

國際能源署（IEA）建立電力系統氣候韌性之措施- 2021

電力是所有現代經濟的重要部分，並支持著一系列關鍵服務。安全的電力供應是各國首要的議題。隨著氣候變遷造成的壓力越來越大，電力部門正在發生根本的變化：氣候變遷直接影響到電力系統的所有部分，包括改變發電位能與效率、測試輸配電網路的彈性，並改變需求模式。IEA 在 2021 年出版了「氣候韌性：電力安全(Climate Resilience: Electricity Security 2021)」的一份報告，主要提供氣候對電力系統衝擊的概述，並透過世界各地的個案研究，說明氣候變遷如何影響電力價值鏈的每個環節：發電、輸電、配電，以及需求，最後為決策者和主要利害關係人提出步驟式措施的建議，以建立具氣候韌性的電力系統。

一、氣候變遷對電力系統造成的主要潛在衝擊

氣候變遷直接影響到電力系統的每個部分，包括發電位能和效率，輸電和配電網路的韌性，以及需求模式。在許多國家，熱浪和寒流、森林大火、龍捲風和洪水等極端天氣事件的頻率和強度不斷增加，是造成大規模停電的主要原因。

- **氣溫升高：**溫度升高導致發電效率下降、設備效率降低和需求增加，對電力系統造成嚴重的衝擊，而近年來預測未來一世紀的溫度將會上升，對整個電力價值鏈都有影響。在供應方面，溫度上升導致發電效率下降，受影響的層面包括熱能和太陽能光伏發電；就火力發電站而言，效率損

失導致發電能力下降和總輸出功率減少，溫度上升對火力發電機效率的衝擊，取決於主要技術（蒸汽或燃氣輪機）與冷卻技術，其中冷卻技術對蒸汽輪機尤為重要，因為其效率與環境空氣溫度或水溫有關。此外，貫流式冷卻設備對水溫的環境限制，則進一步限制設備的運行，而水供應不足會使情況更加惡化。

- **降水變化：**降水變化影響到水的可利用性，並對各種電力供應來源造成更多的壓力。預期全球與區域降水變化對電力供應有所衝擊，而水力發電也無法倖免：降水模式的轉變，以及溫度升高引起蒸發散的改變，導致水力發電能力改變；水力來源的季節性與年度變化落差越來越大，對整個系統的運行和規畫造成嚴峻的挑戰。由於水的可利用性隨著季節與地理特徵不同而有所變化，間接對使用淡水冷卻的火力發電造成影響。部分火力發電廠使用淡水來冷卻設備，並將較高溫度的水排放到源頭（一次性冷卻），或在冷卻塔中儲存並蒸發。
- **沿岸洪水：**沿海洪水日益危及沿海基礎建設。全球海平面上升速度增加，近幾十年來每年至少上升 3 毫米，幾乎是 20 世紀觀察到的兩倍。海平面上升會導致沿海洪水與侵蝕，並影響到沿岸的發電資產、輸電和配電線路以及變電站。儘管永久淹沒的風險，只存在於少數特定的低地沿海區，但如果沒有額外的保護措施，其他沿海基礎建設可能面臨的風險包括：更高的潮汐以及風暴潮造成的洪水，而

抵抗海浪和風暴潮的天然屏障可能受到侵蝕，使未曾暴露的基礎建設在沒有適當調適措施的情況下，受到海洋的氣候衝擊。儘管沿海基礎建設如發電機和變電站，都具有堤壩等保護措施，但這些保護措施都必須按照百年洪災的水位進行設計。

- **森林大火：**森林大火對於多種類型的基礎建設，構成的威脅逐漸擴大，尤其在特定地區發生的風險更高，有時甚至暴露出電力供應欠缺的準備措施與嚴重的脆弱性，而人口增長和不斷擴張的人類版圖，預計也會進一步增加電力安全的風險。雖然森林大火可能影響所有電力基礎建設，但輸配電網路因其龐大的足跡，而尤其容易受到影響：森林大火可能引發火災和煙霧，同時造成電網多點故障，導致連接的發電設備失去輸出與輸入的能力，並切斷需求用戶的電力供給；間接影響包括架空電纜由於火災的熱量而功能下降，其中木質電桿尤其容易受到衝擊。澳洲新南威爾士州最近發生的森林大火，是其造成嚴重衝擊的證明。
- **氣旋：**氣旋造成的高速風、碎片飛濺和風暴潮，可能同時影響沿海電力基礎建設的許多部分。與野火類似，猛烈的風暴和氣旋會對電力系統造成重大衝擊，因為其衝擊與輸配電系統一樣，都有廣泛的涵蓋範圍。風暴潮引起的沿海洪水會嚴重影響沿海基礎建設，如發電機組與變電站，而海上基礎建設如離岸風電廠，則尤其容易受到衝擊。

二、防止氣候韌性失能的有效政策措施與協調行動

IEA 提出步驟式的措施，以提高電力系統的氣候韌性，其包括六個步驟：

- **評估氣候變遷的風險與衝擊：**全面的氣候風險與衝擊評估，對於制定氣候韌性的策略與計畫，是強而有力的科學基礎。
- **將氣候韌性納入主流，並作為能源和氣候計畫與法規的核心內容：**將氣候韌性納入國家策略與計畫，向公用事業單位和投資者呼籲建立具有氣候韌性的電力系統。
- **設計具有成本效益的韌性措施：**加強氣候變遷韌性的計畫和方針，能幫助公用事業在規劃階段確定最具成本效益的措施。
- **為公用事業建立適切的激勵措施：**雖然公用事業部門在保護其資產因應氣候變遷衝擊方面，有直接的利害關係，但適當的誘因措施能鼓勵及時投資於具有氣候韌性的電力系統。
- **實施韌性措施：**先進的系統運作、更有效率的協調恢復工作，以及能力建構，均能增強電力系統的氣候韌性。
- **評估有效程度並調整韌性措施：**根據評估系統以及利害關係人的協商來調整韌性措施，能夠不斷改進所採用的韌性措施。

在實施韌性措施的同時，政策制定者需要注意四個重要因素：

- (1) **支持物理系統加固：**物理系統加固包括發電廠或輸配電網路的技術與結構改進，能以相對較低的成本大幅降低旋風

和洪水的破壞機率，例如：水電站的物理系統加固可能會增加 3% 的成本，但卻能減少 50% 的洪水破壞風險；同樣地，加強風電場的成本僅上升 5%，便能將旋風破壞的可能性減少一半。此外，發電資產的物理加固，能助其抵禦氣候衝擊，避免供應方的關鍵損害，例如：將發電資產從易受洪水衝擊的地區，搬遷到地勢較高的地方，能降低洪水造成的損失、為火力發電廠建造乾式冷卻系統，能提高對乾旱與缺水的韌性、若水電站附近的水文模式預計會越來越不穩定，增加水庫容量可以使其更具韌性。

- (2) **增加系統運行的可視與可控性：**部署智能電網技術，能為系統運營商提供更高實時操作的可視性，以及更大的監控範圍，並且能實現更頻繁的遠程與自動化操作，同時減少人員損失的風險，尤其是在極端天氣事件中。智慧型電表基礎建設（AMI）是智能電網概念中，越來越普遍應用的例子。AMI 能讓整個配電網的能源使用與技術參數，近於實時地採集與傳達。更高的可視與可控性對於配電系統運營商受益匪淺，不僅能夠降低資產監控與恢復的成本並提升效率，也能進一步減少停電對配電網的衝擊。另一方面，精準的天氣預報是另一個優化系統運行的關鍵因素，同時也是公用事業部門和系統運營商預測極端天氣事件，並採取必要預防措施的重要工具，包括降低最脆弱發電廠的輸出、重新配置輸配電拓撲結構、調適性孤立、應用更嚴格

的系統操作協議，以及使勞動力與溝通渠道處於高度警戒狀態。

(3) 協調復原工作：權威性的機構應適當協調電力系統各方面的復原工作，盡量減少電力中斷的嚴重程度，並盡快恢復正常運行。相關機構也應注意，復原工作往往需要多個部門之間的協調，如資訊流通、溝通以及運輸。一般來說，快速有效的復原工作需要利害關係人的參與，因此，政府需要與所有這些利害關係人協商並制定計畫，以應對未來氣候事件造成的破壞與衝擊。這些計畫可以經由對應急措施進行建模與模擬而制定，並應不斷修正，以反應從近期事件中獲得的資訊，而最重要的是執行者應排出復原工作的優先次序，以避免嚴重破壞關鍵基礎建設，並保護最脆弱的群體。

(4) 支持實施韌性措施的能力建構：隨著氣候模式改變逐漸加劇，加上極端天氣事件日益頻繁，對於氣候變遷衝擊的管理，可能會變得更具挑戰性。缺乏適當的監管制度、不合格的規劃，以及缺乏降低災害風險的策略，都可能加劇氣候變遷衝擊的脆弱度。決策者和關鍵行為者應投資於風險與衝擊評估、預測和預警系統、應急措施以及復原工作。

三、結論

為了將氣候變遷的衝擊降至最低，有效的政策與措施對於加快關鍵行為者的行動，能發揮核心作用。儘管企業對於保護自身資產有直接利益關係，並有責任為客戶提供可靠服

務，但有部分因素可能會阻撓企業實踐韌性措施。因此，政策制定者應與企業合作，鼓勵企業採取有效措施，以建立具有韌性的電力系統，防止故障的可能性。部分國家已經引入工具和指導方針，用以預測、吸收、調適並恢復目前及預測的氣候衝擊。然而，許多國家對於將氣候韌性納入長期能源規畫及電力安全的主流方面，仍然有龐大的政策缺口。

建立明確的氣候衝擊與韌性評估架構，是確保所有利害關係人正確理解預期氣候變遷的第一步。在建立統一的評估架構後，政策制定者應向基本服務的提供者釋出適切的資訊。政府可以藉由強調氣候韌性作為長期能源與氣候政策核心的角色，鼓勵公用事業單位將氣候韌性納入其建設計畫與運作制度。確立具成本效益的韌性措施並建立誘因機制，也能鼓勵公用事業單位採取韌性措施。企業在政府制定支持政策措施後，能更有效實施韌性措施，如物理系統加固、系統運作改善、恢復工作計畫與能力建構。最後，對於實施中抗災措施的有效程度進行評估，並根據結果進行調整，也能使氣候抗災能力不斷提高。

參考文獻

IEA (2021). *Climate Resilience: Electricity Security 2021*.
(https://iea.blob.core.windows.net/assets/62c056f7-deed-4e3a-9a1f-a3ca8cc83813/Climate_Resilience.pdf)