

“4·28”西班牙、葡萄牙大停电事故分析及对我国电网的启示

郭琦, 王庆红, 谭伟涛, 王宏, 刘沁莹, 常东旭, 刘宇明

(南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 2025年4月28日, 西班牙、葡萄牙两国电网发生安全稳定破坏和大面积停电事故, 停电总时长超18 h, 逾5 000万民众用电受到影响。首先介绍西班牙、葡萄牙电力系统的电源、电网及负荷概况; 然后, 结合西班牙政府、西班牙电网运营商、欧洲输电系统运营商提供的事故调查报告, 全面梳理了从事前系统运行状态、事故经过到系统恢复的事故各阶段发展过程, 总结了事故原因; 最后, 结合我国电力系统实际提出了新能源高渗透率背景下防范大面积停电事故的启示建议。

关键词: 西班牙电力系统; 大停电事故; 安全稳定; 动态无功功率控制; 新能源并网管理; 安全防御体系

Analysis on Blackout in Spanish and Portuguese Power Systems on April 28 th, 2025 and Its Enlightenment to Power System in China

GUO Qi, WANG Qinghong, TAN Weitao, WANG Hong, LIU Qinying, CHANG Dongxu, LIU Yuming

(Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: On April 28th, 2025 Power systems in Spain and Portugal suffered stability destruction and massive blackout. The total power outage duration exceeded 18 hours, affecting the power supply for over 50 million people. The power system overview for Spain and Portugal, including the generation, power network and load profiles, are firstly introduced in this paper. Then, the entire development process of failure and blackout are presented based on the blackout investigation reports provided by the Spanish government and the Spanish power system operator, covering the system operation status before the fault, the failure progression, and the system restoration phases, and the causes of the blackout are summarized. Finally, based on the actual situation of power systems of China, suggestions are proposed for preventing large-scale power outages in the context of high penetration of renewable energy.

Key words: Spanish power system; blackout; security and stability; dynamic reactive power control; renewable energy integration management; security defense system

0 引言

当地时间2025年4月28日12:33, 西班牙、葡萄牙(以下简称“西葡”)发生全国性大停电事故, 电网完全崩溃, 损失负荷约35 000 MW, 停电总时长

超过18 h。两国多地交通、通信、互联网、医疗、供水等关键领域一度瘫痪, 逾5 000万民众用电受到影响。此次事故是近年来全球首例以过电压为主导、新能源大规模脱网为特征的区域性电网崩溃事件, 也是欧洲近20年最严重的大停电事故, 其发展之迅速、影响之广泛, 引起全球能源电力行业广泛关注。

当前, 我国正处于新型电力系统建设的关键时期^[1], 新能源渗透率持续攀升, 部分区域电网结构和运行方式(如高比例新能源集中接入、打捆送出等)与西葡电网存在一定相似性^[2], 深入剖析此次事故, 不仅有助于揭示“双高”电力系统的新型失稳

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFA1004600); 国家自然科学基金资助项目(U23B6008); 中国南方电网有限责任公司科技项目(ZDKJXM20240024)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFA1004600); the National Natural Science Foundation of China (U23B6008); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZDKJXM20240024).

机理,更可为我国电网规避类似风险提供关键参考。

本文首先介绍了西葡两国电力系统的电源、电网及负荷概况。然后,结合西班牙政府、西班牙电网运营商、欧洲输电系统运营商提供的事故调查报告^[3-5],系统梳理了此次西葡大停电事故的各阶段发展过程,分析事故的直接原因及深层次问题。最后,结合我国电力系统实际提出了在新能源高渗透率的背景下防范大面积停电事故的启示建议。

1 西班牙、葡萄牙电力系统概况

1.1 电源概况

西班牙、葡萄牙位于欧洲西南部伊比利亚半岛,其电源装机情况如图 1 所示。截至 2024 年底,西班牙总装机容量达到 129 GW^[6],其中光伏占 26.9%(主要分布在西南地区,单个电站最大容量为 556 MW),风电占 24.9%,气电占 20%,水电占 13.2%,核电占 5.5%,生物质占 4.6%,其他占 4.9%。年发电量为 262 TWh,年度新能源电量渗透率为 41%,新能源高渗透率运行已成为显著特征。2025 年 4 月 16 日,西班牙历史上首次实现了 100%可再生能源供电^[7]。

截至 2024 年底,葡萄牙电网总装机容量达到 26.4 GW^[8],其中水电占 31.7%,风电占 20.5%,化石能源占 16.8%,光伏占 14.7%,抽水蓄能占 13.6%,生物质占 2.7%。年发电量为 45.6 TWh,年度新能源电量渗透率为 37%。

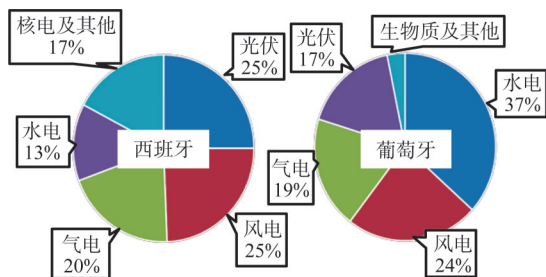


图 1 截至 2024 年底西班牙、葡萄牙发电装机结构
Fig. 1 Power generation capacities of Spain and Portugal by the end of 2024

1.2 电网概况

西班牙、葡萄牙电网的网架结构如图 2 所示^[9],其中,西班牙输电网由该国电网运营商 Red Eléctrica(REE)管理,主要电压等级为 400/220/132

kV,以 400 kV 交流骨干网架与跨国直流互联为主要架构,覆盖约 45 000 km 高压线路和 6 000 余座变电站,服务人口超 4 700 万。葡萄牙输电网由该国电网运营商 Redes Energéticas Nacionais(REN)管理,网架总体上为南北走向,主要电压等级为 400/220/150 kV。

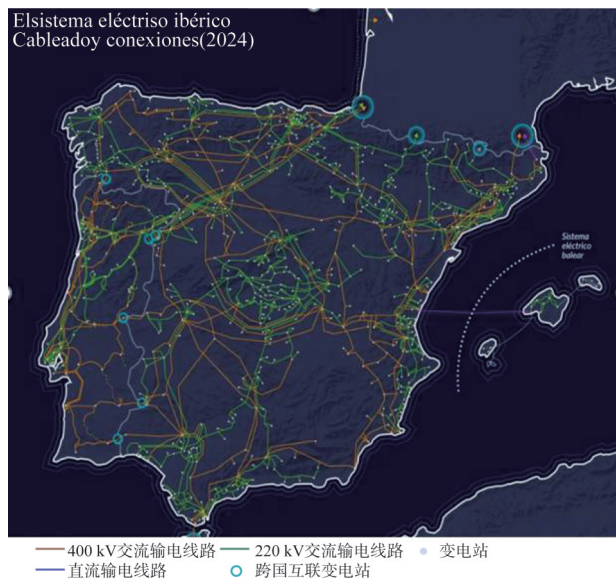


图 2 西班牙、葡萄牙输电网的骨干网架结构

Fig. 2 Backbone grid structures of power transmission networks of Spain and Portugal

在跨国互联方面,葡萄牙电网仅与西班牙电网互联,两者通过 11 回交流联络线紧密连接,构成统一的伊比利亚半岛电网。除此以外,西班牙还与法国、安道尔和摩洛哥电网相联,其中与法国通过 5 回交流(2 回 400 kV,2 回 220 kV,1 回 110 kV)和 2 回 ± 320 kV 直流相联,如图 3 所示。

1.3 负荷概况

2024 年,西班牙电网最大负荷约为 38 270 MW(与我国云南省相当),出现在 1 月 10 日。葡萄牙电网最大负荷约为 9 740 MW(略高于我国海南省),出现在 1 月 8 日。

2 事故过程

2.1 事故前电网运行状态

4 月 28 日,西班牙电力系统分别于 05:49、08:52、10:30、11:06 和 11:23 监测到 5 次振幅较小的低频振荡,振荡频率为 0.2 Hz,属欧洲大陆同步电网固有的“东-中-西”振荡模式^[10](系统东西两端



图3 西班牙、葡萄牙电力系统跨国互联情况

Fig. 3 Interconnection situation of the Spanish and Portuguese power systems

的发电机与欧洲大陆中部的发电机反相振荡,西部以伊比利亚半岛为界,东部以巴尔干半岛为界)。其中06:00前电压相对稳定,波动幅值小于5 kV,09:00开始电压波动增大,10:30后电压波动幅度更大,如图4所示。12:30之前电网电压水平仍保持在运行限值内,未对系统运行造成显著影响。

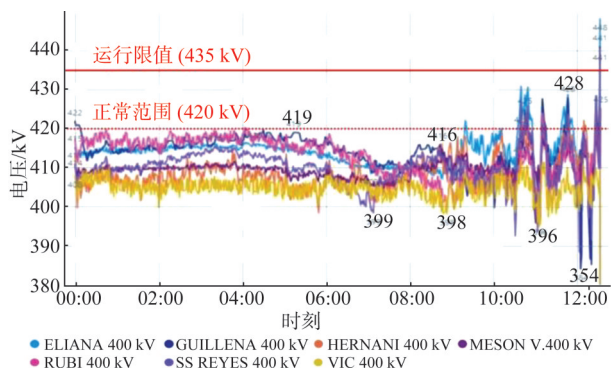
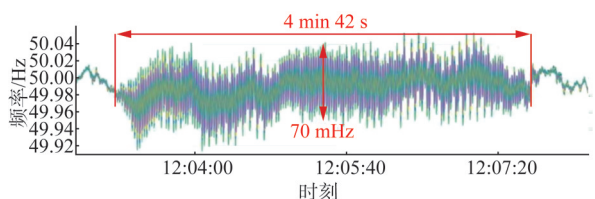


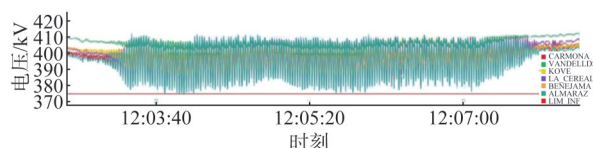
图4 事故当天上午西班牙电网部分400 kV变电站的电压

Fig. 4 Voltages at 400 kV substations in the Spanish power system on the morning of the blackout day

12:03, 电网监测到更加严重的系统振荡,振荡频率为0.6 Hz,疑似为西班牙西南某光伏电站内部控制异常引起的强迫振荡,持续4 min 42 s,引发频率、电压、西-法联络线功率剧烈波动,如图5所示,振荡模态形状可视化如图6所示。此外,在0.6 Hz振荡的末尾,电网还监测到了0.2 Hz的振荡,原因是0.6 Hz振荡出现后,系统阻尼从20%降至5%^[4],激发了0.2 Hz的固有模式振荡。



(a) 西班牙电力系统各节点频率曲线



(b) 西班牙电力系统各节点电压曲线

图5 12:03振荡期间西班牙电力系统频率和电压曲线

Fig. 5 Frequency and voltage curves of the Spanish power system during the oscillation at 12:03

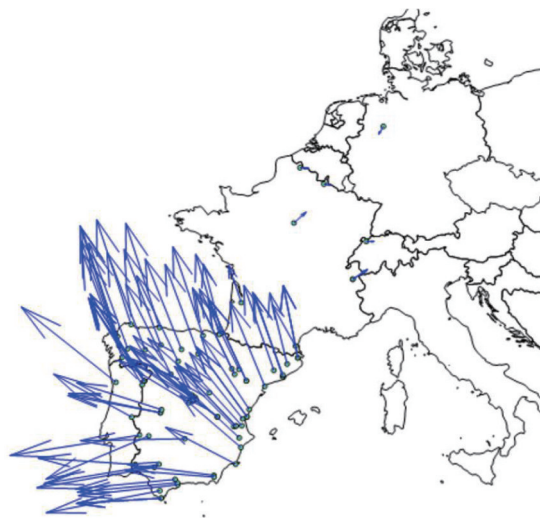


图6 12:03振荡模态可视化(基于REE、REN及其他欧洲电网运营商的广域测量数据)

Fig. 6 Oscillation modal visualization for the oscillation at 12:03 (based on WAMS of REE, REN, and other European TSOs)

12:19—12:22, 系统再次监测到0.2 Hz的固有模式振荡,系统频率、电压大幅波动,如图7所示,振荡模态形状可视化如图8所示,振荡期间西班牙西南地区部分400 kV变电站电压曾短暂降至375 kV以下(运行限值为380~435 kV)。

为抑制振荡,REE通过投入10回400 kV热备用线路、调减西-法联络线设定功率(由2 300 MW两次调减至1 000 MW)、将西-法高压直流联络线运行方式从“交流仿真模式”(该模式下,高压直流通道模拟交流输电的功率传输特性,即传输的有功功率主要由两端换流站的电压和相角差确定)更改为定功率模式(设定值为1 000 MW)等措施增大系

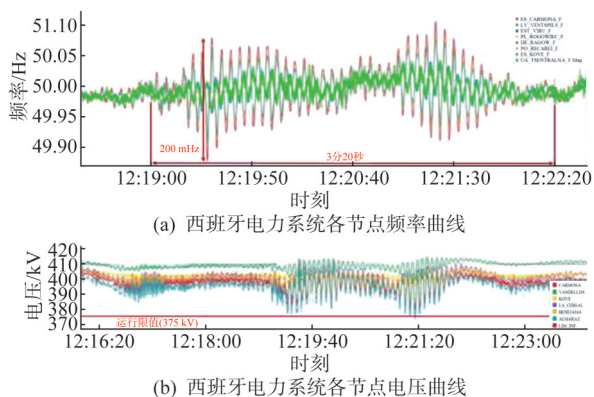


图7 12:19振荡期间西班牙电力系统频率曲线和电压曲线
Fig. 7 Frequency and voltage curves of the Spanish power system during the oscillation at 12:19

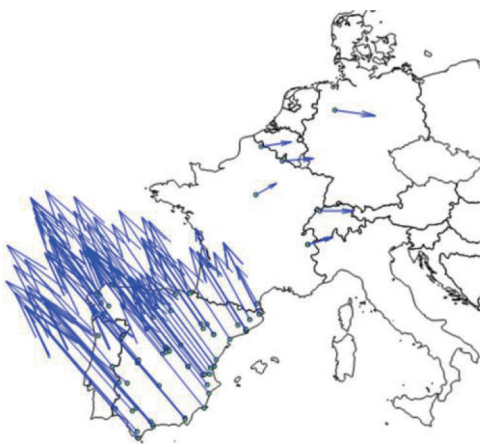


图8 12:19振荡模态可视化(基于REE、REN及其他欧洲电网运营商的广域测量数据)

Fig. 8 Oscillation modal visualization for the oscillation at 12:19 (based on WAMS of REE, REN, and other European TSOs)

统阻尼,但采取上述措施后,电压控制灵活性降低,电压整体水平上升,如图9所示。

事故前(12:30)西班牙电力系统频率接近50 Hz,电压普遍在410~420 kV的范围。电网负荷约

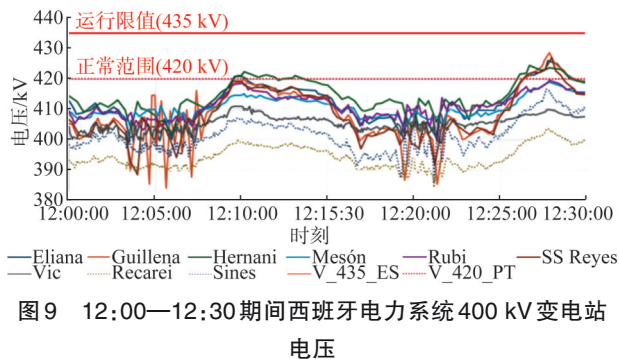


图9 12:00—12:30期间西班牙电力系统400 kV变电站电压

Fig. 9 Voltage curve of 400 kV substations of Spanish power system from 12:00 to 12:30

为25 180 MW(含2 980 MW抽水蓄能电站抽水负荷),向葡萄牙、法国、摩洛哥外送功率的设定值约为2 000 MW、1 000 MW、800 MW,发电结构如表1所示,其中新能源发电占比64.1%。葡萄牙电网负荷约为7 800 MW(含2 100 MW抽水蓄能电站抽水负荷),新能源发电占比70.6%,受入电力2 050 MW,全部来自西班牙。

表1 12:30西班牙电网发电组成

Tab. 1 Power generation composition of the Spanish power system at 12:30

发电类型	占比/%	运行细节
新能源	64.1	光伏、风电
其他可再生能源	17.9	水电、光热等
核电	10	4台机组(2台满负荷)
气电	3	6座电厂
煤电	1	1座电厂
热电联产+垃圾发电	4	分布式电源

2.2 事故经过

12:32后的57 s内,西班牙送法国联络线功率持续下降约1 000 MW(如图10所示),同时约525 MW的小规模电源脱网(其中317 MW为分布式光伏或自发自用电源)。此时,为维持功率平衡,西班牙电网运营商向下调减发电出力,其中,南部新能源由于向下调节平衡服务报价较低,被优先削减,导致无功功率吸收减少(西班牙电网规定新能源均为定功率因数运行,发有功功率的同时也吸收无功功率),电压快速上升。

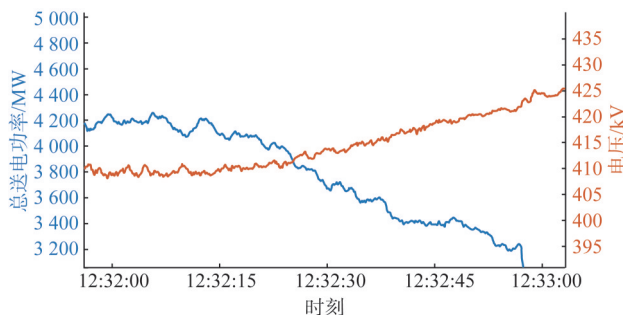


图10 12:32前后西班牙各跨国联络线总送电功率及卡莫纳变电站电压曲线

Fig. 10 Power flow for the interconnectors of Spain and the voltage of Carmona substation around 12:32

12:32:57,西班牙格拉纳达地区发生第一次大电源脱网,损失355 MW发电功率,脱网瞬间400

kV 及 220 kV 电网电压均未超出限值,如图 11 所示,脱网原因为新能源汇集站过压保护整定逻辑有误,保护提前动作。

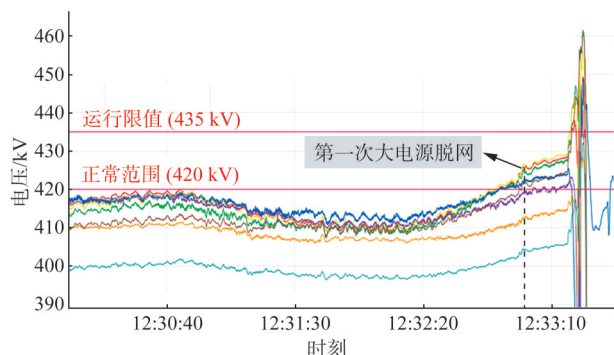


图 11 第一次大电源脱网期间西班牙 400 kV 变电站电压

Fig. 11 Voltage of 400 kV substations of the Spanish power system during the first large-scale generation loss

12:33:16—12:33:17, 西班牙巴达霍斯省发生第二次大电源脱网,损失 730 MW 发电功率,脱网瞬间 400 kV 电网电压未超出限值,推测脱网原因为新能源汇集站 400/220 kV 变压器分接头调节滞后导致 220 kV 侧电压越限,如图 12 所示,引发过电压保护跳闸。

12:33:17—12:33:18, 西班牙塞维利亚等地发生了第三次大电源脱网,损失 1 150 MW 发电功率,脱网原因是新能源过电压保护跳闸。

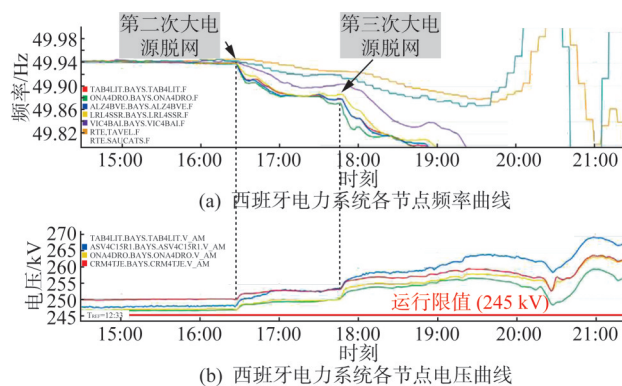


图 12 第二、三次大电源脱网期间西班牙 220 kV 变电站电压及系统频率

Fig. 12 Voltage of 220 kV substations and frequency of the Spanish power system during the second and third large-scale generation loss

3 次大电源脱网位置如图 13 所示^[11],脱网后系统无功吸收能力不断丢失,电网电压持续上升,西-法联络线潮流反转为从法国受入电力。

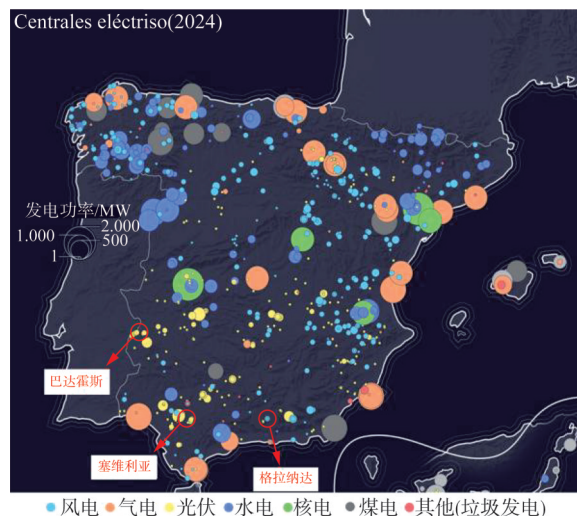


图 13 三次大电源脱网事件的位置

Fig. 13 Location of three large-scale generation loss events

12:33:18 开始,电网出现了局部过电压(400 kV 电网超过 435 kV, 220 kV 电网超过 245 kV)。过电压保护动作导致机组连续脱网。这些机组脱网后,系统无功功率吸收能力进一步下降,过电压问题进一步加剧,最终形成恶性循环并逐步蔓延至整个系统,大量机组“雪崩式”脱网,法国向西班牙送电功率不断增加。

12:33:19, 法国向西班牙送电功率达到 3 800 MW(交流为法送西 4 600 MW, 直流为西送法 800 MW), 功角差超出稳定极限导致同步失稳,引发互联线路功率振荡,如图 14 所示,失步解列保护动作跳闸。

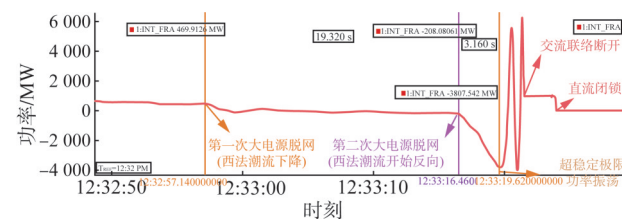


图 14 西-法联络线潮流

Fig. 14 Power flow of Spain-France interconnectors

12:33:20, 系统频率降至 49.5 Hz 以下,至 12:33:22,已连续触发两轮低频切泵和六轮低频减载(具体配置见表 2),但减载导致相关区域电压进一步上升引发更多机组脱网,未能有效遏止功率不平衡量扩大,最终频率持续跌落至 48 Hz 以下,电压持续上升,电源连续脱网,如图 15 所示,其中绿线为欧洲大陆电网频率,红线为西班牙电网电

压、蓝线为西班牙电网频率。

表 2 西班牙电力系统低频减载配置情况
Tab. 2 Configuration of the low-frequency load shedding of the Spanish power system

类型	动作轮次	动作阈值/Hz
低频切泵	1	49.5
	2	49.3
低频减载	1	49
	2	48.8
	3	48.6
	4	48.4
	5	48.2
	6	48

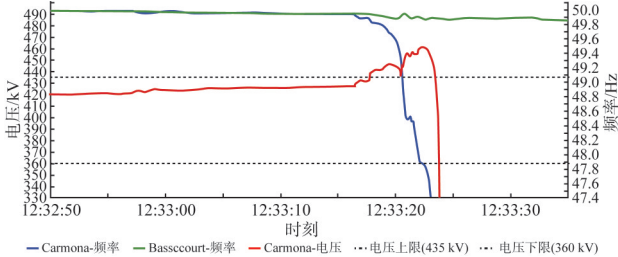


图 15 西班牙频率及电压变化情况
Fig. 15 Frequency and voltage curves of the Spanish power system

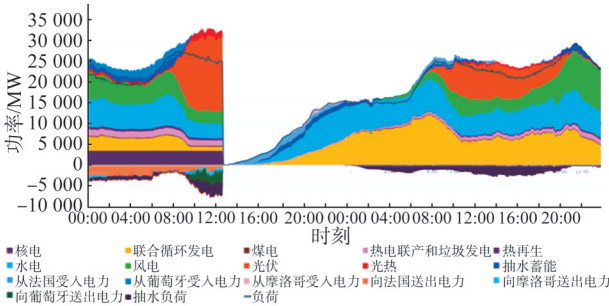
12:33:20, 西-摩联络线低频解列。12:33:23, 西-法高压直流闭锁。12:33:27, 安道尔电网与西班牙电网解列。

12:33:29, 所有其余机组全部因低频保护脱网, 西班牙、葡萄牙发生全国性大面积停电。

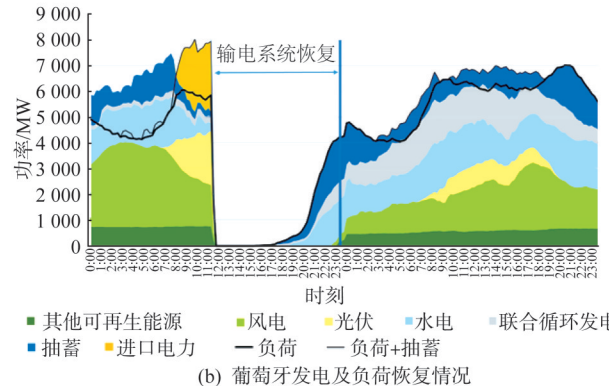
2.3 系统恢复

事件发生后, 西班牙和葡萄牙输电系统运营商立即启动了各自的系统恢复计划。其中, 西班牙电网划分了 7 个黑启动分区(南区、塔霍-中部区、利万特区、加利西亚-莱昂区、阿斯图里亚斯-坎塔布里亚区、阿拉贡-加泰罗尼亚区、杜埃罗-法国区)。各个分区利用本地水电以及西-法、西-摩等跨国互联支援进行恢复, 逐步增加发电(如联合循环燃气机组)和负荷。当满足充裕性和稳定性条件时, 各区域电网重新进行互联, 直至全国电网恢复(如图 16 所示), 恢复过程具体如下。

12:35 和 12:43, REN 分别启动卡斯特洛杜博德水电站和塔帕达多乌特罗燃气联合循环发电站的黑启动模式。



(a) 西班牙发电及负荷恢复情况



(b) 葡萄牙发电及负荷恢复情况

图 16 事故后西班牙和葡萄牙发电和负荷恢复情况
Fig. 16 Power generation and load recovery in Spain and Portugal after the blackout

12:44, 法国和西班牙之间首条 400 kV 线路重新送电。

12:45, 卡斯特洛杜博德水电站以黑启动模式运行, 连接到邻近 REN 变电站的 220 kV 电网。

13:04, 摩洛哥和西班牙之间的互联线路重新送电。

13:30, 西班牙境内数座抽水蓄能电站投入黑启动。

15:14, 西班牙首台热电机组并网。

17:26, REN 通过卡斯特洛杜博德水电站及塔帕达多乌特罗燃气联合循环发电站, 支撑建立两个分区电网并恢复对应区域供电。

18:36, 西班牙和葡萄牙之间的首条 220 kV 联络线重新送电。

21:35, 西班牙和葡萄牙边境南部的 400 kV 联络线重新送电。西班牙电力系统 13 台热电机组并网。

23:37, 西班牙近 50 % 的电力需求恢复。

4 月 29 日 00:22, 葡萄牙输电网络全部恢复。04:00, 西班牙输电网络全部恢复。

3 原因分析

本次事故是近年来国际罕见的新能源高渗透率运行方式下过电压叠加多重异常引发的大面积停电事故,表现为“连锁反应”式的过电压现象,即高电压导致电源脱网,引发电压继续升高,进而造成更多电源脱网,如此循环往复。本文认为造成此次大面积停电事故的原因可以分为直接原因和深层次原因。

1) 事故直接原因

(1)三次大规模新能源脱网是本次事故的诱因。脱网后电网电压普遍越过运行限值,进一步引发了后续的连锁故障并最终导致大停电。其中,第一次新能源脱网(位于格拉纳达地区)的原因是某400/220 kV 升压站的自耦变压器二次侧过电压保护动作,使得下游新能源汇集站成为孤岛,触发过频、过压保护动作跳闸。然而,根据该保护装置的整定值信息以及保护动作时刻记录的电压数据,脱网时自耦变压器一次侧电压为424 kV,二次侧电压为242.5 kV,说明此时变压器分接头位于较高的档位,但电压均未超过运行限值(435 kV 和 245 kV),保护可能提前动作。在第二、三次新能源脱网(分别位于巴达霍斯和塞维利亚地区)期间,还存在高压侧电压虽未超出限值,而低压侧电压已越限的情况,其可能与变压器分接头调节滞后未能与400 kV 电网电压变化速率充分配合有关。

(2)系统动态调节能力不足是事故发展的原因。一方面,西班牙新能源场站电压调节仍以传统的电容器为主,未配备 SVC/SVG,系统动态无功功率调节主要依靠常规机组。事故当天,西班牙电网常规机组计划安排12台,但南部1台调压机组故障后未进行替补,实际开机数量仅为11台,达到2025年最低(2025年西班牙有13 d 安排12台机组开机,其余时间均超过12台),同时REE称事故期间部分调压机组的出力均未达到预期,动态无功功率调节能力不足。另一方面,西班牙规定可再生能源、热电联产和垃圾发电均为定功率因数运行模式,但事故当天发现部分新能源、配电网及大用户未按照规定的功率因数运行,无功功率吸收能力不足。总而言之,系统处于电压控制能力极低的状态,在3次大规模新能源脱网后电压持续上升,系统已接近稳定边界。

(3)安全防御策略不适应是系统崩溃的原因。传统安全稳定防线如低频减载等,其核心功能是对系统功率失衡问题。通常情况下,特定规模的发电机组突发性脱网将导致发电-负荷失衡,引发系统频率下降,极端情况下需启动切负荷措施以恢复系统平衡。然而,本次事故面临的并不仅仅是因特定发电量损失而造成的功率平衡问题,而是一种复杂的以过电压为主导、电源“雪崩式”脱网为特征的连锁故障,即当电压上升导致部分新电源脱网后,由于无功功率吸收减少、潮流减轻等原因,系统频率降低的同时电压持续抬升,而在电网负荷较低、潮流较轻的场景下,低频切泵和低频切负荷又导致无功功率吸收进一步减少,加剧过电压问题,系统进入了电压上升和频率跌落交织的恶性反馈过程。当西班牙电网全部触发两轮低频切泵和六轮低频切负荷后,电压仍然比额定值高出20%以上,而频率还未达到触发机组低频解列阈值,说明在上述连锁故障过程中过电压始终发挥主导因素作用,而一旦进入该连锁故障过程,安全稳定防线就已无法阻止系统崩溃。

2) 深层次原因

(1)对新型电力系统特性及稳定形态、边界的研究认识不足。欧洲电网长距离互联、高比例新能源渗透特征突出,电网长期存在固有振荡模式,且随着ENTSO范围不断扩大、新能源接入比例不断提高,固有振荡频率一直在变化,结构性问题始终未能得到有效解决。在本次事故中,REE采取的加强电网联系、降低跨国联络线送出功率等振荡抑制措施,符合运行调度的准则,但却导致实际运行方式和日前计划相差较大,降低了电网安全稳定裕度。同时,西班牙电网对于新型电力系统失稳的新形态、新路径的研究不够充分,导致“电压升高-新能源脱网-切除负荷-电压进一步升高”这一电压向上失稳的连锁故障过程突破预想空间,除失步解列外,缺乏其他更有效、精准的阻断或限制措施。

(2)源网协同监管机制不完善。一方面,西班牙西南部新能源富集区大部分电源为2010年前后所建,未强制要求新能源场站配置动态无功装置,普遍缺乏高电压穿越能力(2013年后西班牙才开始逐步对新能源高电压穿越提出要求),已不能匹配当前新能源高渗透率场景需求。另一方面,西班牙TED/749/2020号法令规定新能源机组应能承受

1.10~1.15 倍额定电压(1 s 不脱网)^[12], 然而实际电压未达保护整定值(1.1 p.u.)时就已提前动作。此外, 西班牙约 22 % 的新能源场站不满足定功率因数运行要求, 事故当天还出现了部分调压机组未能正确响应电网调度指令的情况, 暴露出西班牙对电源侧的监管和考核存在严重缺失。

4 对我国电力系统的启示

近年来, 全球大停电事故总体呈现上升趋势, 2025 年仅半年事故数量已达往年年度水平。随着全球能源转型, 新能源高渗透率运行在部分国家逐渐成为常态。除本次西班牙、葡萄牙大停电外, 英国、巴西、南澳电网在新能源渗透率 34 % ~ 55 % 时, 也发生过大范围停电事故^[13-17], 表明新能源渗透率达到以上范围时, 电网易发生失稳。

近年我国新能源发展迅猛, 截至 2025 年 4 月, 我国新能源累计装机 1 533 GW (占总装机比例 43.9 %)^[18], 西北、华北、东北和南方电网四大区域电网新能源瞬时最大渗透率已超过 50 %, 全国 16 个省级电网超过 60 % (青海为 82.2 %, 西藏为 67.7 %, 云南为 68.8 %, 海南为 66.7 %, 广西为 64.4 %), 新能源渗透率水平已位于世界前列。在新能源高渗透率的背景下^[19-22], 我国电网规划与设计、新能源涉网管理、安全稳定防御体系等方面都需重新再审视、再研究^[23-25]。需认真吸取此次西葡大停电经验教训, 进一步加强电力系统安全管理。

1) 加强无功功率支撑资源和动态调节资源规划建设

当前我国大型风电场、光伏电站虽然已具备相对完善的电压穿越、无功功率调节及电压控制能力, 但无功功率补偿设备质量差别较大, 无功功率-电压调节特性差异显著, 实际运行情况可能不理想。同时, 自动电压控制系统的远方与就地功能的协同、数据异常的处理要求与标准化入网检测等方面仍有提升空间。以某 500 kV 变电站为例, 在人工短路试验中发现片区静止无功发生器在故障期间仅 1/3 正确响应, 动态无功功率支撑能力难以满足高比例新能源接入场景下的电压稳定需求。建议: 一是统筹源网荷储规划, 专题开展“十五五”期间电网无功功率支撑资源布局规划研究, 加强源网荷储各侧动态无功功率补偿装置的配置, 完善自动电压控制功能, 提升对电网电压的控制能力。二是

深入开展“十五五”电网动态电压调节能力建设, 加快构网型等主动支撑技术的研究和应用, 提升对电网电压的支撑, 避免电压越限导致电源连锁脱网。三是健全各类调节辅助资源的政策引导和价格激励机制, 挖掘电压、频率等调节资源在保安全、保平衡中的核心价值, 合理安排常规机组并网规模, 保证具备足够支撑强度和调节能力。

2) 加强新能源场站涉网技术监管

我国新能源单机容量普遍较小、场站数量大, 且新能源装备处于快速研发迭代阶段, 型号版本多、参数差异大, 控制环节随运行工况多变, 大量分布式新能源向管理较弱的中低压电网渗透, 显著增加了涉网管理难度。目前, 新能源内部控制逻辑和参数不开放, 实际模型难以准确掌握, 仿真分析基础不牢固, 涉网性能参差不齐, 对电网支撑能力不足, 存在异常扰动下脱网风险。建议: 一是修订完善新能源涉网系列标准, 细化明确故障穿越及涉网保护、宽频阻抗特性、参数工况一致性等重要参数整定要求。二是加强新能源特别是分布式新能源的并网质量监管, 将新能源设备涉网定值、关键参数与控制保护程序版本纳入调度管控, 构建新能源控制保护的全链条管控体系。三是加强新能源模型的质量管理, 逐步推进分布式光伏模型建立, 建设新能源仿真建模统一数据平台, 制定新能源变流器控制保护软件版本及链接库模型管理办法, 明确链接库模型的一致性校核、封装接口、版本管理等工作要求, 探索建立重要场站控制器封存及共享机制。四是研究构建新能源典型涉网测试场景, 加强新能源场站逆变器检测能力、仿真能力建设, 持续完善新能源场站现场工况电压、频率耐受能力的测试方法, 提升检测的准确性与效率。

3) 深入研究适应“双高”电力系统的安全防御体系

随着新能源快速增长, 我国电网运行逐步进入经验上的“无人区”、技术上的“深水区”。新能源高渗透率运行方式下, 电力电子变流器控制保护的非线性行为和长时间尺度耦合特性增加了系统扰动响应的复杂性, 电压、频率、振荡等多种稳定性问题交织, 系统运行边界及故障影响易突破预想空间, 传统基于离线计算分析的安全稳定防御体系难以适应, 存在控制无解、失效或代价过大、防线间协同失配等问题。对于此次西葡大停电发生的电压向上

失稳的连锁故障过程,当前第二、三道防线除失步解列外缺乏有效、精准的阻断、限制措施。建议:一是重视未来“双高”电力系统可能出现连锁稳定性破坏的新形态、新机理和新路径,深入研究新型电力系统安全稳定基础理论。二是加强新能源高渗透系统振荡形成机理、振荡模态演变的研究,高度重视局部振荡激发系统振荡的风险,建立振荡预防、监测、溯源和抑制控制体系。三是深化故障防御策略研究,突破大范围电压向上失稳等新形态下的精准控制策略,以及极端场景下连锁故障的有效预防、阻断、限制策略。四是构建在线自适应的智能安全稳定防御系统,在新的安全稳定风险和控制资源格局下整合适应新型电力系统的调频体系、自动电压控制体系和故障防御体系,为新型电力系统稳定运行保驾护航。

4) 推动系统快速恢复技术攻关

当前我国黑启动电源更多依赖水电,燃气轮机、储能等支撑黑启动尚未形成大规模实际应用。建议:一是构建多元化的黑启动电源体系,在电网支撑能力较低的新能源富集区域合理多点布局具有黑启动功能的机组,加强构网型储能黑启动、柔直黑启动、新能源支撑快速恢复等新型恢复技术研究。二是研究完善各层级分区恢复方案,充分发掘跨区互联网支撑快速恢复潜力,试点应用系统动态分区恢复、分布式能源多点协同、主配协同等并行快速恢复技术。三是加强重要用户保障性电源配置,研究移动应急电源资源配置和调配优化技术,确保在突发情况下重要用户的快速恢复。

5 结语

2025年“4·28”西班牙、葡萄牙大停电深刻揭示了高比例新能源渗透背景下,电网安全稳定运行面临的以过电压为主导、新能源大规模连锁脱网为特征的“电压向上失稳”风险。事故源于系统振荡引发电压抬升、新能源场站涉网保护缺陷、系统动态无功支撑不足以及传统安全防御体系失效等多重因素叠加,最终形成“过电压-新能源脱网-无功吸收减少-电压进一步升高”的恶性循环,导致电网崩溃。

当前我国新能源渗透率已处于世界前列,电网规划与设计、新能源涉网管理、安全稳定防御体系等方面都需重新再审视、再研究。对此,提出以下4个方面启示建议。

- 1)加强无功支撑和动态调节资源的规划建设。
- 2)加强新能源场站涉网技术监管。
- 3)深入研究适应“双高”电力系统的安全防御体系。
- 4)推动系统快速恢复技术攻关。

参考文献

- [1] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J].中国电机工程学报,2023,43(2):555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555 - 581.
- [2] 刘新苗,刘俊磊,娄源媛,等.基于时序模拟的风火打捆送出消纳规划优化方法[J/OL].南方电网技术. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20240625.1057.035>.
LIU Xinmiao, LIU Junlei, LOU Yuanyuan, et al. Planning optimization method for transmission and consumption of wind-thermal bundled based on time series simulation [J/OL]. Southern Power System Technology. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20240625.1057.035>.
- [3] La Moncloa. Versión no confidencial del informe del comité para el análisis de las circunstancias que concurrieron en la crisis de electricidad del 28 de abril de 2025[EB/OL]. [2025-6-17]. <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/resumenes/Documents/2025/Informe-no-confidencial-Comite-de-analisis-28A.pdf>.
- [4] Red Eléctrica. Blackout in Spanish Peninsular Electrical System the 28th of April 2025 [EB/OL]. [2025-6-18]. https://d1n1o4zeyfu21r.cloudfront.net/WEB_Incident_%2028A_SpanishPeninsularElectricalSystem_18june25.pdf.
- [5] ENTSO-E. ENTSO-E expert panel initiates the investigation into the causes of Iberian blackout[EB/OL]. [2025-05-14]. <https://www.entsoe.eu/news/2025/05/09/entso-e-expert-panel-initiates-the-investigation-into-the-causes-of-iberian-blackout/>.
- [6] Red Eléctrica. Informe del Sistema Eléctrico 2024 [EB/OL]. https://www.sistemaelectrico-ree.es/sites/default/files/2025-03/ISE_2024.pdf.
- [7] Reneweconomy. Spain reached 100 % renewables a week before blackout. Some big batteries might have helped keep lights on [EB/OL]. [2025-04-30]. <https://reneweconomy.com.au/spain-reached-100-pct-renewables-a-week-before-blackout-some-big-batteries-might-have-kept-lights-on/#:~:text=It%20was%20just%20over%20a%20week%20ago%20that,more%20electricity%20than%20needed%20to%20meet%20local%20demand>.
- [8] Redes Energéticas Nacionais (REN). dados-técnicos-2024[EB/OL]. <https://datahub.ren.pt/media/vizdjf5o/dados-t%C3%A9cnicos-2024.pdf>.
- [9] Eepublicdownloads. Interconnected network of Continental Europe 2024 [EB/OL]. [2024-11-20]. https://eepublic-downloads.entsoe.eu/cleandocuments/Publications/maps/2024/ENTSOE_Grid_Map_Continental_Europe.pdf.
- [10] ENTSO-E. Analysis of Inter-area oscillations of 1st December 2016[EB/OL]. [2017-07-13]. <https://www.entsoe.eu/Docu>

- ments/SOC% 20documents/Regional_Groups/Continental_Europe/2017/CE_inter-area_oscillations_Dec_1st_2016_PUBLIC_V7.pdf.
- [11] El orden Mundial. El mapa de las centrales eléctricas de España [EB/OL]. [2025 - 05 - 15]. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/mapa-centrales-electricas-espana/>.
- [12] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Orden TED/749/2020, de 16 de julio, por la que se establecen los requisitos técnicos para la conexión a la red necesarios para la implementación de los códigos de red de conexión [EB/OL]. [2020 - 01 - 08]. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2020-8965>.
- [13] 孙华东. 国外大停电事故分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022: 166 - 173.
- [14] 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]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183 - 6191.
- [15] 常忠蛟, 刘云. 巴西电网“3·21”大停电中控制保护系统动作分析及启示[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4415 - 4426.
- CHANG Zhongjiao, LIU Yun. Analysis on and inspiration of the control and protection actions during “March 21st” blackout in Brazilian Power Grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4415 - 4426.
- [16] 王国春, 董昱, 许涛, 等. 巴西“8·15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9461 - 9470.
- WANG Guochun, DONG Yu, XU Tao, et al. Analysis and lessons of Brazil blackout event on August 15, 2023 [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9461 - 9470.
- [17] 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.
- [18] 国家能源局. 2025年1 - 4月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2025 - 05 - 22]. <https://www.nea.gov.cn/20250522/ba33708cb5e749378a21c955170069c1/c.html>.
- [19] 张丹, 常东旭, 曾丕江, 等. 含高比例新能源和小水电的孤网频率稳定特性及涉网参数优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 11 - 18.
- ZHANG Dan, CHANG Dongxu, ZENG Pijiang, et al. Frequency stability characteristics and optimization of grid-rated parameters for isolated grids with high proportion of new energy and small hydropower [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 11 - 18.
- [20] 刘映尚, 张建新, 徐光虎, 等. 南方区域复杂交直流互联电网系统运行特性与安全稳定控制[J]. 南方电网技术, 2020, 14(5): 44 - 50.
- LIU Yingshang, ZHANG Jianxin, XU Guanghu, et al. Operation characteristics and security & stability control of the complex AC-DC interconnected power grid in southern China [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(5): 44 - 50.
- [21] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防护体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723 - 5732.
- XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723 - 5732.
- [22] 何伊慧, 管霖, 王彤, 等. 南方电网新型电力系统规划建设的量化评估与分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 40 - 53.
- HE Yihui, GUAN Lin, WANG Tong, et al. Quantitative evaluation and analysis of planning and construction of the new power system in China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 40 - 53.
- [23] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172 - 179.
- WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172 - 179.
- [24] 周勤勇, 李根兆, 秦晓辉, 等. 能源革命下的电力系统范式转换分析[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 1 - 11.
- ZHOU Qinyong, LI Genzhao, QIN Xiaohui, et al. Analysis of power system paradigm shift under energy revolution [J]. Electric Power, 2024, 57(3): 1 - 11.
- [25] 陶劲宇, 秦川, 金宇清, 等. 面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 168 - 187.
- TAO Jinyu, QIN Chuan, JIN Yuqing, et al. A review of load models for new power systems [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 168 - 187.

收稿日期: 2025-07-09; 网络首发日期: 2025-08-05

作者简介:

郭琦(1979), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统仿真, guoqi@csg.cn;

王庆红(1976), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统自动化、电力技术情报与标准化, wangqh@csg.cn;

谭伟涛(1999), 男, 硕士, 研究方向为大停电事故分析、电力系统非常规风险防范, tanwt@csg.cn。