

国外新能源脱网事故对中国电网安全稳定运行的启示

徐式蕴, 王一鸣, 孙华东, 毕经天, 兰天楷

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192)

摘要: 2016至2023年间,美国、澳大利亚和英国共发生了11起新能源大规模脱网事故,严重威胁电网安全稳定运行。文中介绍了这些事故的基本情况,总结分析了事故失稳过程特征和机理,并指出系统强度不足、新能源控制策略不合理、非预想故障防控手段不足是事故发生的主要原因。最后,结合中国电网实际,提出了保障新型电力系统安全稳定运行的建议。

关键词: 电力系统; 安全稳定运行; 脱网; 系统强度; 故障穿越; 新能源; 控制保护

0 引言

随着近年来全球气候变化和能源危机的加剧,世界范围内新能源迅猛发展^[1-2]。根据国际可再生能源署(International Renewable Energy Agency, IRENA)提供的数据,2023年全球新增风力发电装机容量达到116 GW,新增光伏发电装机容量达到346 GW,风电和光伏等新能源装机容量占各类电源总装机容量的比例达到了43%^[3]。与同步发电机不同,风电、光伏等新能源发电设备通过电力电子变流器实现并网运行。其在提供高度的控制可塑性、响应快速性等优势特性的同时,其弱抗扰性也加剧了故障扰动后发生连锁性脱网的风险,给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战^[4-6]。

近年来,由大规模新能源脱网引发的大停电事故得到了国内外的广泛关注^[7]。2016年9月,南澳大利亚州电网受强台风影响连续发生6次电网故障,引发大规模新能源脱网,导致全州85万用户停电数小时^[8]。2019年8月,英国电网因雷击引发的单相短路故障造成了大停电事故,事故最初由新能源电源脱网开始,约100万用户受到停电影响^[9]。与此同时,在2016至2023年期间,美国也发生了多起由电网故障引发的新能源大规模脱网事故,其中,以加利福尼亚州(下文简称“加州”)和得克萨斯州(下文简称“得州”)等地区的事故最为严重和典型^[10-11],给电网的安全稳定运行带来了严峻挑战。

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2024-04-24。

上网日期: 2024-05-24。

国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U2166601);国家自然科学基金面上资助项目(51977197)。

厘清近年来国外新能源脱网事故发生的诱因及失稳机理,对于保障中国能源转型和“双碳”目标下的大电网安全具有重要的现实意义。

本文基于美国、澳大利亚和英国最新公布的新能源脱网事故报告,介绍了历次新能源脱网事故的起因与关键诱因,归纳了事故的共性特征,以期为中国新能源高占比新型电力系统的规划建设与安全稳定运行提供建议与参考。

1 事故概述

对2016至2023年间国外发生的11起新能源脱网事故的概况进行介绍,各次事故起因、新能源功率损失诱因等信息如表1所示。其中,包含美国加州电网5起、美国得州电网3起、美国犹他州电网1起、澳大利亚电网1起、英国电网1起事故。

1.1 美国新能源脱网事故

2024年,美国计划新增风电装机容量近8.2 GW、新增光伏装机容量36.4 GW,其中,一半以上位于加州和得州^[12]。

1.1.1 加州新能源脱网事故

2016至2023年间,北美电力可靠性委员会(North American Electric Reliability Council, NERC)共报告了5起发生于加州的新能源大规模脱网事故。

1) 2016年8月 Blue Cut 扰动事故^[10]

2016年8月16日10时36分(UTC-7),加州 Blue Cut 附近的山火引发了3条500 kV输电线路和2条287 kV输电线路相继跳闸。截至当日24时,该地区共发生了15次跳闸,其中,4次导致了光伏大规模脱网,发生于11时45分的线路跳闸造成了约1.2 GW的新能源功率损失。事故期间,美国西部电

表1 本文涉及的新能源脱网事故
Table 1 Renewable energy outage accidents covered in this paper

地区(时区)	序号	日期	事故地点	事故起因	新能源功率损失的诱因	新能源功率损失/MW
美国加州 (UTC-7)	1	2016-08-16	Blue Cut ^[10]	输电线路相间故障、输电线路单相接地故障	低频保护动作、故障穿越策略不合理等	1 178
	2	2017-10-09	Canyon ^[13]	输电线路相间故障	故障穿越策略不合理、过压保护动作、失步保护动作、直流电流保护动作等	937
	3	2018-04-20	Angeles Forest ^[14]	输电线路相间故障	故障穿越策略不合理、过压保护动作、直流电流保护动作等	877
	4	2018-05-11	Palmdale Roost ^[14]	输电线路单相接地故障	故障穿越策略不合理、过压保护动作、直流电流保护动作等	711
	5	2020-07-07	San Fernando ^[15]	输电线路单相接地故障	过流保护动作、低压保护动作、故障穿越策略不合理等	1 000
美国得州 (UTC-5)	1	2021-05-09	Odessa ^[11]	同步发电机升压变压器单相接地故障	失步保护动作、过压保护动作、故障穿越策略不合理等	1 148
	2	2022-03-22	Panhandle ^[16]	输电线路相间故障	并网线路中断、过压保护动作等	765
	3	2022-06-04	Odessa ^[17]	同步发电机故障、输电线路单相接地故障	过流保护动作、相位跳变保护动作、过压保护动作、低频保护、故障穿越策略不合理等	1 711
美国犹他州 (UTC-7)	1	2023-04-10	Southwest Utah ^[18]	输电线路单相接地故障	过电流保护动作、锁相环(phase-locked loop, PLL)失步保护动作等	921
澳大利亚 (UTC+10)	1	2016-09-28	South Australia ^[8]	输电线路多次故障	最大故障穿越次数保护动作	445
英国(UTC)	1	2019-08-09	England ^[9]	输电线路单相接地故障	移相保护动作(分布式新能源)、过流保护动作(集中式新能源)	1 237

注:该起事故连续发生了多次故障,表中红色数字为单次故障造成的最大新能源功率损失量。

网频率显著下降,频率最低点为59.87 Hz。

2)2017年10月Canyon扰动事故^[13]

2017年10月9日(UTC-7),加州Canyon地区山火导致了1条220 kV和1条500 kV输电线路在短时间内分别发生了1次相间故障,共造成超过900 MW的新能源功率损失。

3)2018年4月Angeles Forest扰动事故^[14]

2018年4月20日17时11分(UTC-7),加州Angeles Forest附近的1条500 kV输电线路发生相间短路故障,造成多个光伏电站脱网或降功率运行,损失功率共计877 MW。此外,事故还引发联合循环电厂的燃气轮机跳闸和降功率运行,功率损失达到200 MW。

4)2018年5月Palmdale Roost扰动事故^[14]

2018年5月11日(UTC-7),加州Palmdale Roost附近的1条500 kV输电线路因绝缘子闪络引发单相接地故障,事故造成了超过700 MW的新能源功率损失。

5)2020年7月San Fernando扰动事故^[15]

2020年7月7日11时38分(UTC-7),加州San Fernando地区的1条220 kV输电线路发生单相接地故障,故障造成约205 MW的新能源功率损失。11时41分,第1条线路重合闸成功,但第2条线路因

保护误动而再次三相跳闸,进而引发了1 GW的新能源功率损失。

1.1.2 得州新能源脱网事故

2021至2023年间,NERC共报告了3起发生于得州的新能源大规模脱网事故。

1)2021年5月Odessa扰动事故^[11]

2021年5月9日11时21分(UTC-5),得州Odessa地区某电厂的升压变压器发生了单相接地故障,导致该区域内各电压等级母线电压大幅降低。本次事故造成联合循环电厂的功率损失约192 MW,光伏电站功率损失约1 112 MW、风电场功率损失约36 MW。

2)2022年3月Panhandle扰动事故^[16]

2022年3月21至22日(UTC-5),恶劣天气造成得州Panhandle地区的345 kV输电线路跳闸。第1次事故发生于22日4时16分,距离某变电站约3.2 km的风电场345 kV并网连接线上发生相间故障。事故造成了10个风电场的功率损失共计765 MW,电网频率降低至59.94 Hz。第2次事故发生于31 min后,距离同一变电站约4.8 km的某345 kV输电线路发生相间故障,事故期间风电场出力大幅下降,8个风电场的功率损失共计457 MW。故障发生时得州电网的等效惯量约为130.4 GW/s,事故引发的最

大频率变化率约为 0.098 Hz/s, 频率最低点为 59.94 Hz。

3) 2022年6月 Odessa 扰动事故^[17]

2022年6月4日12时59分(UTC-5), 得州 Odessa 地区1条345 kV 输电线路发生单相接地故障。与此同时, 电流互感器饱和又造成相邻同步发电机因保护误动作而跳闸, 以及约724 km 外同步发电机因失去励磁而跳闸。事故造成光伏电站减少出力约1.7 GW, 同步发电机出力损失844 MW, 电网频率下降至59.7 Hz。

1.1.3 犹他州新能源脱网事故^[18]

2023年4月10日8时51分(UTC-7), 犹他州的1条345 kV 输电线路发生单相接地故障, 事故引发新能源功率损失达921 MW, 占实时电源出力比例的15%, 系统频率下降约0.12 Hz。

1.2 澳大利亚新能源脱网事故

2016年9月28日(UTC+10), 异常天气造成 South Australia 地区电网在短时间内连续发生6次输电线路跳闸, 引发了9个风电场出现新能源脱网, 脱网规模达到445 MW。随后, 电网频率迅速下降至47 Hz 以下, 进而引发了涉及全州的大停电事故, 直至故障后50 h 全部负荷才恢复供电^[8]。

1.3 英国新能源脱网事故

2019年8月9日(UTC 0), 雷击引发 England 地区 Eaton Socon-Wymondley 附近的输电线路发生单相接地故障, 随后引发霍恩海上风电场、分布式新能源等大规模脱网, 累计新能源功率损失达到1 237 MW, 频率最低点达到48.8 Hz^[9]。

2 新能源脱网事故的诱因分析

通过对上述新能源脱网事故诱因进行系统性的分析和归纳, 可概括为以下4类。

1) 诱因1: 弱交流系统对高比例新能源支撑能力不足。

2) 诱因2: 新能源控制策略、配置原则缺乏完善规范。

3) 诱因3: 电网故障诱发新能源频率、电压等常规保护动作。

4) 诱因4: 恶劣天气等外部条件造成新能源设备故障。

其中, 诱因1、2、3 频繁出现于本文所涉及的大次新能源脱网事故中(分别占26.5%、47.1%、23.5%), 诱因4 仅出现在 Panhandle 扰动事故中(占2.9%)。

2.1 系统强度不足

文献[19]将机械惯性很小或者阻抗很大的系统

视为弱系统, 充足的系统强度是确保电力系统稳定运行和可靠供电的关键。系统强度涵盖电压强度和频率强度2个维度。随着新能源的快速发展, 系统强度显著降低, 电网对新能源的支撑能力面临巨大挑战, 主要表现在以下2个方面。

1) 传统火电机组装机容量少, 电力系统广义惯量不足: 广义惯量可有效衡量高比例新能源电力系统的频率支撑能力。当系统广义惯量较低时, 相同的新能源脱网容量将引发更大的频率幅值变化^[20]。在上述新能源脱网事故中, 事故前传统火电机组往往处于关停或冷备用状态, 惯量水平不足。故障发生后, 系统频率大范围波动引发新能源频率保护动作切机, 甚至可能引起系统低频减载动作等连锁性事件, 进一步加剧了新能源的脱网风险。在2016年9月南澳大利亚州、2019年8月英国、2022年6月美国 Odessa 等扰动事故中, 均存在系统频率波动引发新能源脱网的情况。

2) 高比例新能源接入弱电网, 电力系统电压支撑不足: 电压支撑强度体现了在给定的初始运行状态下, 系统遭受扰动后维持电压稳定的能力, 可采用短路比、阻抗比等指标衡量^[21]。随着新能源接入规模提升, 新能源并网系统的新能源多场站短路比显著降低, 电压稳定裕度也随之减小^[22]。在低短路比等弱电压支撑条件下, 故障扰动期间往往观测到新能源机端或场站并网点电压更为剧烈的振荡, 加剧了因控制环节失稳引发的新能源脱网风险。2019年8月的英国扰动事故报告指出, 由线路短路引发的弱电网运行条件是诱发停电事故的重要原因之一^[9]。

2.2 新能源控制策略不合理

新能源逆变器的PLL动态、故障穿越策略等控制策略均会对电力系统受扰后的响应过程产生影响。不合适的PLL控制策略或不合理的故障穿越策略都可能导致新能源脱网事故的发生。

2.2.1 PLL控制保护策略

典型跟网型逆变器PLL环节的控制方程^[23]为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_g \\ \dot{\omega} = k_i u_q + k_p \dot{u}_q \end{cases} \quad (1)$$

$$u_q = R_{eq} i_q + \omega L_{eq} i_d - u_g \sin \delta \quad (2)$$

式中: δ 为锁相角; ω 为锁相角频率; ω_g 为锁相角频率的基值; k_p 和 k_i 分别为PLL控制器的比例、积分系数; i_d 、 i_q 分别为采样点处电流的 d 、 q 轴分量; R_{eq} 、 L_{eq} 分别为并网等效电阻、电抗; u_g 为电网电压的幅值; u_q 为采样点处电压的 q 轴分量。

PLL控制方程可等效为:

$$J\ddot{\delta} + D\dot{\delta} - C + u_g \sin \delta = 0 \quad (3)$$

式中： D 、 J 、 C 为表征PLL性能的参数， $D = k_p k_i^{-1} u_g \cos \delta - L_{eq} i_d$ ， $J = (1 - k_p L_{eq} i_d) k_i^{-1}$ ， $C = \omega_g L_{eq} i_d + R_{eq} i_q$ 。当与 D 相关的阻尼性能不佳时，表现为锁相角的弱/负阻尼振荡失稳；当与 J 相关的同步性能不佳时，表现为锁相角的非周期失稳^[24]。具体而言，较大的并网阻抗、较大的电压跌落深度、较长的故障持续时间均会增加新能源的PLL失步风险^[25]。

由于美国部分新能源厂家设置了PLL失步保护，一旦短时间内PLL锁相角与电网采样点电压相位之差超过阈值，该保护将动作，从而造成新能源脱网。与PLL失步相关的新能源脱网现象出现于美国San Fernando、Odessa等事故中。NERC可靠性指南发布了关于解决PLL失步的明确建议^[26]指出：由于PLL能够在若干周期后重新与电网同步，并能迅速恢复到预期的电流注入值，PLL失步不应造成逆变器脱网。设备制造商和运营商应分析和明确可能引发逆变器瞬时相位变化的原因，从而确定可能出现的最恶劣相位跳变。

此外，部分新能源制造商还设置了被动防孤岛保护。该保护通过检测故障恢复过程中电压与电流之间的角度差而动作。在Odessa 2022年事故中，电网相角在500 ms内偏移大于 15° ，故被逆变器误认为孤岛信号。NERC可靠性指南^[26]指出：逆变器的被动防孤岛保护主要适用于分布式新能源接入的场景，对于大规模新能源并网系统，尤其针对相角大幅变化的场景，此保护容易引发新能源误脱网，影响电力系统的可靠性，应予以禁用。

2.2.2 新能源故障穿越策略

不合理的新能源故障穿越策略同样可能诱发新能源脱网。故障期间，美国电网中3种典型的新能源故障穿越模式如下：

1) 连续运行：新能源正常向电网注入电流。

2) 暂时停止：新能源与电网间保持物理连接，但新能源不向电网注入电流。该模式由电网电压跌落触发，待电压恢复至触发值后，退出故障穿越策略并正常向电网注入电流。

3) 脱网：新能源通过保护装置主动断开与电网间的物理联系，并延迟一段时间后重新投入，典型的延迟时间为5 min。

NERC制定的《PRC-024-3 电源的频率和电压保护设置》标准^[27]仅对“连续运行”和“脱网”区进行

了规定，如图1所示，但并未禁止“暂时停止”模式。由于设备厂家将上述标准中关于“连续运行区”的规定错误解读为故障穿越期间可采用“暂时停止”模式，导致了脱网事故的发生。在Blue Cut和Canyon扰动事故后，NERC建议：新能源应最大限度避免采用“暂时停止”模式，若确因设备限制而无法改造，也应调低“暂时停止”模式的触发阈值^[26]。建议发出后，涉事区域内67%的新能源场站都采用了新的穿越策略，18%的新能源场站通过调低触发阈值来降低故障风险，15%的新能源场站因设备性能限制尚未进行改造。

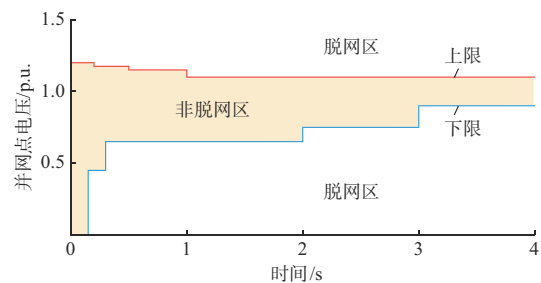


图1 PRC-024-3标准中电压穿越曲线
Fig. 1 Voltage ride-through curves in PRC-024-3 standard

此外，为了避免连续故障引发的新能源设备损坏，部分新能源厂家还设置了新能源故障穿越最大次数。在2016年9月South Australia扰动事故中，South Australia在运的风电机组广泛设置了2 min内5~9次不等的最大穿越次数。在本次事故中，输电线路的连续6次故障造成9个风电场因达到最大穿越次数后保护动作脱网，其余5个风电场则进入降功率运行模式。

2.3 电网故障后逆变器保护动作

2.3.1 频率保护

IEEE 1547标准^[25]建议：当新能源逆变器频率低于57 Hz或高于62 Hz时，应立即脱网。美国Blue Cut、Canyon、Panhandle、Odessa 2021年和Odessa 2022年事故中均出现与逆变器低频保护动作相关的新能源脱网，主要原因包括：电压波形失真引发的频率计算错误、故障前后相角跳变等。其中，电压波形失真主要由测量装置误差造成，可通过升级改造硬件性能加以避免。下面以单逆变器经双回路接入交流系统为例对相角跳变现象进行说明。假设 $t=0$ 时刻发生断线故障，故障后逆变器通过单回路与主网相连。故障发生前、后新能源并网等效电阻 R_{eq} 和电抗 L_{eq} 分别为：

$$\begin{cases} R_{eq}^{0-} = R_1 R_2 \frac{1}{R_1 + R_2} \\ L_{eq}^{0-} = L_1 L_2 \frac{1}{L_1 + L_2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} R_{eq}^{0+} = R_1 \\ L_{eq}^{0+} = L_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为并联线路 1、2 的电阻; L_1 和 L_2 分别为并联线路 1、2 的电抗; R_{eq}^{0-} 、 L_{eq}^{0-} 和 R_{eq}^{0+} 、 L_{eq}^{0+} 分别为故障前和故障后的等值电阻、电抗。

由故障前、后等效阻抗变化引发的相角跳变量 $\Delta\delta$ 为:

$$\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1 = \arcsin [(R_{eq}^{0+} i_q^{0+} + \omega_g L_{eq}^{0+} i_d^{0+} - u_q^{0+})(u_g^{0+})^{-1}] - \arcsin [(R_{eq}^{0-} i_q^{0-} + \omega_g L_{eq}^{0-} i_d^{0-} - u_q^{0-})(u_g^{0-})^{-1}] \quad (6)$$

式中: δ_1 和 δ_2 分别为故障前、后的相角; u_g^{0-} 、 u_g^{0+} 分别为故障前、后电网电压的幅值; u_q^{0-} 、 u_q^{0+} 分别为故障前、后采样点处电压 q 轴分量; i_q^{0-} 、 i_q^{0+} 分别为故障前、后采样点处电流 q 轴分量; i_d^{0-} 、 i_d^{0+} 分别为故障前、后采样点处电流 d 轴分量。

相角瞬间跳变量 $\Delta\delta$ 将进一步导致 PLL 角频率产生突变量 $\Delta\omega$ 。当 $\Delta\omega$ 触发频率保护动作阈值 ω_{thr} 时, 新能源将因频率保护动作而脱网。与上述故障过程类似, 在发生短路故障的情况下, 电网电压在扰动瞬间发生大幅跌落, 同样将造成频率突变, 若突变量超过频率保护动作阈值, 也会导致新能源脱网。

2.3.2 过电压保护

在 Canyon、Angeles Forest、Odessa 等事故中, 均出现了新能源机端过电压引发过电压保护动作造成的新能源脱网。针对新能源单机并网系统, 若 $t=t_0$ 时刻发生三相短路故障, 则故障后系统电压变化过程如图 2 所示。

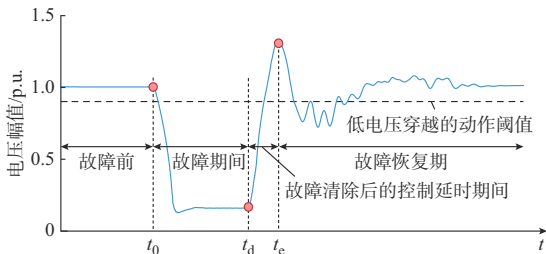


图 2 三相短路故障后系统电压响应曲线

Fig. 2 Voltage response curve of system after three-phase short-circuit fault

由图 2 可知, 在故障持续过程中 ($t_0 \leq t \leq t_d$), 电网电压跌落, 为了支撑故障期间的电网电压, 新能源向电网注入一定的无功功率。在故障清除后的控制延时期间 ($t_d < t \leq t_c$), 电网电压恢复至额定值, 但新

能源依然向电网注入无功功率, 从而引发新能源机端过电压现象, 详细机理如文献[28]所述。

此外, Odessa 2021 年扰动事故还报告了某场站因馈线的交流过电压保护而脱网的案例, 上述保护的动作为阈值为 1.2 p.u., 共造成 147 MW 的光伏电站脱网, 其产生机理与设备级过电压类似。

2.3.3 过电流保护

故障时, 电网结构发生变化, 相比于负荷阻抗, 故障回路中线路阻抗小, 导致故障时电流增大, 从而触发过电流保护动作。在 San Fernando 和 Odessa 2022 年事故中均出现了过电流保护动作而引发的新能源脱网事故。值得注意的是, PRC-024-3 标准并未涉及交流过电流保护的相关规定^[27]。在 San Fernando 事故中, 交流过电流保护的动作为阈值被设置为额定电流的 1.5 倍, 是导致此次风电脱网事故的重要原因。

2.3.4 次同步振荡保护

近年来, 由新能源参与的次同步振荡事件频繁发生于各国实际电网工程中^[29]。新能源动态由控制主导, 频带响应范围宽、与多样化设备间交互复杂, 次同步振荡成为影响新能源稳定运行的主要原因之一^[30]。在 Panhandle 事故中, 新能源场站监测到了次同步振荡风险, 并在振荡第 1 次不稳定摆动后触发保护跳闸, 引发新能源脱网。

2.4 新能源设备物理构件损坏

Panhandle 事故报告了多个风电场因暂态过程中变桨装置故障而引发风电场脱网的案例。在扰动后的暂态过程中, 变桨装置因机械故障而无法及时响应风机控制系统发出的功率调节信号, 进而触发了风机关于变桨装置失效的保护而主动停运。

3 对中国电网安全稳定运行的启示

3.1 提升大电网对新能源的支撑能力

从澳大利亚“9·28”、英国“8·9”等事故可以看出, 由于系统强度不足, 导致故障后近区不同设备厂商、不同机组类型的新能源场站几乎全部脱网, 造成的有功缺额进一步引发连锁性事故的发生。

为解决上述问题, 应持续开展中国新型电力系统广义惯量水平、新能源多场站短路比等系统强度的实时监测评估。对于系统强度不足区域, 积极推进火电机组的灵活性改造, 充分发挥调相机等支撑装备对系统强度的提升作用, 进一步突破构网型无功补偿设备/储能等关键技术, 持续提升大电网对新能源的支撑能力, 促进新能源的安全高效消纳。

3.2 提升新能源自身的故障穿越能力

根据新能源并网运行要求,故障扰动期间,新能源电源应为电网提供必要的功率支撑。然而,美国现行的 PRC-024-3 标准仅规定了新能源保持并网的运行区间,并未对具体的故障穿越策略、新能源出力特性进行明确界定。部分设备制造商通过设置故障穿越策略来解决可能的过流问题,但与此同时削弱了新能源在故障扰动期间对电网的支撑能力,使得电网面临频率失稳风险。与故障穿越策略相关的新能源出力降低或脱网出现于本文所涉及的全部事故中。

因此,为保障新型电力系统的安全稳定运行,一方面,需要加快制定规范的新能源并网技术标准,并根据新场景、新问题不断完善和澄清现行规范可能存在的适用性盲区;另一方面,需要持续开展新能源故障穿越能力评估与提升方法研究,满足电网在不同安全稳定制约因素下的运行需求,有效避免新能源脱网事故。

3.3 规范新能源的保护配置原则

由于尚无完善的新能源保护系统设计规范,在满足基本的电压、频率涉网性能的要求下,不同厂家可能配置不同的“个性化”保护。例如,Canyon、Odessa 等扰动事故中错误采用了并网点电压瞬时值作为过电压保护动作依据,而未能依照规定采用机端电压有效值;Canyon、San Fernando、Odessa 等事故中,部分新能源因 PLL 失步保护动作而脱网;Odessa 事故中,部分新能源因馈线过电压保护动作而脱网。

针对上述问题,应不断规范和完善新能源电压、频率等常规保护的配置原则,加强新能源差异化保护的并网测试验证,并督促设备运营商遵守并网导则要求,向电网运行调度机构提交完整的新能源发电设备模型,降低由新能源保护误动作引发的脱网风险。

3.4 加强非预想故障下的预警及防控能力

从本文新能源脱网案例中发现,诱发原因除电网自身故障外,还包括了森林火灾、风暴等与异常天气强相关的非预想故障。如 Blue Cut、Canyon 扰动事故与高温天气引发的山火相关。

上述非预想故障难以通过常规安全稳定控制措施进行防范,需要建立应对新能源出力随机波动性引发的非典型运行方式下,异常天气引发的多回路断线、新能源连锁性脱网等非预想故障的预警机制,研究基于大电网实时响应信息的安全稳定分析及防控技术,缩小新能源脱网事故的波及范围,保障高比例新能源接入大电网的安全稳定运行。

4 结语

本文梳理了 2016 至 2023 年间国外发生的 11 起新能源脱网事故,分析了事故的共性诱因及失稳机理。由历次事故总结的经验和教训可知,为保证中国新型电力系统安全稳定运行,需要持续提升电网对新能源的支撑能力,深入挖掘常规电源的潜力,不断突破新型调相机、构网型无功补偿设备/储能等新型技术,确保充足的电压、频率支撑强度;与此同时,制定和完善新能源涉网标准,规范新能源保护的配置原则,优化新能源控制策略,提升新能源涉网性能;此外,还应建立非预想故障引发新能源脱网的预警机制,提升极端天气、超高负荷等关键场景下的新能源故障穿越能力,突破非预想故障下的大电网安全稳定实时防控技术。

参考文献

- [1] 周孝信,赵强,张玉琼.“双碳”目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术[J].中国电力企业管理,2021(31):14-17.
ZHOU Xiaoxin, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Development prospect and key technologies of China energy and power system under the goal of carbon peaking and neutrality [J]. China Power Enterprise Management, 2021(31): 14-17.
- [2] International Energy Agency (IEA). World energy outlook 2023 [R/OL]. (2023-10-01) [2024-04-21]. <https://origin.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable capacity statistics 2024 [R/OL]. (2024-03-01) [2024-04-21]. <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024>.
- [4] 2023 global electricity review [R/OL]. (2023-04-12) [2024-04-21]. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>.
- [5] 孙华东,徐式蕴,许涛,等.电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7796-7809.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809.
- [6] 电力系统安全稳定导则:GB 38755—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
Code on security and stability for power system: GB 38755—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [7] 孙华东.国外大停电事故分析[M].北京:中国电力出版社,2022.
SUN Huadong. Analysis of blackouts in foreign countries [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2022.
- [8] AEMO. Black system South Australia 28 September 2016 [R/OL]. (2017-03-28) [2024-03-16]. <https://apo.org.au/sites/default/files/resou-rce-files/2017-03/apo-nid74886.pdf>.
- [9] National grid ESO. Technical report on the events of 9 August 2019 [R/OL]. (2022-12-01) [2024-03-16]. <https://www.nationalgrideso.com/document/152346/download>.

- [10] NERC and WECC. 1,200 MW fault induced solar photovoltaic resource interruption disturbance report [R/OL]. (2017-06-08) [2024-03-16]. <https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/Pages/1200-MW-Fault-Induced-Solar-Photovoltaic-Resource-Interruption-Disturbance-Report.aspx>.
- [11] NERC and Texas RE. Odessa disturbance [R/OL]. (2021-09-15) [2024-03-16]. https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/Documents/Odessa_Disturbance_Report.pdf.
- [12] RAY S. Solar and battery storage to make up 81% of new U.S. electric-generating capacity in 2024 [EB/OL]. (2024-02-15) [2024-04-21]. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php>.
- [13] NERC and WECC. 900 MW fault induced solar photovoltaic resource interruption disturbance report [R/OL]. (2018-03-23) [2024-03-16]. <https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/October20920201720CanyonFireReport.pdf>.
- [14] NERC and WECC. April and May 2018 fault induced solar photovoltaic resource interruption disturbances report [R/OL]. (2019-01-22) [2024-03-16]. <https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/Pages/April-May-2018-Fault-Induced-Solar-PV-Resource-Interruption-Disturbances-Report.aspx>.
- [15] NERC and Texas RE. San Fernando disturbance [R/OL]. (2022-07-07) [2024-03-16]. https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/Documents/San_Fernando_Disturbance_Report.pdf.
- [16] NERC and Texas RE. Panhandle wind disturbance [R/OL]. (2022-03-22) [2024-03-16]. https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/Documents/Panhandle_Wind_Disturbance_Report.pdf.
- [17] NERC and Texas RE. 2022 Odessa disturbance [R/OL]. (2021-03-01) [2024-03-16]. https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/NERC_2022_Odessa_Disturbance_Report%20%281%29.pdf.
- [18] NERC and WECC. 2023 Southwest Utah disturbance [R/OL]. (2023-08-24) [2024-03-16]. https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/NERC_2023_Southwest_UT_Disturbance_Report.pdf.
- [19] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [20] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [21] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-515.
- YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-515.
- [22] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-506.
- SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-506.
- [23] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述 [J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367-3383.
- GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [24] WANG Y M, SUN H D, XU S Y, et al. Transient stability analysis and improvement for the grid-connected VSC system with multi-limiters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1979-1995.
- [25] IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces: IEEE 1547-2018 [S/OL]. (2018-04-06) [2024-04-21]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/833211>.
- [26] NERC. Reliability guideline improvements to interconnection requirements for BPS-connected inverter-based resources [R/OL]. (2019-09-01) [2024-04-21]. https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/Reliability_Guideline_IBR_Interconnection_Requirements_Improvements.pdf.
- [27] NERC. Frequency and voltage protection settings for generating resources: PRC-024-3 [S/OL]. (2019-09-20) [2024-03-16]. <https://www.nerc.com/pa/Stand/Reliability%20Standards/PRC-024-3.pdf>.
- [28] 徐式蕴, 孙华东, 王姝彦, 等. 高比例电力电子电力系统过电压(二): 交流对称故障下暂态工频过电压机理 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1701-1712.
- XU Shiyun, SUN Huadong, WANG Shuyan, et al. Overvoltage of the power system integrated with high proportion of power electronics equipment (II): mechanistic analysis of transient power frequency overvoltage caused by AC symmetrical fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1701-1712.
- [29] CHENG Y Z, FAN L L, ROSE J, et al. Real-world subsynchronous oscillation events in power grids with high penetrations of inverter-based resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 316-330.
- [30] 陈露洁, 徐式蕴, 孙华东, 等. 高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2297-2310.
- CHEN Lujie, XU Shiyun, SUN Huadong, et al. A survey on wide-frequency oscillation for power systems with high penetration of power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2297-2310.

徐式蕴(1985—),女,博士,教授级高级工程师,硕士生导师,主要研究方向:电力系统稳定性分析与控制。E-mail: xushiyun@epri.sgcc.com.cn

王一鸣(1994—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统稳定性分析与控制。E-mail: wangyimi20@mails.tsinghua.edu.cn

孙华东(1975—),男,通信作者,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要研究方向:电力系统稳定性分析与控制。E-mail: sunhd@epri.sgcc.com.cn

(编辑 顾晓荣)

Insights from Renewable Energy Outage Accidents Abroad for Secure and Stable Operation of Power Grids in China

XU Shiyun, WANG Yiming, SUN Huadong, BI Jingtian, LAN Tiankai
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: From 2016 to 2023, eleven significant outage accidents related to the renewable energy occurred in the United States, Australia, and the United Kingdom, which posed severe threats to the secure and stable operation of power grids. The basic situation of these accidents are introduced, and their instability process characteristics, and mechanism are summarized and analyzed. It identifies the insufficient system strength, irrational renewable energy control strategies, and a lack of unanticipated fault prevention measures as the primary reasons for these accidents. Finally, combined with the reality of the power grids in China, some recommendations are proposed to ensure the secure and stable operation of the new power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (No. U2166601) and National Natural Science Foundation of China (No. 51977197).

Key words: power system; secure and stable operation; outage; system strength; fault ride-through; renewable energy; control and protection

