

[电网运行]

“12.28”墨西哥大停电事故的分析及其对我国电网运行的启示及建议

文/中国南方电网有限责任公司超高压输电公司贵阳局 孙传文

2020年12月28日14:29（墨西哥当地时间），墨西哥电网发生大面积停电事故。此次大停电事故的主要原因有：墨西哥电网北部和中部联系薄弱，线路故障跳闸未能及时采取稳定控制措施避免后续线路联锁跳闸等。通过介绍事故的经过及原因，总结对我国电网运行管理的启示及主要建议。

2020年12月28日14:29（墨西哥当地时间），墨西哥发生大面积停电事故，包括首都墨西哥城在内的12个州的1 030万用户受到停电影响，损失负荷比例约占当时总负荷的26%。墨西哥国有公用事业公司（Comision Federal de Electricidad, CFE）表示，2020年12月28日发生的大规模停电是由东北塔毛利帕斯州发生的大火引起的两条连接塔毛利帕斯州和新莱昂州的400 kV线路在1 min内停运和超过9 GW的化石燃料和可再生能源发电厂受到保护性关闭，同时当需要恢复电网时，可再生能源等间歇性能源无法直接恢复，导致电力恢复时间延长。这次停电导致1 030万消费者停电近2 h。

本次事故的起因和发展过程比较特殊，特别是电网运行管理方面，有许多值得深思的经验和教训。因此，本文从大停电地区电力系统自身特点入手，介绍并分析事故的起因及发展，并结合我国电力系统发展的特点和趋势，总结对我国电网运行管理的借鉴意义，以及经验与启示。

停电事故发展的经过

1. 墨西哥电网基本情况简介

墨西哥电力机构主要有能源部（SENER）、能源监管委员会（CRE）、国家能源控制中心（CENACE）和国家电力公司（CFE）。能源部负责国家能源政策和电力系统规划制定；能源监管委员会负责电力市场监管、发电许可颁发和电力市场运行监管规则制定；国家能源控制中心负责电力系统调度、规划和电力市场运营；国家电力公司拥有墨西哥电网大部分资产，提供发电、输电和配电一体化服务，在输电和配电领域处于寡头地位。

墨西哥电网主要划分为3个系统9个控制区域。墨西哥电网分为北部电网、北下加利福尼亚电网、南下加利福尼亚电网和南部电网等四部分，北部电网与美国相连。主干输电网电压等级为400 kV和230 kV，主要潮流方向由南向北，南部地区由外向内（首都负荷中心）。

截至2017年底，墨西哥全国电力总装机容量约

75 685 MW，其中，传统能源占比70.5%，可再生能源占比29.5%。传统能源中，联合循环电站装机28 084 MW（占总装机37.1%）；可再生能源中，水电装机12 642 MW（占总装机16.7%），风电装机4 199 MW（占总装机5.5%），光伏装机214 MW（占总装机0.3%）。2018年，墨西哥国家互联系统最大负荷4 517万kW，全年发电量3 002亿kW·h。

2. 事故起因及发展经过

2020年12月28日下午，墨西哥东北部塔毛利帕斯州（Tamaulipas）帕迪拉市（Padilla）发生草原火灾，过火面积达到30 hm²（1 hm²=10⁴m²）。在强风的帮助下，火焰燃烧着灌木和草原，将烟气、热空气和灰烬“送往”架空线，导致墨西哥北部电网与中部电网连接的主要断面之间的两回同走廊的400

kV输电线路相继故障跳闸，导致该断面完全断开。同时，两回400 kV线路跳闸后，系统潮流发生大范围转移，导致北部电网与中部电网连接的另外两回线路跳闸。随后，系统发生振荡，频率上升导致光伏、风电相继脱网，并且16座电厂机组因过频保护或高频切机动作跳闸。由于大量机组脱网，系统功率大幅不平衡，导致频率又跌落至58.9 Hz以下，低频减载动作切除负荷8 696 MW（约占当时国家互联系统总负荷的26%），大量负荷切除后系统恢复稳定。

然而，当需要恢复电网时，可再生能源等间歇性能源无法直接恢复，导致电力恢复时间延长。墨西哥电网大量风电场和太阳能发电场都集中在一个地区，没有太多计划考虑到该电网的弹性。事故示意图如下图所示。

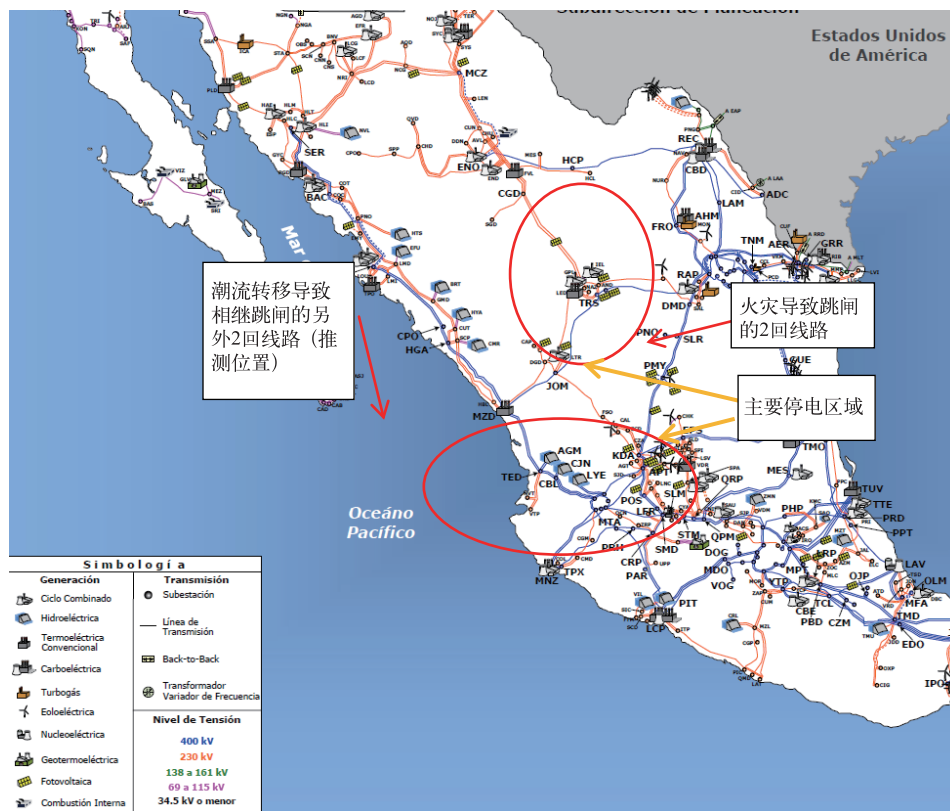


图 事故示意图

事故分析

根据事故过程，本次大停电事故原因初步推测为墨西哥电网北部和中部通过五回400 kV输电线路联网，火灾导致其中两回的400 kV输电线路相继故障跳闸后，潮流大范围转移，南北断面的另外两回

400 kV输电线路相继跳闸，导致系统出现振荡，频率大幅上升，引发系统功率大幅不平衡，频率又大幅下降导致低频减载切除负荷，引发大面积停电。同时当需要恢复电网时，可再生能源等间歇性能源无法直接恢复，导致电力恢复时间延长。

事故对我国电网运行的启示

1) 稳固的电网网架结构是保证电网安全的根本保障。墨西哥电网北部与中部通过五回400 kV输电线路联网,潮流由南向北,输电距离远,当两回线路发生跳闸或故障后,北部电网与中部电网联系薄弱,电力需大范围迂回,导致出现线路相继跳闸和系统频率振荡,连锁反应导致系统崩溃。自1965年以来全球不同规模的电网均发生过重大电网停电事故,例如2019年发生的“3.7”委内瑞拉大停电和“6.16”阿根廷、乌拉圭大停电。分析这些大停电事故的发展过程,其物理本质主要与网架结构不坚强、输电网络无法支撑远距离电能输送、故障后潮流大范围转移引发连锁反应、严重情况下导致系统发生崩溃及故障后的潮流大转移引发连锁反应导致稳定破坏有关。

2) 电力系统三道防线是保障电网安全的重要基础。本次墨西哥大停电事故中,两回同走廊的400 kV输电线路故障跳闸,若能及时采取稳定控制措施,有可能避免后续线路连锁跳闸和频率发生大幅振荡以及机组的无序脱网。从电力系统发生大面积停电事故的机理看,电网崩溃往往是在大电网安全充裕度下降的条件下,由发电、输电等设备的连锁反应事故诱发的,都有一定的发展过程。通过采取正确的控制策略,提高电网的充裕度,切断恶性连锁反应链,将系统状态导向良性的恢复过程,大停电事故是可以有效控制的。因此,结构合理的大电网在统一调度和控制的基础上,通过区域间事故情况下紧急功率支援和配置坚强的安全稳定防线,能够遏制事故的发展,降低事故可能造成的影响,避免全网性大停电事故。因此,特别对于发生概率较大的同塔线路双回故障跳闸的情况,应合理配置稳控系统,及时采取稳定控制措施保证电网安全稳定运行,避免高频切机及低频减载等第三道防线动作大量切除机组和负荷,引发大面积停电。

3) 系统故障期间新能源机组跳闸是扩大事故的直接原因。本次墨西哥大停电事故中,系统发生振荡过程中大量新能源机组,常规电厂在系统频率大幅上升过程中因过频动作跳闸,导致频率进一步大幅波动。2019年8月9日,英国发生大规模停电事故。大停电起源于英格兰的中东部地区及东北部海域,最终导致英格兰与威尔士大部分区域停电。此

次事故暴露出在新能源高渗透率条件下,新能源大量替代同步机,将导致系统惯量水平下降,恶化频率响应特性,削弱系统抵御功率缺额的能力。

4) 重要输电通道安全是电网安全运行的基础。本次墨西哥大停电事故的起因是草原火灾引发两回主干输电线路故障跳闸。我国电网大多数通道跨越多省区,线路距离长,走廊环境复杂,多重因素威胁输电通道安全。

事故对我国电网运行的主要建议

1) 加强电网合理分区和安全稳定防线建设。一是在电网电源规划中优化电源结构、合理分散布局,增强负荷中心电源支撑能力,根据GB 38755—2019《电力系统安全稳定导则》,电网的合理分区是指“以受端系统为核心,将外部电源连接到受端系统,形成一个供需基本平衡的区域”;二是电网规划应优化完善网架结构、交直流交互影响严重等安全风险问题;三是严格按照《电力系统安全稳定导则》配置稳定防线,提升电网应对严重自然灾害等可能引发的大面积停电事故风险的能力。

2) 提升新能源电厂并网对电网安全稳定运行的应对措施。一是加强新能源电站并网管理,合理应用新能源机组并网技术性能,提升新能源涉网时频率、电压故障穿越能力。例如大规模新能源接入电网后,可通过减载运行,预留一定容量的备用功率参与系统调频。二是强化并网管理,规范流程管理,加强过程控制对新能源电厂的并网过程进行一定的流程管理与控制,首先是并网点的确,然后确定并网的运行方式,最后编制启动投运试验方案。

3) 优化输电网和线路的布局,做好重要输电通道运行维护管理。在输电网和线路的实际规划中,应充分考虑地区差异性,优化输电网和线路的布局,优化输电网和线路实践应用中的层次结构,防止其结构处于无序和错综复杂的状态,从而为输电网和线路的安全稳定运行提供可靠的保障,实现输电网和线路结构及性能的优化,尽可能减少故障发生的几率,从而达到减轻安全运行管理工作量的目的,加强对于自然因素的防治措施,加强输电线路运营维护管理。EA

(收稿日期:2021.03.04)