



News & Highlights

增强电力系统的恢复力

Ben A. Wender^a, M. Granger Morgan^b, K. John Holmes^a^a Board on Energy and Environmental Systems, Division on Engineering and Physical Sciences, The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, DC 20001, USA^b Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, USA

1. 引言

经过超级飓风桑迪和飓风哈维、厄玛、何塞、玛利亚、卡特里娜等重大干扰事件的影响，以及2003年美国东北部的大停电事件，美国对具备恢复力的电力系统的需求越加凸显，也更加意识到电力基础设施对恶意物理和网络攻击的脆弱性。尽管事后新闻媒体立即对事件进行了大量的报道，但这些事件的影响和恢复过程可能会延续数年甚至数十年。2017年7月20日，美国国家科学、工程和医学研究院（NASEM）发布了题为《增强国家电力系统的恢复力》（*Enhancing the Resilience of the Nation's Electricity System*）的报告[1,2]。报告提请人们注意需要更好地了解美国电力系统所面对的不断演化的威胁和其本身的脆弱性，并就技术、政策和运营战略等方面提出建议，以提高美国电力系统的恢复力，从而也可能为其他国家的电力系统提供见解。

2. 背景

电力对我们的日常生活至关重要。它为家庭、商

业和工业活动、医院和应急响应等重要社会服务以及电信、天然气输送和交通等其他重要基础设施提供动力。但是，电力系统容易受到各种不断变化的威胁的影响，这些威胁可能导致持续数天、数周或更长时间的大面积停电。这些断电可能是由飓风、地震和冰暴等自然灾害造成，也可能是诸如物理或网络攻击等人为威胁造成，以及如太阳风暴和其他电磁威胁等低概率事件造成（图1）[1]。不同的威胁具有不同的特征，例如，电网运营商可以获得的预警时间的不同也会造成具有不同恢复需求的不同类型的损害。最近得克萨斯州、佛罗里达州和波多黎各的飓风让人们清醒地认识到，当发生严重断电时，日常工作将变得困难，经济损失可能达数十亿，并可能造成生命损伤。

为帮助美国政策制定者及给参与电网规划和运营的人员提供指导，第113届美国国会要求NASEM组建专家委员会，以确定能够提高美国电力系统电网的恢复力的技术、政策和组织战略。该委员会通过了国家基础设施咨询委员会提出的恢复框架[3]，并稍加修改，以强调每个阶段执行的行动：准备、改善、恢复和学习（图2）[3]。恢复力不仅仅减少这些停电事

Cyber attacks	Hurricanes	Space weather and other electromagnetic threats
Drought and water shortage	Ice storms	Tsunamis
Earthquakes	Major operations errors	Volcanic events
Floods and storm surge	Physical attacks	Wildfires
	Regional storms and tornados	

图1. 大规模电力中断可能由许多不同的威胁引起（按字母顺序显示，转自参考文献[1]）。

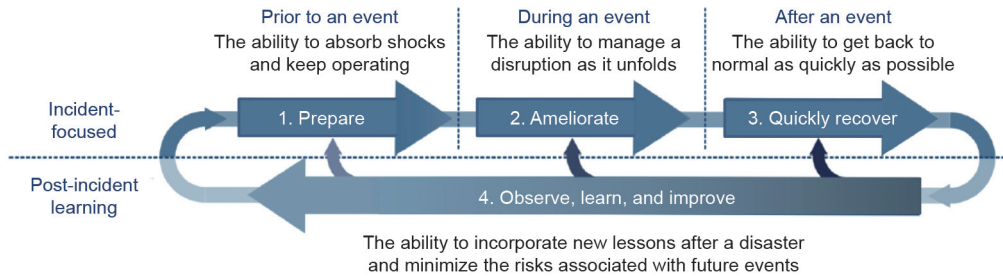


图2. 恢复过程不仅包括准备预防中断（阶段1），还要最大限度地减少事件期间电力中断（阶段2）的影响，中断后快速恢复（阶段3），并不断学习如何提高未来应对事件的能力（阶段4）。委员会在这些阶段后组织了大部分报告（这一数字与国家基础设施咨询委员会[3]提供的原始数据略有不同）。

件发生的可能性，也与减小因断电而造成的破坏与影响有关，随之使其迅速恢复服务，并从这些经历中汲取教训，以便更好地处理未来的事件。

从这个角度来说，恢复力与具有相对成熟指标的可靠性不同。尽管美国电力系统运营商在可靠性方面有非常优秀的服务记录，但难以衡量恢复力或比较不同投资策略的潜在弹性效益。该委员会建议进一步研究可用于行业和监管机构的恢复力衡量标准的开发，以及研究具有更强恢复力的电力服务的客户和经济评估。

实施任何可以大规模提高美国电力系统恢复力的战略都是非常困难的，部分原因是由于电力系统所拥有的复杂组织以及涉及组织运作的许多不同实体。数以千计的不同组织拥有、运营、服务或管理美国各地的电网，这些组织包括私营、公共、合作性的公用事业或是州级、地区级和联邦机构。大部分电力来自大型集中式发电厂，以高电压进行长距离传输，然后以较低的电压分配给住宅、商业和工业用户。发电机和高压输电线路的网络（称为大容量电力系统）受到由国家层面开发的众多运营、物理和网络安全标准的约束。配电系统从变电站开始，将大容量电力系统的高压电转换为较低电压并输送给终端用户。个别配电公司受到州和地方当局或监督委员会的监管，并具有不同的资源可用性、技术复杂性、所有权结构和监督机制。由于由大容量电力系统和当地分配网络组成的电网是由许多独立决策者管理的系统，因此它是一个没有单一组织管理或负责确保电力抗灾服务的系统。

3. 变革的驱动因素塑造美国电网的未来

在这种组织复杂性的背景下，美国的电力系统一直在发生剧烈的变化，部分受到当地和联邦政策以及

市场力量的驱动。在美国的一些地区，电力仍然由垂直整合的公用事业公司提供，这些公用事业公司在大型发电厂内发电，通过高压传输系统将电力输送出去，并分配给终端用户，所有这些都由一家公用事业公司所掌控。在美国的其他地区，国家监管机构试图通过拆分垂直一体化公用事业机构并分离发电、输电和配电服务来促进竞争性市场，尤其是发电厂和配电公司之间的批发电力销售领域。今天，在美国的许多地区，连接配电和发电的高压输电线路由独立的区域输电组织或独立系统运营商控制，为发电设施的输电系统提供开放式接入。一些地区拥有经过重组的公用事业，其电力通过电线流动，而客户的反馈越来越多地由市场力量决定。

除了体制和监管方面的变化外，美国的电力系统正在经历巨大的技术变革。大型电力和配电系统的仪器和自动化已经有了显著的改进。美国的电网是一个复杂的“网络物理”系统，由遍布全国的无数物理、计算和网络组件组成。这使系统可以更高效地运行，并为系统操作员提供更好的态势感知能力，这可以在面临停电事件时提高电网的可靠性和恢复力。

所用的发电资源也发生了变化，夏威夷和加利福尼亚等一些州迅速采用分布式能源（DER），包括分布式太阳能发电、需求响应、可调度能源效率、客户拥有的储能能力甚至是微电网。由于这些成本占总体资源组合的比例越来越高，因此电网规划、运营和管理必须发展以保持电网可靠性、恢复力和安全性。该委员会指出，尽管DER计划的渗透率日益提高，但至少在未来20年内，大多数美国客户将继续依赖大规模、互联、紧密组织和分层结构的电网运行，以提供可以对抗风险的服务。然而，正如委员会提出的一些具体建议中所述，有许多机会可以通过提高抗风险能力来设计和规划DER。

从长远来看，许多其他因素会影响电力系统的设

计和运营，其中包括监管结构的进一步变化，尤其是联邦和州级监督的平衡；也包括大宗电力来源的变化，如天然气发电比例增加及核电和煤炭比例缩减；DER的渗透率提高，包括间歇性可再生能源、微电网的大规模实施；以及气候变化对电网规划和运营的不确定影响。规划电网抗风险能力需要考虑到电网及其各种机构和技术特征、法律结构和经济状况将发生变化的预期。考虑到许多电网投资昂贵、寿命长，并且有望在未来几十年投入运营和恢复投资，这一点尤其具有挑战性。

基于这一重要背景，美国国家科学院增强国家输配电系统恢复力委员会（National Academies Committee on Enhancing the Resilience of the Nation's Electric Power Transmission and Distribution System）详细阐述了许多调查结果和建议，其中详细阐述了加强电网恢复力的战略。没有“一刀切”的解决方案能够避免、计划、应对重大的灾害和灾后的恢复，并且战略必须具备全方位的眼光，也需要认识到系统易受各种组合的潜在影响而产生中断。

4. 防止电力中断并减小影响的策略

恢复力从预备和预防措施开始，使电力中断的可能性降低或程度减小。尽管报告主要关注大规模停电，但其中描述到的方法也可以减少小规模停电的发生，并提高常用可靠性指标的实用性能。报告[1]描述并推荐了多种策略来减少停电的频率或程度，其中包括：

- 通过例如预防性维护改善单个电网组件的健康性和可靠性；
- 设计系统的网络-物理结构以降低各个组件的临界点；
- 通过增加传感器和高级数据分析的部署，快速向运营商提供更好的信息和控制策略；
- 避免过度依赖任何单一的燃料源，特别是天然气，这些供应网络存在脆弱性。

这些策略很多都集中在大型发电机和高压输电线路的大容量电力系统中，然而，一些地区配电系统技术变革的快速发展为此带来了新的机遇。DER系统和本地配电系统的先进自动化控制可以在防止或限制停电扩散方面发挥更大的作用，例如，通过自动重新配置电路以隔离损坏的组件或使用分布式能源保

持电能质量（例如，将电压和频率限制在规定范围内）。在大规模实施这些战略时遇到的关键挑战是如何驾驭监督美国电网的复杂的经济、体制和监管结构。

5. 降低停电发生的成本和中断的策略

恢复力框架的第二阶段是尽量减少停电事件发生时所造成的影响。虽然大规模停电很罕见，但还是有可能发生，恢复供电可能需要很长时间。公用事业、公共机构和社会对长时间的电力中断和随后的重要公共服务（包括供暖和制冷、水和污水输送、交通管制、金融系统、医疗保健和紧急救援）的中断进行更广泛的准备是至关重要的。停电的影响取决于天气、受影响客户的类型和位置以及停电持续的时间。报告的核心主题是需要改善社会不同因素对长时间停电的不同后果的设想方式。报告[1]介绍了几种策略来帮助预备此类意想不到的情况，其中包括：

- 通过更为系统的测试和维护，提高客户购买的备用电源设备（如柴油发电机组）的可靠性；
- 重新评估在灾害期间提供应急电力设备和燃料的政府储备和合同；
- 鼓励关键设施运营商在集中和可访问的数据库中预先记录有关其紧急电力需求的信息；
- 探索利用高级电表架构、DER和智能逆变器等技术向特定电路甚至电路中的单个仪表提供动态和选择性电源的潜力；
- 制定战略，使用分布式发电、混合动力车辆、机车、船舶和其他非标准的电源，以在停电期间提供有限的电力服务。

先进的配电技术包括DER、可以与大电网分开并保持小容量电源的微电网，以及变电站和单独配电线路上的智能控制，这些技术可以在停电期间为关键设施提供部分服务。报告[1]建议州监管机构和分配系统运营商评估与客户所有资产相关的法律、财务、及技术挑战，以在重大电力中断期间提供部分服务。

6. 加速恢复并在停电后改善学习的策略

提高抗灾性能框架的最后阶段涉及恢复和从停电事件中汲取经验。通过一些准备活动，包括演习以及关键设备的存储等，有效的恢复工作在灾难发生之前

就已开始。在大规模停电后的混乱时期，公用事业、应急人员和公共机构必须共同努力，以迅速恢复电力。一般而言，恢复需要一个反复评估损害的过程以协调活动并完成重新配置、修理和更换物理组件以及重建网络监测和控制系统等各种活动。但是，实际上，恢复过程取决于事件及其所造成的损害类型，如网络监测和控制系统能否正常工作并能够帮助进行损害评估。报告[1]提出了几种策略来改善不同损害情况的恢复活动，包括：

- 制定公用事业网络控制系统标准，以便从其他组织借调的人员能够有效地参与网络互助协议；
- 继续开展先进电力变压器的研究和示范活动，提供更强的操作灵活性；
- 开展恢复演习，与通信、天然气和运输等其他关键基础设施部门的利益相关方进行接触；
- 改进事故后调查实践，以便更好地从重大故障中获取经验并改善未来的停电恢复过程。

7. 总体建议

虽然这些具体的建议将逐步提高国家电力系统的恢复力，但委员会认识到，只有这些建议可能不足，

必须努力开发更为系统的方法。该委员会制定了一系列总体建议，描述了高层次的优先事项，包括更快地植入可用技术，并通过美国能源部继续投资于研究、开发和示范活动。最后的总体建议承认美国电网的独特和异构的治理和运营结构。报告[1]建议在联邦层面建立多个恢复力评估小组，以提高对电网脆弱性和大面积长时间停电造成的潜在系统影响的认识，特别是在规划人员、运营者、监管机构和应急人员很少或没有经验的情况下。然后，这些小组应与州和地方各级的类似小组合作，为决策者规划和批准电网恢复力投资提供指导和支持，从而有助于在联邦、州和地方各级之间进行协调。

References

- [1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Enhancing the resilience of the nation's electricity system*. Washington, DC: The National Academies Press; 2017.
- [2] United States' electric grid remains vulnerable to natural disasters, cyber and physical attacks; actions needed to improve resiliency of the power system [Internet]. Washington, DC: National Academy of Sciences; 2017 Jul 20 [cited 2017 Sep 28]. Available from: <http://www8.nationalacademies.org/onpinews/newsitem.aspx?RecordID=24836>.
- [3] Berkeley AR III, Wallace M. A framework for establishing critical infrastructure resilience goals: Final report and recommendations by the Council [Internet]. Washington, DC: National Infrastructure Advisory Council; 2010 Oct 19 [cited 2017 Sep 28]. Available from: <https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/niac/niac-a-framework-for-establishing-critical-infrastructure-resilience-goals-2010-10-19.pdf>.