Vol.41 No.7 Jul. 2021

新能源高占比电力系统的连锁故障诱因及 事故链搜索技术探讨

崔晓丹^{1,2},吴家龙¹,雷鸣¹,张金锋¹,许剑冰^{1,2},李威^{1,2},方勇杰^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏南京 211106;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室,江苏南京 211106)

摘要:相较于传统电力系统,新能源高占比电力系统的安全稳定特性、系统级连锁故障诱因及形态有较大的 差异。在分析新能源高占比电力系统主要特征的基础上,提炼了新能源高占比电力系统连锁故障的4类主 要诱因,并给出了相关案例;为了获得实际新能源高占比电力系统连锁故障的风险认知及可能的连锁路径, 提出了3个连锁故障事故链搜索的关键技术,即计及动态稳定特性的新能源场站等值建模方法、大扰动下电 力电子接口设备脱网概率的评估方法、基于时域仿真的连锁故障事故链搜索技术,同时给出了相关解决思路 的建议,以期为新能源高占比电力系统连锁故障的风险分析及防御提供一定的参考价值。 关键词:新能源高占比电力系统;连锁故障;概率评估;事故链搜索;动态稳定

中图分类号:TM 71 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103006

0 引言

以煤炭、石油、天然气、水能等传统能源作为一次能源的电力系统格局,正在全球范围内向以风能、 太阳能等可再生新能源为主要一次能源的方向变化 和发展^[1]。近年来,我国新能源的发展速度加快,装 机容量和发电量在所有能源中的占比越来越高,截 至2019年底,我国风电、光伏发电的总装机容量为 414 GW,占全国发电总装机容量的20.6%^[2]。

新能源发电具有强随机、低抗扰、弱支撑、低惯 量响应等特性^[3],给系统的安全运行带来严峻挑战, 在量变积累下有可能引发电网运行特性的质变,在 复杂或特殊场景下极可能导致新的复杂连锁反应问 题。近年来,英国^[4]、澳大利亚^[3]等国家的新能源高 占比电力系统都发生了系统连锁反应过程中新能源 规模化脱网导致的大停电事故,对社会和经济产生 了巨大的影响。因此,亟需深入探讨和研究新能源 高占比电力系统连锁反应的风险、形态、机理以及连 锁反应的路径搜索方法及防御技术等。

在电力系统连锁故障分析及阻断方法方面,国 内外的相关研究和应用成果较多^[6-7],但大多是针对 传统以水电、火电为主力电源的交流电力系统。关 于新能源设备与场站之间的交互作用^[8]、新能源与 直流输电^[9]或柔性交流输电系统(FACTS)之间^[10]的 交互作用对系统安全稳定影响的研究也已有较多的 成果。但是,针对大规模新能源发电并网带来的系

收稿日期:2020-09-22;修回日期:2021-01-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目(4000-201940418A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(4000-201940418A-0-0-00)

统新特性,系统性阐明新能源高占比电力系统连锁 故障的机理、形态及连锁路径搜索方法的相关研究 鲜见报道。

本文在分析新能源高占比电力系统主要特性的 基础上,从不同发生机制的角度出发,归纳总结了新 能源高占比电力系统连锁故障的4类主要形态,并 给出了相关的案例;从工程应用出发,提出了连锁故 障事故链搜索面临的关键技术问题,给出了相关的 解决思路建议,期望为新能源高占比电力系统的连 锁故障风险分析及防御提供一定的参考价值。

1 新能源高占比电力系统的主要特性

1.1 新能源发电出力的强随机性

新能源资源受气候、天气、地理位置等因素的影响,其发电出力具有较大的波动性和间隙性,导致在时间和空间上的不确定性较大^[11]。另外,新能源场站点多面广,受天气影响的特征各不相同,相关场站间还存在不同程度的时空关联性^[12]。然而,当前预测技术的置信度仍存在较多的不足^[13],难以提供准确的新能源出力预测结果。

从系统角度来看,传统电力系统潮流方式的随 机性主要来自负荷侧,而新能源高占比电力系统的 潮流方式受源、荷双重不确定性的影响。此外,随着 电力市场政策的逐步推进和深化,电网侧重要断面 的交易计划也存在一定的不确定性^[14]。源、网、荷侧 多重不确定性的交互影响使系统潮流方式的不确定 性程度大幅提升。

1.2 新能源设备模型参数的非标性和模糊性

在新能源快速发展的过程中,新能源设备及场 站对电网适应能力、支撑作用的相关标准也在不断 的完善。例如:新能源设备的并网标准中明确了低 电压穿越期间需要提供一定比例的无功功率^[15-16], 但是未给出设备有功支撑能力的具体标准;对于场 站的一次调频能力、调压能力以及惯量响应能力,目 前均无明确标准。在相关标准强制推广应用前,各 个厂家依据自身的技术实力提供具有不同电网支撑 能力的产品,这就导致不同厂家之间的产品性能参 数具有较大的差异,甚至同一厂家的不同批次产品 的参数也不尽相同^[17]。

此外,目前对新能源并网设备及其他传统设备 的检测还不够完善。即使经过检测的设备模型参 数,因受各种外界条件的影响,也会随着时间的推移 与检测所得结果之间出现偏差^[18-19]。因此,设备模 型参数的模糊性使得基于仿真分析的结果具有一定 的模糊特性,给实际运行中基于仿真分析的运行控 制策略带来挑战。

1.3 新能源发电的弱抗扰性

在电网受到扰动时,常规发电可以趋于平抑并 穿越扰动,具有较强的抗扰能力^[20]。新能源发电虽 要求能适应电网的大部分扰动,但受限于电力电子 器件的电压、电流耐受能力,变流器装置自身需具备 过压、过流、过欠频、三相不平衡以及高/低电压穿 越期间制动电阻过温保护等,导致其在电网发生扰 动时存在一定的脱网概率^[21]。

另外,已有的新能源控制策略需要采集电网的 电压、频率、电流数据用于设备控制,容易将电网接 口处的扰动引入整个电力电子设备的控制过程中。 如果滤波和控制参数设计得不合理,很容易放大扰 动^[22],使得新能源发电系统自身失去稳定性。

不管何种原因、何种形式导致新能源发电系统 发生扰动时,系统都无法继续并网运行,对于电网而 言,其突发失稳或脱网的行为构成了新的连锁性级 联扰动,严重威胁着电网的安全。

1.4 新能源发电的频率 / 电压弱支撑性

在新能源发电系统中,一次发电设备与其接入 电网之间一般采用变流器连接^[23]。虽然风电机组的 叶轮具有较大的转动惯量,但基于换流器进行能量 解耦变换,从并网点来看,新能源发电系统本质上是 一个基于有功 / 无功解耦控制的功率型电源或基于 电压 / 频率控制的电压型电源^[24],并网连接点的瞬 时频率与系统功率供需平衡状态无关,不具备常规 机组自身的频率响应特性。因此,当系统负荷发生 较大的变化导致系统频率快速变化时,新能源发电 系统无法与同步发电机一样自发提供惯量支撑,以 减小电网频率变化率和变化幅值大小。

从电压支撑的角度来看,基于换流器进行能量 解耦变换的本质特征使得新能源设备或场站也无法 在感受到并网点电压变化后进行基于响应检测的无 功电压自动调节。另外,虽然目前国家标准强制要 求新能源机组具备高/低电压穿越功能^[15],但受限 于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的过流能力,在故障 穿越期间换流器的无功电流输出有限,因此其电压 调控支撑能力弱于传统机组。

2 新能源高占比电力系统的连锁故障诱因 分析

在新能源高占比电力系统中,大量电力电子设 备的多时间尺度稳定特性、响应特性和控制特性交 互影响,导致系统的响应行为和控制规律发生根本 性变化。例如,我国某地区大规模风电经特高压直 流外送系统(拓扑示意图见附录中图A1)在某研究 方式下因电力电子设备相互耦合导致的连锁反应过 程如图1所示。图中,U_{th}为高压保护阈值;U_{LVBT}为 风电机组的低电压穿越阈值;t。为换相失败开始时 刻。特高压直流受端交流系统发生接地故障,导致 直流系统发生换相失败,t。时刻送端电网的电压开 始下降,t₁时刻风电设备进入低电压穿越,风电机组 的有功输出迅速降低,无功输出增大;t,时刻受端线 路的故障清除,此时逆变侧电压开始恢复,直流线路 两侧的电压差变小,导致直流电流大幅降低,当降至 接近0时, 直流整流侧消耗的无功大幅减小。由于 无法及时切除交流滤波器,同时风电机组在低电压 穿越期间发出的无功回退不及时,造成系统无功大 量盈余,导致送端交流电压升高。当t₄时刻电压升 高到高压保护阈值时,风电机组进入高电压穿越甚 至高压保护脱网,造成有功输出减小。直流换相失 败结束,直流功率恢复后,风电机组脱网造成送端电 网出现功率缺额,引发系统频率失稳。



图1 直流换相失败导致新能源发电设备连锁反应



新能源设备或场站在大扰动下的多逻辑控制特 性、多时段切换特性等复杂控制规律,导致并网系统 的安全稳定特性更加复杂。新能源高占比电力系统 除了具有传统电力系统可能的连锁故障诱因外,还 因引入了新的诱因而会呈现不同的连锁反应形态或 场景。下文从4类不同诱因的角度分别进行阐述。 2.1 新能源发电系统引入的阻尼变化导致系统振 荡失稳引发连锁故障

新能源发电和 FACTS 设备的变换器因采用含

高频开关电力电子器件的拓扑结构,在运行中会产 生不同频段的高次谐波,一般通过在并网点处加装 LC或LCL滤波器予以消除。滤波器的接入以及变 换器自身所具有的一定的阻抗特性,导致新能源大 规模接入系统的阻尼特性发生变化,电网发生扰动 时容易引发系统的多频带振荡甚至失稳。

例如,我国河北沽源地区的风电场(以双馈风电 机组为主)经串联补偿输电线路并网后多次发生频 率在 4~12 Hz 的次同步功率振荡^[25]。通过分析发 现,双馈风电机组引起的次同步振荡是一种纯电气 谐振,起源于LC谐振,但是电力电子换流器引入的 负阻效应使得振荡的程度大幅增大^[26]。又如,新疆 哈密地区的风电场(以直驱风电机组为主)接入弱交 流电网后多次发生 20~30 Hz 的次同步功率振荡,导 致三百多千米外的电厂中有 3 台 660 MW 的火电机 组因保护动作而脱网^[27],从而引发系统级连锁故障。 2.2 接入弱电网导致新能源发电系统自身失稳引

发连锁故障

大规模集中式新能源场站往往需要经过变压器 和远距离输电线路接入电网,而所接入的电网往往 较弱。不同的控制器之间、电力电子变换器与弱电 网之间的交互影响使得电力电子变换器和控制器的 动态特性发生变化,易引发新能源发电自身的控制 系统失去稳定,进而给主网带来影响。

另外,如果电力电子装置无法适应全工况运行, 当其所连接的大电网的强度发生变化时,可能造成 控制失稳。例如,2019年发生的英国"8·9"大停电 事故^[28-29]最初因遭受雷击导致线路停运,使得海上 风电场Hornsea接入的电网变弱,但Hornsea风电场 内换流器的控制策略不能适应弱电网条件^[30],导致 风电场内发生短时频率为10Hz左右的次同步振 荡,造成风电场的有功和无功出力出现大幅度振荡 (见附录中图A2),进一步导致风电场因过流而脱网 或降功率运行。

2.3 新能源控制方式切换或设备保护动作导致新 能源场站脱网引发连锁故障

当电网发生的故障扰动较小时,新能源发电系统中的电力电子变换器可以依靠其常规控制实现装置内存储元器件状态的调节。但当电网出现大的故障扰动时,往往需要借助暂态控制与保护电路的切换来满足并网约束条件。在控制方式和保护的切换过程中,可能会导致系统频率和电压稳定性问题,继而引发电网侧的连锁故障。

以某厂家双馈风电机组的控制为例^[31],其并网 点电压、功率的变化曲线见图2。图中,电压为标幺 值。当电网电压跌落至0.8 p.u.时,并网变流器由常 规控制转为低电压穿越控制,同时为了保证低电压 穿越期间各元器件的安全,撬棒保护电路按需发生 投切动作(见附录中图A3)。在低电压穿越期间,风 电机组的有功出力大幅减小,并提供一定的无功功 率支撑;在故障切除后,风电机组的有功出力按斜率 爬坡恢复,无功恢复为0。可见,控制策略的切换伴 随着有功和无功功率的快速变化,易导致系统发生 频率或电压稳定问题。



图 2 某双馈风电机组在低电压穿越过程中的 电压、有功和无功功率曲线



另一种场景是新能源设备保护动作引起功率缺 失。当电网侧故障导致新能源发电设备切换到低电 压穿越控制时,伴随着保护电路投切,制动电阻会迅 速发热升温。为了避免设备内温度过高导致器件损 坏,往往会设置低电压穿越次数越限保护。保护动 作使得新能源发电设备脱网或降功率运行,易引发 电网侧的连锁故障。例如,在澳大利亚"9·28"大停 电事故中^[32-33],某线路发生5次故障,导致6次电压 跌落,而风电机组软件内预设的低电压穿越次数为 5~9次,导致发生故障后9座风电场脱网或降功率 运行^[34]。

2.4 新能源高占比电力系统扰动特性发生变化导 致安全自动装置动作引发连锁故障

相比于传统电力系统,新能源高占比电力系统 在电网扰动下的动态响应特性发生了较大的变化, 电气量特征变化得更快,频率、电压达到极值点的时 间大幅缩短。所以,适用于传统电力系统的安全自 动装置的故障识别和动作判据可能不再适应。安全 自动装置承担着电网第二、第三道防线的任务,如果 其不能正确识别故障扰动,可能导致误动或拒动,从 而引发系统的连锁反应。

在澳大利亚"9·28"大停电事故中,南澳电网的 低频减载标准为"频率滑差在0~3 Hz/s范围内时切 负荷,高于3 Hz/s时低频减载滑差闭锁"。事故发 生前,电网的新能源发电占比超过48%,系统惯量呈 现历史最低,当Heywood风电场的联络线跳开,电网产 生850~900 MW功率缺额后,频率滑差达到6.1 Hz/s, 滑差保护启动,低频减载闭锁。之后频率降至47 Hz 以下,引起发电机组的低频保护动作切机^[35],从而导 致系统事故进一步扩大。 上述分析提炼了不同诱因或机制导致的新能源 高占比电力系统出现的新连锁反应形态或场景。可 见,相比于传统电力系统,新能源高占比电力系统的 连锁故障在机制、形态上均有较大的差异化特征。

3 新能源高占比电力系统连锁故障事故链 搜索关键技术

电网生产运行单位和调控人员往往很关心实际 系统是否存在连锁故障风险、连锁故障如何发展、不 同连锁路径出现的概率等现实问题。目前已有较多 的关于相关问题解决技术、方法的研究和应用成 果^[36-37]。基于事故链搜索的连锁故障分析方法能精 确计及符合实际物理过程的各种复杂模型,可反映 各种不同机制导致的连锁反应环节,因而能够准确 捕捉和描述新能源高占比电力系统中的相关动态过 程,特别是电力电子设备的行为^[38-39],在实际应用时 具有一定优势,目前已有学者将其应用于交直流混 联电网的连锁故障搜索方法^[40-42]。本节着眼于新能 源高占比电力系统的连锁反应路径搜索问题,基于 事故链搜索方法,提出3个关键技术问题及解决思 路建议。

从方法的实现过程来看,主要包括新能源场站 的等值建模、电网典型场景集的构建、级联故障识 别、事故链确定等步骤。为了满足新能源高占比电 力系统连锁故障的分析需求,需要攻克计及动态稳 定特性的新能源场站等值建模技术、大扰动下电力 电子接口设备脱网概率评估方法、连锁故障事故链 搜索等关键技术方法,具体框架如图3所示。



图3 新能源高占比电力系统连锁故障事故链 搜索关键技术框架

Fig.3 Key technology framework of cascading failure fault chain search for power system with high penetration of renewable energy

图3中,计及动态稳定特性的新能源场站等值

建模技术为时域仿真提供基础模型,基于时域仿真 的连锁故障事故链搜索技术为设备脱网概率评估提 供基础数据,大扰动下设备脱网概率评估方法为连 锁故障事故链搜索过程中的下一个关键级联环节提 供依据。融合上述三方面关键技术的新能源高占比 电力系统的连锁故障事故链搜索流程如图4所示。



图 4 连锁故障事故链搜索流程 Fig.4 Flowchart of searching cascading failure fault chain

3.1 计及动态稳定特性的新能源场站等值建模技术

新能源发电设备具有非线性、多切换控制等特性,导致其动态运行特性异常复杂,因此,在基于时 域仿真进行事故链搜索时,需构建较为准确的新能 源场站等值模型,充分体现上述可能的连锁故障诱 因。然而,大型新能源场站一般包含几十个甚至上 百个机组单元,其主辅控制(如主控与变流回路、辅 助保护、场站内无功补偿设备等)的原理及生产厂家 各不相同,设备的型号各异,且通过多级串并联汇集 并网,若分别对每个发电单元建立详细模型,不但数 据处理过程复杂,计算量十分庞大甚至难以求解,仿 真启动和运行稳定性存在极大难题,而且会消耗极 多的仿真资源,仿真效率也难以接受。因此,亟需攻 克适用于新能源高占比电力系统安全稳定分析的新 能源场站等值建模技术。 文献[43]借鉴常规同步机组的同调分群方法, 采用*K*-means聚类算法将相似的物理参数或者控制 参数聚合为一个值,实现了风电场的动态等值。文 献[44]进一步综合考虑了风电场全年风资源的统计 信息和系统侧不同类型故障发生的比例,采用聚类– 判别分析法,建立了风电场概率等值模型,能比较全 面地表征风电场全年的运行外特性。在研究新能源 高占比电力系统的连锁故障过程中,一般不太关注 长时间尺度的运行特性,而是重点关注大扰动下新 能源场站与电网交互的宽频带稳定特性。为此,本 文提炼了用于连锁故障分析的新能源场站建模的3 个关键技术问题,如图5所示。



图5 用于连锁故障仿真的新能源场站建模技术

Fig.5 Modeling technology of renewable field station for cascading failure simulation

通过提取大小扰动下新能源场站的关键特征参量,对其进行敏感度分析,采用聚类、拟合等方法对 含多类异构主辅控制的大型新能源场站的主回路和 控制参数进行聚合简化。聚焦所研究的稳定性问 题,对新能源电力电子设备的多运行控制模式及序 贯切换控制进行等效建模,然后基于相量测量单元 (PMU)的实测数据或详细模型的运行数据,验证多 场景、多扰动下新能源场站等值模型的响应特性。 新能源场站的等值模型直接决定了基于时域仿真数 据的准确性和大扰动下电力电子设备脱网概率计算 的准确性,是基于事故链搜索技术的关键环节。

3.2 大扰动下电力电子接口设备脱网概率评估

在电力系统的大扰动下,以新能源并网设备为 代表的电力电子接口设备的脱网,尤其是大型新能 源基地受扰很大时的集中脱网,造成系统新的有功、 无功不平衡冲击,引发后续级联故障,是新能源高占 比电力系统连锁故障的重要诱因及关键环节。因 此,在造成实际脱网故障前,应能提前评估出重要节 点设备(例如新能源基地并网点)的脱网概率,将其 中概率较大的场景作为连锁故障事故链中下一个级 联故障加以考虑。电力系统中的节点、设备众多,原 则上需要跟踪所有重要设备的状态,并对其脱网概 率进行评估,以准确反映连锁故障的进程。在实际 应用中,可以根据灵敏度、专家经验等方法筛选出对 电网扰动更为敏感的重要设备进行监视。

设备脱网一般是因为其感受到并网节点处的电 气量信息发生变化,为了保护设备自身的安全,其控 制保护系统发生动作。根据控制保护的类型,可分 为频率保护、电压保护、过电流保护等[45-50]。先分别 计算某设备各类控制保护动作的概率,再给出因控 制保护动作而脱网的综合概率。文献[51]采用风险 趋向型的效用函数,给出了风电机组机端基于电压、 频率、电流约束的脱网风险指标的计算公式,并加权 求得风电机组的综合脱网风险指标,其中权重值采 用层次分析法计算得到,但未考虑高/低电压穿越 过程中的脱网风险。文献[52]指出可以对风电场的 常见故障进行统计分析,生成预想故障集,针对预想 故障分别进行概率评估,并提供了风电机组机端电 压导致风电机组脱网的概率计算方法,但该概率计 算过程中的门槛电压和时间是基于国家标准要求的 低电压穿越曲线[15]设定的,而实际风电机组机端电 压的耐受区间往往高于标准曲线。

某风电机组的实际低电压穿越曲线(由保护动 作判据二元表组成的曲线,具有一定的模糊性)如图 6所示(图中,并网点电压为标幺值;时间的单位为 s;U_{min}为风电机组的最低运行电压),且以图中曲线 为界分为3个区域(区域A、B、C)。若仅考虑电压约 束,那么区域A的脱网概率为0,区域C的脱网概率 为1,机端运行电压及其持续时间处于区域B时存在 一定的脱网概率,且越接近国家标准要求的低电压 穿越曲线则脱网概率越小,越靠近实际低电压穿越 曲线则脱网概率越大。因此,可通过对图6中的曲 线进行数学积分及归一化处理后获得风电机组的脱 网概率值。此外,由于风电机组设备参数具有一定 的模糊性,较难获取其准确的低电压穿越曲线也可能出现 偏移,但通常能获得较为准确的区间值,通过叠加该





模糊因素可得到相应概率的置信区间。

140

3.3 基于时域仿真的连锁故障事故链搜索

在连锁故障事故链的搜索过程中,前序所有事件的总和是后一事件发生的前提条件。因此,如何确定初始扰动下后续的每一个事件,将决定连锁故障的发展及最终事故链的形式。对于是否发生后一事件或者发生哪一个后续事件,可以遵循概率原则或风险原则进行确定,并将概率或风险大的事件作为下一事件。

基于时域仿真能够获得系统中所有建模设备和 元件的运行状态,因此只要对这些设备和元件加以 监视,就可计算获得其脱网等离散事件发生的概率 和风险。在预先设定的事件概率或风险阈值(可以 体现不同的可承受风险的偏好,也可以对每级阈值 设置不同的值)下,基于时域仿真结果可获得下一个 连锁事件。然后将此事件作为一个新增扰动加入仿 真过程,依此迭代,直至满足连锁故障搜索终止条件 则结束。终止条件包括但不限于以下情况:①系统 失去稳定,②事故链的长度达到指定的阈值,③系统 进入稳态运行前没有概率或风险较大的事件发生。 某典型初始故障下的事故链如图7所示。通过设置 各级概率或风险的阈值,可以获得若干个连锁故障 事故链。事故链*i*可表示为 $T_i = \{T_{i1}, \dots, T_{ir}, \dots, T_{irr}\},\$ 其中T_{ii}为事故链i的第i个事件,包括事件内容及发 生时刻2个要素,可以用二元表(s_i, t_i)表示。



 Fig.7 Schematic diagram of fault chain for cascading failure

从实际应用的角度来看,电网运行人员不仅希 望能够掌握某一确定潮流方式下电网发生连锁故障 的风险,还希望能掌握所有实际可能出现的潮流方 式下系统总体的连锁故障风险及薄弱环节,而新能 源高占比电力系统的潮流方式受到多种不确定性因 素的影响。在源网荷侧的各种不确定性因素影响 下,计及电力/电量平衡约束与电网安全稳定约束, 生成具有代表性的电网典型潮流方式,是进行连锁 故障风险分析的关键环节之一。例如:电网运行人 员想了解下个月可能的潮流方式下是否存在复杂连 锁故障风险,就需要生成下个月电网的典型运行方 式^[33-54]。为了解决这一问题,可充分利用历史运行 数据,结合专家经验规则,或基于运行域、置信区间 等理论方法生成若干典型潮流方式^[55],其逻辑框图 如图8所示。



图 8 用于连锁故障分析的典型潮流方式生成技术框架

Fig.8 Technical framework of typical power flow mode generation for cascading fault analysis

可见,连锁故障事故链的数量具有不确定性,由 电网的初始潮流方式、初始故障、事故链各级阈值以 及设置的搜索终止条件决定。在实际应用中,可根 据经验和风险接受的偏好程度,确定连锁故障事故 链搜索的进程和最终数量。且通过对多个运行方 式、多个初始故障进行连锁故障搜索,对事故链的各 环节进行统计分析,可进一步识别系统总体的薄弱 环节^[56]。

4 结语

深入掌握连锁故障的演化机理和演化规律,是 有效开展连锁故障路径搜索、风险分析及研发相应 阻断技术的前提。新能源高占比电力系统的潮流方 式具有较多的不确定性,新能源发电具有弱抗扰性 和弱支撑性,使得新能源高占比电力系统的连锁故 障演化机理与传统电力系统相比有本质区别,其发 展诱因及形态也有较大的不同。

本文着重分析了区别于传统电力系统的新能源 高占比电力系统连锁反应过程发展的4类主要诱 因。而在一个实际的完整连锁反应发展过程中,完 整的连锁故障路径也可能包含传统的连锁环节(例 如断面过载潮流转移导致稳定形态转化,三道防线 的正确或不正确动作等)。在分析连锁故障诱因的 基础上,进一步提出了基于事故链方法搜索新能源 高占比电力系统连锁路径的关键技术问题及其解决 思路的建议,期望为该领域学者、研发和应用人员持 续深入研究解决相关问题提供一定的参考价值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.

ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

[2]水电水利规划设计总院.中国可再生能源发展报告2019[R].

北京:中国水利水电出版社,2020.

- [3] 汪宁渤,马明,强同波,等.高比例新能源电力系统的发展机遇、挑战及对策[J].中国电力,2018,51(1):29-35,50.
 WANG Ningbo, MA Ming, QIANG Tongbo, et al. High-penetration new energy power system development: challenges, opportunities and countermeasures[J]. Electric Power, 2018,51(1): 29-35.50.
- [4]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.
- [5] YAN R F, MASOOD N A, KUMAR SAHA T, et al. The anatomy of the 2016 South Australia blackout: a catastrophic event in a high renewable network [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5374-5388.
- [6] BOMPARD E, ESTEBSARI A, HUANG T, et al. A framework for analyzing cascading failure in large interconnected power systems: a post-contingency evolution simulator [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 81:12-21.
- [7] SALIM N A, OTHMAN M M, MUSIRIN I, et al. Identifying severe loading condition during the events of cascading outage considering the effects of protection system hidden failure
 [C]//2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). Langkawi, Malaysia: IEEE, 2013:375-379.
- [8] DAI C, XU T. Impact of wind power and photovoltaic grid connection on subsynchronous oscillation of thermal power[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2020, 1550(5):052017.
- [9] 陈厚合,鲁华威,王长江,等.抑制直流送端系统暂态过电压的 直流和风电控制参数协调优化[J].电力自动化设备,2020,40 (10):46-55.
 CHEN Houhe,LU Huawei,WANG Changjiang, et al. Coordinated optimization of HVDC and wind power control parame-

ters for mitigating transient overvoltage on HVDC sendingside system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10):46-55.

- [10] 刘宇明,黄碧月,孙海顺,等. SVG与直驱风机间的次同步相互 作用特性分析[J]. 电网技术,2019,43(6):2072-2079.
 LIU Yuming, HUANG Biyue, SUN Haishun, et al. Study on subsynchronous interaction between D-PMSG-based wind turbines and SVG[J]. Power System Technology,2019,43(6): 2072-2079.
- [11] TANG Xiangying, HU Yan, CHEN Zhanpeng, et al. Flexibility evaluation method of power systems with high proportion renewable energy based on typical operation scenarios[J]. Electronics, 2020, 9(4):627.
- [12] 丁明,宋晓皖,孙磊,等.考虑时空相关性的多风电场出力场景 生成与评价方法[J].电力自动化设备,2019,39(10):39-47.
 DING Ming, SONG Xiaowan, SUN Lei, et al. Scenario generation and evaluation method of multiple wind farms output considering spatial-temporal correlation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):39-47.
- [13] 杨正瓴,赵强,吴炳卫,等.采用k近邻进行空间相关性超短期风速预测[J].电力自动化设备,2019,39(3):175-181.
 YANG Zhengling,ZHAO Qiang,WU Bingwei, et al. Ultra-short term wind speed prediction based on spatial correlation by k-nearest neighbor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(3):175-181.
- [14] FAN Jiale, TONG Xiaoyang, ZHAO Junbo. Multi-period optimal

energy flow for electricity-gas integrated systems considering gas inertia and wind power uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123:106263.

- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化 管理委员会.风电场接入电力系统技术规定:GB/T 19963— 2011[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [16] 陈钊,夏安俊,汪宁渤,等.适用于低电压穿越仿真的风电场内 集电线路等值方法[J].电力系统自动化,2016,40(8):51-56. CHEN Zhao,XIA Anjun,WANG Ningbo, et al. Collector network equivalent method of wind farm for low voltage ride through simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(8):51-56.
- [17] 侯俊贤,陶向宇,张静,等. 基于低电压穿越控制策略的风电场等值方法[J]. 电网技术,2015,39(5):1281-1286.
 HOU Junxian, TAO Xiangyu, ZHANG Jing, et al. A low-voltage ride-through control strategy based equivalence method for wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1281-1286.
- [18] LIU F S,GAO S J,HAN H W, et al. Interference reduction of high-energy noise for modal parameter identification of offshore wind turbines based on iterative signal extraction[J]. Ocean Engineering, 2019, 183(1): 372-383.
- [19] 崔晓丹,李威,李兆伟,等.适用于机电暂态仿真的大型光伏电站在线动态等值方法[J].电力系统自动化,2015,39(12):21-26.

CUI Xiaodan, LI Wei, LI Zhaowei, et al. An online dynamic equivalent method for large-scale photovoltaic power plant suitable for electromechanical transient stability simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):21-26.

- [20] 袁小明. 大规模风电并网问题基本框架[J]. 电力科学与技术 学报,2012,27(1):16-18.
 YUAN Xiaoming. Framework of problems in large scale wind integration[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2012,27(1):16-18.
- [21] YU Haiyang, ZHANG Meilun, ZU Guangxin. Research on the cascading tripping risk of wind turbine generators caused by transient overvoltage and its countermeasures [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 100(1): 12-18.
- [22] 王旭斌,杜文娟,王海风.弱连接条件下并网VSC系统稳定性分析研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1593-1604,1895.
 WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions
 [J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(6):1593-1604,1895.
- [23] TURK A, SANDELIC M, NOTO G, et al. Primary frequency regulation supported by battery storage systems in power system dominated by renewable energy sources[J]. The Journal of Engineering, 2019(18):4986-4990.
- [24] DOHERTY R, MULLANE A, NOLAN G, et al. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):452-460.
- [25] WANG L, XIE X R, JIANG Q R, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a seriescompensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5):2772-2779.
- [26] 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.

- [27] 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.
- [28] Australian Energy Market Operator (AEMO). Technical report on the events of 9 August 2019 [R/OL]. [2020-09-20]. https:// www.nationalgrideso.com / document / 152346 / download.
- [29] Australian Energy Market Operator(AEMO). Appendices to the technical report on the events of 9 August 2019[R/OL]. [2020-09-20]. https://www.Nationalgrideso.com/document/ 152351/download.
- [30] BIALEK J. What does the power outage on 9 August 2019 tell us about GB power system [EB/OL]. [2020-09-20]. https://ideas.repec.org/p/cam/camdae/2018.html.
- [31] ZHAO M Q, YUAN X M, HU J B, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4):2925-2937.
- [32] Australian Energy Market Operator. Preliminary report-black system event in South Australia on 28 September 2016[R]. Melbourne,Australia:Australian Energy Market Operator Limited, 2016.
- [33] Australian Energy Market Operator. Update report-black system event in South Australia on 28 September 2016 [R]. Melbourne, Australia: Australian Energy Market Operator Limited, 2016.
- [34] Australian Energy Market Operator. Black system South Australia 28 September 2016: third preliminary report [R]. Melbourne, Australia: Australian Energy Market Operator Limited, 2016.
- [35] 曾辉,孙峰,李铁,等. 澳大利亚"9·28"大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化,2017,41(13):1-6.
 ZENG Hui,SUN Feng,LI Tie,et al. Analysis of "9·28" blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(13):1-6.
- [36] WANG A S,LUO Y,TU G Y, et al. Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(1):442-450.
- [37] 刘豫航,黄少伟,梅生伟,等.基于序列模式挖掘的电力系统连 锁故障模式分析方法[J].电力系统自动化,2019,43(6): 34-40.

LIU Yuhang, HUANG Shaowei, MEI Shengwei, et al. Analysis on pattern of power system cascading failure based on sequential pattern mining[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6):34-40.

- [38] 王英英,罗毅,涂光瑜,等. 基于事故链的电力系统连锁故障风 险模糊综合评估方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(增刊 1):25-30.
 WANG Yingying,LUO Yi,TU Guangyu, et al. Risk assessment of cascading failures in power system based on fault chain and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(Supplement 1):25-30.
- [39] DAVID A E, GJORGIEV B, SANSAVINI G. Quantitative comparison of cascading failure models for risk-based decision making in power systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 198:106877.
- [40] 朱元振,刘玉田. 基于深度学习直流闭锁判断的高风险连锁故 障快速搜索[J]. 电力系统自动化,2019,43(22):59-66.

ZHU Yuanzhen, LIU Yutian. Fast search for high-risk cascading failures based on deep learning DC blocking judgment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22):59-66.

- [41] 罗瑞,樊艳芳.交直流系统连锁故障引发功率倒向方向保护策略[J].电力自动化设备,2019,39(12):189-197.
 LUO Rui, FAN Yanfang. Directional protection strategy of power inversion caused by chain fault of AC / DC hybrid system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 189-197.
- [42] 李文博,朱元振,刘玉田. 交直流混联系统连锁故障搜索模型 及故障关联分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):59-68.
 LI Wenbo,ZHU Yuanzhen,LIU Yutian. Search model and correlation analysis for cascading failures in AC / DC hybrid power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):59-68.
- [43] 陈树勇,王聪,申洪,等.基于聚类算法的风电场动态等值[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):11-19,24.
 CHEN Shuyong, WANG Cong, SHEN Hong, et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm[J].
 Proceedings of the CSEE,2012,32(4):11-19,24.
- [44] 朱乾龙,韩平平,丁明,等. 基于聚类-判别分析的风电场概率 等值建模研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4770-4780.
 ZHU Qianlong,HAN Pingping,DING Ming, et al. Probabilistic equivalent model for wind farms based on clustering-discrimi-

and analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28):4770-4780.

- [45] XING J L, MU L H. A fast and precise power system frequency estimation method without iterations [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123: 106199.
- [46] OSALONI O O, SAHA A K. Voltage dip/swell mitigation and imaginary power compensation in low voltage distribution utilizing Improved Unified Power Quality Conditioner(I-UPQC) [J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2020,49:84-103.
- [47] 范文杰,肖湘宁,陶顺. 计及继电保护动作的电压暂降评估
 [J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(3):129-136.
 FAN Wenjie,XIAO Xiangning,TAO Shun. Assessment on voltage transient drop considering relay protection action[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 129-136.
- [48] 宋国兵,陶然,李斌,等.含大规模电力电子装备的电力系统故 障分析与保护综述[J].电力系统自动化,2017,41(12):2-12. SONG Guobing,TAO Ran,LI Bin,et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(12):2-12.
- [49] 张保会,李光辉,王进,等.风电接入电力系统故障电流的影响 因素分析及对继电保护的影响[J].电力自动化设备,2012,32 (2):1-8.
 ZHANG Baohui,LI Guanghui,WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):1-8.
- [50] ZHOU Yi, ZHOU Nanrun, GONG Lihua, et al. Prediction of photovoltaic power output based on similar day analysis, genetic algorithm and extreme learning machine [J]. Energy, 2020,204:117894.
- [51] 毕平平,许晓艳,梅文明,等.风电基地连锁脱网风险评估方法 及送出能力研究[J].电网技术,2019,43(3):903-910.
 BI Pingping,XU Xiaoyan,MEI Wenming, et al. Study on cas-

142

caded tripping-off risk assessment method and delivery capacity of wind power base[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):903-910.

- [52] 陈麒宇, Tim Littler, 韩树山, 等. 风电机组脱网的风险评估 [J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):576-582. CHEN Qiyu, TIM Littler, HAN Shushan, et al. Risk assessment model for wind generator tripping off[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 576-582.
- [53] 王婷婷,白晓清,李佩杰,等. 计及可再生电源不确定性的配电 网鲁棒最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):87-94. WANG Tingting, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. Robust optimal power flow in distribution network considering uncertainty of renewable distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 87-94.
- [54] 崔晓丹,李碧君,李威,等. 设备月度检修计划给定下的电网运 行方式优化方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(9):102-107. CUI Xiaodan, LI Bijun, LI Wei, et al. Operation mode optimization method of power grid with equipment monthly maintenance planning[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9):102-107.
- [55] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8):

2553-2580.

[56] 徐迪,王洪涛. 基于随机潮流和风险价值的含大规模风电系统 高风险连锁故障评估[J]. 电网技术,2019,43(2):400-409. XU Di, WANG Hongtao. High risk cascading outage assessment in power systems with large-scale wind power based on stochastic power flow and value at risk [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 400-409.

作者简介:



崔晓丹(1981-),男,江苏东台人,研 究员级高级工程师,博士,主要研究方向为电 力系统安全稳定分析及控制技术(E-mail: cuixiaodan@sgepri.sgcc.com.cn);

吴家龙(1987—),男,江西吉安人,工 程师,硕士,通信作者,主要研究方向为新能源 高占比电力系统的建模与仿真分析(E-mail: wujialong@sgepri.sgcc.com.cn);

雷 鸣(1984-),男,山西五台人,高 级工程师,硕士,主要研究方向为现代信息技术等在电力系 统中的应用(E-mail:leiming1@sgepri.sgcc.com.cn)。

(编辑 陆丹)

Discussion on inducement and fault chain search technology of cascading failure in power system with high penetration of renewable energy

CUI Xiaodan^{1,2}, WU Jialong¹, LEI Ming¹, ZHANG Jinfeng¹, XU Jianbing^{1,2}, LI Wei^{1,2}, FANG Yongjie^{1,2}

(1. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: Compared with the traditional power system, the security and stability characteristics, inducements and forms of system-level cascading failure of power system with high penetration of renewable energy are quite different. Based on the main characteristic analysis of power system with high penetration of renewable energy, four types of cascading failure's main inducements of power system with high penetration of renewable energy are extracted, and relevant cases are given. In order to obtain the risk cognition and possible chain paths of cascading failure in the actual power system with high penetration of renewable energy, three key technologies of cascading failure's fault chain search are proposed, namely, the equivalent modeling method of new energy station considering dynamic stability characteristics, the evaluation method of off-grid probability of power electronic interface equipment under large disturbance and the cascading failure's fault chain search technology based on time domain simulation. At the same time, the relevant solutions are proposed in order to provide some reference values for risk analysis and prevention of cascading failure in the power system with high penetration of renewable energy.

Key words: power system with high penetration of renewable energy; cascading failure; probability assessment; fault chain search; dynamic stability



图 A1 某特高压直流送端电网示意图 Fig.A1 Schematic diagram of a HVDC sending-end power grid



图 A2 Hornsea 风电场的电压和有功功率曲线 Fig.A2 Voltage and active power curves of Hornsea wind farm



Fig.A3 Schematic diagram of control strategy switching and protection action during low voltage ride through process of doubly-fed induction generator

图中, i_{sd} 、 i_{sq} 分别为定子侧 d轴、q轴电流; i_{rd} 、 i_{rq} 分别为转子侧 d轴、q轴电流; i_{d} 、 i_{q} 分别为并网点的 d轴、q轴电流; P_{s} 为定子侧输出的有功功率; U_{N} 为并网点的额定电压; I_{N} 为并网点的额定电流; U_{dcref} 、 U_{dc} 分别为直流侧电压的给定值、实际值; I_{sdLVRT} 、 I_{sqLVRT} 分别为低电压穿越期间定子 d轴、q轴电流的给定参考值; i_{aref} 为并网点q轴电流的给定值。