如新疆 2015 年振荡事件从振荡告警到保护动作持续了 100 s 以上。而此次 100 ms 的振荡时间极短，国内外也未见如此短时间振荡的相关报道。

（3）振荡频率与故障切除无关。以 2015 年新疆电网的振荡为例，该振荡导致几百公里以外火电机组跳闸，原因在于其振荡频率与发电机组的固有振荡频率耦合，引起了机组保护跳闸。虽然该故障最终也是起于振荡、终于继电保护动作，但其关键原因仍在于振荡的频率本身，即与机组固有振荡频率耦合。但英国此次事故与振荡频率无关，是振荡引起的电压波动导致了过电流保护动作。

另外，对于此次振荡类型的划分，行业内也存在不同观点。此次振荡的频率约 10 Hz，应属于次同步振荡范畴。但行业内也有专家认为，此次振荡过程，无功与电压同向，无功调节方向与电压变化方向完全一致，属于正反馈，起到助增电压变化（增幅）的效果，具有低频振动特征，且振荡频率略高于传统低频振动频率（0.1～2.5 Hz），鉴于风电机组惯性较同步机小，因此可以确定风电场对系统发生了低频振荡，且振荡频率在 10 Hz 左右，低频振荡的范围需重新界定[6]。这与当前次/超同步振荡频率的认知存在明显差别。而英国官方也并未明确此次振荡就是次同步振荡，仅在最终报告中陈述振荡频率属于次同步振荡范畴，这无疑使得此次风电厂振荡事件显得更加不同，呈现非常规振荡的特点。

无论此次振荡属于低频振荡还是次同步振荡，结合次同步振荡频率范围内所发生的振荡事件来看，国内外振荡（次/超同步振荡）导致的危害和事故往往起于振荡、终于继电保护。英国大停电的振荡事件和 2015 年新疆振荡事件，其共性特征是振荡导致继电保护动作，最终对电网产生了严重影响。而现阶段，这一结论都是事故后分析所得，缺乏电网振荡实时监测及录波数据，导致事后分析困难。尤其是电网电力电子化发展后，大量电力电子设备应用对电网产生了各类宽频域的振荡，行业内对振荡产生、传播的机理仍缺乏深入研究。因此，迫切需要通过对新出现的各类宽频振荡及今后可以预期的大量振荡事件进行实时监测，以保障电网的运行安全，同时增强对未来电力电子化电网特性的认知，以应对未来电网发展的挑战。

2.3 振荡事件分析遗留问题

英国此次振荡事件由于缺乏实时监测数据，尤其是振荡前后录波数据，严重影响了振荡的后续分析。英国官方发布的报告中涉及的有限测量数据在一定程度上限制了事故分析的进一步深入，亦使得一些疑问难以得到充分的解释，具体如下：

（1）部分风机未脱网问题。Hornsea 1B 和 Hornsea 1C 所有风机脱网，风电出力降为 0，但 Hornsea 1A 还保留 62 MW 出力，对此问题最终调查报告中并未说明。

（2）霍恩风电厂振荡原因。英国电网海上风电厂较多，且夏季雷击也十分频繁，类似霍恩风电厂的并网点很多，为何此次仅霍恩风电厂出现了振荡。英国官方报告仅说线路雷击故障后霍恩风电厂成为弱电网故而引起振荡，由于缺乏具体的数据分析，未能揭示导致振荡的深层原因。

（3）振荡及扰动问题。霍恩风电厂大规模切机是在保护切除故障后 271 ms 发生的，振荡持续了 100 ms，也可说明振荡是在保护切除后的 171 ms 左右开始的。是否保护动作引起了相关扰动并传播至霍恩风电厂进而引起振荡，报告中并未说明。这一扰动具体的影响过程如何，最终如何传导到霍恩风电厂，报告中并未明确。

由此可见，由于振荡实时监测数据的缺失，此次振荡产生的深层原因未能揭示，如果再次发生此类事故，霍恩风电厂的振荡事件是否再次出现仍未可知（即使事故后风机厂商修改了参数）。英国境内其他大量海上风电是否也会出现此类振荡问题也难以明确，这些都给电网的安全稳定运行带来了隐患，迫切需要新的技术手段来支撑振荡的监测，以便进一步认知此类振荡的特性，制定清晰明确的应对策略以保障电网的安全稳定运行。

3 电网振荡事件的思考

从整个调查报告来看,霍恩风电厂运营商 Orsted 和英国电网运营商 ESO 都是通过实时测量数据来开展此次振荡分析,并无详细的录波数据,使得此次振荡难以作进一步的分析,这也引起行业的思考。随着大量新能源的并网接入,电网发生的振荡事件也日益增多,而英国的事件也仅仅是较为严重的振荡事件之一,对此类事件的共性特征进行归纳如下。

3.1 新型振荡日益频繁

低频振荡的相关危害已有广泛研究,但对于次/超同步振荡,早期主要关注火电机组本身,防止次/超同步振荡引起大轴的损害,因此在发电厂都配置了次同步振荡保护的继电器,保障发电机组的安全。无论是低频振荡、次同步振荡,他们都有大型同步发电机组参与,这类振荡可以统一归纳为传统振荡。随着新能源大规模并网,尤其是“源-网-荷”环节电力电子设备的大量接入,使得电力电子设备之间、电力电子设备与电网之间出现电气谐振,这类振荡不涉及发电机组的机械元件,称之为新型振荡[7—9]。

早期发现无功补偿装置等会引起电网的次同步振荡,对于新能源集中接入的区域电网,虽早期也发现了次同步振荡,如河北沽源地区 6~8 Hz 的次同步振荡等,但由于未引起相关故障,故未引起行业重视[10]。2013 年,宁夏吴忠直驱风电场发生 95 Hz 超同步振荡;2015 年新疆阿拉光伏站出现 30 Hz次同步振荡;同年,西北电网大规模风电/光伏汇集区域发现 10 Hz,20 Hz,30 Hz,40 Hz,60 Hz,70 Hz,80 Hz,90 Hz,110 Hz 等大量次/超同步频率分量,并在新能源场站内部 35 kV,330 kV,750 kV 等 5 个电压等级电网中传播,最终导致 300 多 km 外特高压天中直流送端 3 台 660 MW 发电机因轴系次同步扭振动作跳闸,整个西北电网频率降低至 49.91 Hz,严重威胁系统安全运行[7]。

随着风电、光伏等新能源的大规模接入,电网中电力电子设备数量日益增加,电网振荡更加频繁,振荡导致的危害和影响也日益增加,不仅影响电网的运行安全,也严重制约风电、光伏等可再生能源的有效消纳,亟需对这类新型振荡进行监测与控制,在促进新能源并网消纳的同时保障电网的安全稳定运行。

3.2 电网振荡呈现宽频特性

目前,大规模风电、光伏接入弱电网,容易引起次/超同步振荡事件,而变流式恒功率负载的负电阻特性、多变流器的锁相环回路耦合、变流器控制参与电网侧串/并联谐振,以及静止同步补偿器(static synchronous compensator,STATCOM)、基于电压源变换器的高压直流输电(voltage source converter-high voltage direct current transmission,VSC-HVDC)与弱交流电网的相互作用,会激发频率从数赫兹到千赫兹以上的宽频振荡[8]。由于电力电子装置的快速响应特性,除传统同步电网以工频为基础的功率稳定、低频振荡等问题之外,还产生了中频带(5~300 Hz)的涉网稳定新问题,电网的振荡从低频逐步向中、高频发展[11—13]。

从当前电网的实际情况来看,振荡不仅会在风电、光伏等可再生能源接入弱电网时产生,对于有高压直流工程的强电网,也会产生振荡,且呈现宽频特征。如变压器空投引起的励磁涌流导致换流站功率波动、高压直流站出现高次谐波振荡等。2014 年,德国北海海上风电场发生 250~350 Hz 振荡;2017 年,鲁西柔性直流发生 1 200 Hz 谐波振荡[8];2019 年初,渝鄂柔直调试期间发生 1 800 Hz 高频振荡,这些都使得电网的振荡逐步向宽频段发展。

随着新能源大规模接入及高压直流输电工程的建设投运,电网结构及特性日益复杂,而现有监测手段的缺乏往往导致事后故障分析和定位困难。一系列高压直流站的安全稳定装置在现场录波文件发现了 24 次,36 次等高次谐波振荡。由于振荡实时监测功能的缺失,这些高次谐波振荡难以定位源头,也无法明确振荡原因,给电网的安全稳定运行带来了隐患。

3.3 振荡仿真分析预测难度较大

大量电力电子设备在电网应用的量变导致电网特性发生了质变,电网逐步呈现电力电子化特征。对于电力电子化电网的特性研究基础性认识不足,目前都是被动地以现场事故为驱动,缺乏前瞻性和系统性[14]。由于电力电子变流器具有时变拓扑特性、强非线性,使得电力电子化电网的结构非常复杂,具有多时间尺度特征,加大了振荡仿真分析的难度[15]。

另外,当前电网仿真技术对于多振荡源仿真缺乏有效手段,导致现阶段对于次/超同步振荡难以准确提前发现。尤其是大量电力电子设备接入后,电力电子设备之间、电力电子设备与电网之间都存在电气振荡的可能,仅依靠电网仿真分析难以准确发现实际工程中所出现的振荡问题。虽然经过事

后的仿真可以在线模拟一部分振荡事件，但往往难以准确仿真并预测下一次振荡可能发生的地点，使得现有仿真分析处于较为被动的状态。

为此，在理论计算和仿真分析还难以有效指导电力电子化电网安全运行的情况下，经其他手段来实现电网振荡的监测、抑制和预防，以应对日益频繁的各类宽频、非常规振荡，显得十分必要和迫切。

4 振荡实时监测手段思考

4.1 WAMS 在线监测的不足

广域测量系统（wide area measurement system，WAMS）具有低频振荡监测功能，对超低频振荡也有较好的监测效果，文献[16—21]基于 WAMS 开展了次/超同步振荡在线监测方法的研究，验证了其技术上的可行性。国家电力调度控制中心早期也希望通过对 WAMS 升级来实现电网次/超同步振荡的监测，但在实际应用中存在以下问题：

（1）振荡无法实时监测。相量测量单元（phasor measurement unit，PMU）不具有宽频振荡的实时监测功能，所有的振荡监测都依赖于 WAMS 主站进行。由于低频振荡的频率较低，振荡持续的时间相对较长，因此在主站进行振荡监测虽然不具有实时性，但是相对低频振荡的较长振荡周期，在主站分析也完全满足实际应用需求。随着电网振荡从低频向高频发展，振荡周期逐步变短，如果仍然依赖主站分析，不仅难以满足振荡实时监测的需求，而且额外增加了主站的分析工作。

（2）振荡监测范围受限。国内外 WAMS 目前较为成熟的应用是低频和超低频振荡监测。但随着大规模风电、光伏并网，以及高压直流输电技术的应用，次/超同步振荡日益频繁，PMU 限于最大 100 帧/s 的传输速率，WAMS 主站只能分析 50 Hz 以下次同步振荡，无法实现 50~100 Hz 的超同步振荡、100~300 Hz 的宽频振荡乃至高次谐波振荡的实时监测。

（3）缺乏振荡前后的实时录波功能。PMU 装置仅能存储动态测量数据，无法实现振荡前后的准确录波。

由于振荡持续的时间各有不同，对于英国此次发生的振荡事故，由于其持续时间短（100 ms），振荡实时监测功能还未得出结果就已发生事故，这就要求振荡的实时监测要具有实时录波功能，能记录振荡发生前后电网运行状态数据。现阶段国内外对于次/超同步振荡还缺乏深入的认识，实时录波数据可以在实时测量分析功能还未及时发挥作用时全面记录所有采样数据，为事故分析提供数据支撑，增强对电力电子化电网的特性认知，为今后应对策略制定提供参考。

结合上述分析可知，现有 WAMS 系统通过局部的改造升级，仅能应对次同步振荡范围的监测，无法满足今后电力电子化电网宽频振荡实时监测的需求。为此迫切需要探索研究新的监测手段，从根本上应对电力电子化电网宽频振荡的监测需求。

4.2 宽频测量技术

为应对电网电力电子化挑战，文献[7]提出面向电力电子化电网的宽频测量技术，所研制的宽频测量装置基于电网高频采样（12.8 kHz），实现电网基波、间谐波、谐波的实时测量，实时监测低频、次/超同步、高次谐波等宽频振荡，实时告警并启动录波，为振荡的实时监测、控制及事后分析提供保障。宽频测量装置还具有长录波功能，可基于高频采样（如 12.8 kHz 或 6.4 kHz ）进行 72 h 连续采集及录波，弥补实时监测和告警的缺陷，有效应对非常规事件的记录和分析，为电网振荡的实时监测提供有力手段。

宽频测量装置和现阶段测控、PMU 装置采集的数据同源，采集回路相同，因此可以集成 PMU 装置的所有功能，未来也可涵盖测控装置的稳态测量功能，同时还具有宽频振荡的实时监测与告警功能、间谐波和谐波越限的实时监测功能、长录波功能等，这相对于现有 WAMS 系统有了本质的改变。

此外，考虑到宽频测量数据的大幅提升，文献[7]也设计部署了宽频测量数据站域存储与分析装置（也称为宽频测量数据处理单元），实现宽频测量数据站端预处理和分析，仅将实时告警信息、振荡频率和幅值信息、站端处理分析结果传输到调度主站，在简化与主站信息传输的同时，支撑主站的数据调阅和查询，强化主子站的协同互动，不仅为宽频测量数据的监测、分析和传输提供了解决方案，也符合当前电力物联网数据就地化采集、就地化处理分析的思路。

当前，宽频测量样机相关装置已在多个风电、光伏并网变电站试点应用，充分验证了技术的可行性。对于出现的间谐波越限、谐波越限以及振荡问题，在装置层面就能实时给出告警信息，同时可直接给出多个振荡的频率、幅值，为电网振荡的实时监测提供了新的解决方案。

4.3 工程实施及部署方案

针对振荡的实时监测，限于工程实际情况，难以迅速全面推广应用以及全面替换现有 PMU 装置。

总体考虑分阶段、分步骤实施。首先针对在运的变电站,在不影响现有系统运行的情况下,参照文献[7],通过额外部署宽频测量及站域存储与分析装置,实现电网振荡的实时监测。针对新建厂站,可以考虑部署宽频测量装置,并集成 PMU 测量功能。对于变电站内的老旧 PMU 设备,在设备升级时则可全部替换成宽频测量装置,在实现基波相量测量的同时,兼具间谐波、谐波的测量和振荡实时监测及告警功能。

现阶段针对振荡的实时监测也可以重点选择典型场景进行部署。首先考虑新能源厂站,即大量集中式光伏、风电发电厂的并网接入点可以部署宽频测量装置,实现振荡的实时监测;此外,对于电网接入端,风电、光伏并网接入的变电站间隔可以优先考虑部署宽频测量装置,实现振荡的实时监测。牵引变电站、储能电站、大型电力电子负荷的间隔也可考虑部署宽频测量装置,完善振荡监测点的部署。

除了振荡监测点的部署外,还需要从电网广域层面考虑振荡发生、放大及传播过程的监测,因此振荡监测点部署需总体考虑。优先在振荡传播的关键节点部署监测装置,且宽频测量装置监测点在部署时不能过于分散,需形成较为完整的区域,实现从点到面的监测部署,在部署区域内发生振荡或者有振荡传播至此时可实时监测、告警和录波,为振荡的实时控制和事后分析提供有力支撑。

5 结语

英国“8·9”大停电是含高比例新能源电网发生大停电事故的一个典型案例,尤其是风电厂发生的振荡及脱网事故呈现新的特性,为我国未来新能源大规模接入提供了借鉴和参考,也使电网振荡实时监测需求变得迫切。

随着国家节能减排战略的实施,新能源在我国电网的接入将持续增长,电网从高比例电力电子设备接入到电网的电力电子化,再逐步发展到电力电子化电网,演变过程中电网振荡事件将会愈发频繁,且逐步向宽频域发展。在对电力电子化电网特性缺乏全面认知的情况下,对振荡进行实时监测不仅能够为振荡的实时告警、定位分析及振荡抑制提供有力支撑,也可为电力电子化电网的仿真结果校核和修正提供参考,有利于推进电力电子化电网的理论研究,增强对电力电子化电网特性的认知,为今后电网振荡的事前预警及提前干预提供支撑,为我国电网安全稳定运行提供保障。

参考文献:

[1] National Grid ESO. Interimreport into the low frequency demand disconnection(LFDD) following generator trips and frequency excursion on 9 Aug 2019[EB/OL]. [2019-08-16]. https://www.nationalgrideso.com/document/151081/download.

[2] National Grid ESO. Technical report on the events of 9 August 2019[EB/OL]. [2019-09-06]. https://www.nationalgrideso.com/document/152346/download.

[3] National Grid ESO. Appendices to the technical report on the events of 9 August 2019[EB/OL]. [2019-09-06]. https://www.nationalgrideso.com/document/152351/download.

[4] 孙华东,许涛,郭强,等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6191.
SUN Huadong,XU Tao,GUO Qiang,et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th,2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceeding of the CSEE,2019,39(21):6183-6191.

[5] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化,2019,43(24):1-5.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(24):1-5.

[6] 孙光辉. 新能源并网对电网安全的影响及三道防线进一步完善[EB/OL]. [2019-09-20]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA3MDI5NjQwOQ==&mid=2665546098&idx=1&sn=228e03b3630f5d9eda4b96327d2a397f&chksm=842b5744b35cde526952602d3bd15916652f75410672990b54d8d2b9cd19f8a17a70203a2d5e&mpshare=1&scene=1&srcid=1212jcJCxpzeVi9T5fJji5hJ&sharer_sharetime=1576136909049&sharer_shareid=f89e9c52542ff5da557a187121c56774&exportkey=AdCqOcy3n813y4hvY4%2F5tkw%3D&pass_ticket=MQ4oU6MGfdlVz0t4RpDs%2BJ2iPZoPi%2B5WAnY%2BuTo3uwDamvBuYKY%2Fved21lItOlgc#rd.
SUN Guanghui. Impact of power gird connected with renewable resource and improvement about three defense line[EB/OL]. [2019-09-20]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA3MDI5NjQwOQ==&mid=2665546098&idx=1&sn=228e03b3630f5d9eda4b96327d2a397f&chksm=842b5744b35cde526952602d3bd15916652f75410672990b54d8d2b9cd19f8a17a70203a2d5e&mpshare=1&scene=1&srcid=1212jcJCxpzeVi9T5fJji5hJ&sharer_sharetime=1576136909049&sharer_shareid=f89e9c52542ff5da557a187121c56774&exportkey=AdCqOcy3n813y4hvY4%2F5tkw%3D&pass_ticket=MQ4oU6MGfdlVz0t4RpDs%2BJ2iPZoPi%2B5WAnY%2BuTo3uwDamvBuYKY%2Fved21lItOlgc#rd.

[7] 樊陈,姚建国,常乃超,等. 面向电力电子化电网的宽频测量技术探讨[J]. 电力系统自动化,2019,43(16):1-8.
FAN Chen,YAO Jianguo,CHANG Naichao,et al. Discussion on wide-frequency measurement technology for power electronized power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(16):1-8.

[8] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(10):2821-2828.
XIE Xiaorong,LIU Huakun,HE Jingbo,et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(10):2821-2828.

[9] 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 casued by the interaction between full-converter wind Turbines and AC systems[J]. Proceeding of the CSEE,2016,36(9):2366-2372.

[10] 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 Engeering,2017,43(1):321-328.

[11] 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.

[12] 肖湘宁,廖坤玉,唐松浩,等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报,2018, 33(4):707-720.
XIAO Xiangning,LIAO Kunyu,TANG Songhao,et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonicsissues[J]. Transaction of China Electrotechnical Society,2018,33(4):707-720.

[13] 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.

[14] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154.
YUAN Xiaoming,CHENG Shijie,HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(19):5145-5154.

[15] 朱蜀,刘开培,秦亮,等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):3948-3962.
ZHU Shu,LIU Kaipei,QIN Liang,et al. Analysis of transient stability of power electronic dominated power system:an overview[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(14):3948-3962.

[16] 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):143-146.
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):143-146.

[17] 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.

[18] 陈宝平,林涛,陈汝斯,等. 采用 VSC-HVDC 并网的直驱风电场次/超同步振荡特性[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):44-51.
CHEN Baoping,LIN Tao,CHEN Rusi,et al. Analysis on charteristics of sub/super-synchronous oscillation caused by grid-connected direct-drive wind farm via VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):44-51.

[19] 唐冰婕,迟永宁,田新首,等. 基于阻抗频域灵敏度的双馈风电机组次同步振荡抑制措施[J]. 供用电,2019,36(10):73-79.
TANG Bingjie,CHI Yongning,TIAN Xinshou,et al. Sub-synchronous oscillation mitigation schemes of DFIG wind turbine based on impedance frequency-domain sensitivity[J]. Distribution & Utilization,2019,36(10):73-79.

[20] 赵妍,崔浩瀚,荣子超. 次同步振荡在线监测的同步提取变换和朴素贝叶斯方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(3):187-192.
ZHAO Yan,CUI Haohan,RONG Zichao. On-line monitoring of subsynchronous oscillation based on synchroextracting transform and naive Bayes method[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(3):187-192.

[21] 靳宗帅,张恒旭,石访,等. 含确定性分量和随机噪声分量的宽频带信号分解方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):70-78.
JIN Zongshuai,ZHANG Hengxu,SHI Fang, et al. Decomposition scheme for wideband signals containing deterministic components and stochastic noise components[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(4):70-78.

作者简介:


樊陈

樊陈(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统保护控制及自动化、IEC 61850 标准应用、智能变电站相关工作(E-mail:fanchen@epri.sgcc.com.cn);

姚建国(1962),男,博士生导师,教授级高级工程师,从事电力系统自动化相关工作;

张琦兵(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化相关工作。

Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK

FAN Chen[1], YAO Jianguo[1], ZHANG Qibin[2], XU Chunlei[2], REN Hui[1], DOU Renhui[1]
(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: On 9 August 2019, a major power blackout occurred in the great Britain power grid, causing power outage in some cities including London, and affected about 1 million people. It is necessary to find the reason to provide reference for the gird operation of China. The accident is summarized and the oscillation in the wind farm is discussed in detail. The reflection and analysis about the oscillation is presented considering the serial oscillation event, including typical characteristic and remaining problems. The new characteristic of oscillation about power grid which connected a large scale renewable plants is described, the shortcoming of wide area measurement system(WAMS) is demonstrated, and a new method of real-time monitoring of oscillation based on wide-frequency measurement is presented. The scheme about implement provides new method for operation and supervisory of power electronics dominated power system and improves the security and stability of future grid.

Keywords: blackout; oscillation of power grid; real-time supervisor; power electronics dominated power system; wide-frequency measurement

(编辑　吴楠)

(上接第 21 页)

Bipolar short-circuit fault ride-through method of DC transformer

ZHANG Zhongfeng, XIE Yeyuan, YANG Chen, GE Jian, QI Qi, TIAN Jie
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: When the DC transformer based on the traditional input series output parallel(ISOP) topology has a bipolar short-circuit fault, the module capacitors discharge quickly if no fault current limiting measures are taken. After the fault is cleared, it must be recovered by complicated timing such as slow start charging failed to fault ride-through. A method based on improved ISOP topology, using fault current blocking and current limiting control to realize system bipolar short-circuit fault ride-through is proposed. Firstly, the three stages and the mathematical models of the DC-voltage electronic transformer based on the improved ISOP topology are analyzed. Then, the low-voltage side fault ride-through method based on fault current limiting principle and the design principle of fault ride-through time are analyzed. Finally, the RTDS is built on the hardware-in-the-loop simulation platform. The results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed fault traversal method.

Keywords: DC transformer; input series output parallel(ISOP); bipolar short-circuit fault; fault ride-through; current limit control

(编辑　方晶)