

提升歐洲能源系統的韌性

歐洲監管中心(Centre on Regulation in Europe, CERRE)研析歐洲能源系統和能源基礎設施的韌性、歐盟相關立法要求及促進能源基礎設施韌性的監管途徑，並於 2023 年發布研析報告，提出未來推動建議。

隨著極端天氣事件的頻率和規模增加，能源基礎設施，如天然氣和電力運輸系統，正面臨嚴重損害。極端天氣也影響再生能源（如風能和太陽能）的可用性，以及能源需求的波動性。歐盟國家的監管機構對於是否需要通過規定或立法來強化運營商的韌性尚未達成共識。目前歐盟能源立法中，韌性建置的方法通常僅限於能源供應品質方面，而在具體政策方面，已開始推動如輸電網路規劃、系統運營管理和技術性能。此外，歐盟立法要求輸電系統營運商(TSO)和配電系統營運商(DSO)制定電網發展計畫，注重系統擴展、儲能及國際貿易，同時要考慮韌性。歐洲輸電系統營運商聯盟(ENTSO-E)和歐洲天然氣輸送系統營運商聯盟(ENTSO-G)須制定十年網絡發展計畫，強調整合網絡建模、情景開發和系統韌性評估。

一、能源系統和能源基礎設施的韌性

營運商的關鍵任務仍然是識別和評估風險，這將構成投資計畫和決策的基礎。他們還有一個特別的挑戰，就是定義標準和指標，以反映不同規模和較長時間範圍的中斷。在能源基礎設施的背景下處理韌性問題，能使得中斷的定義及其應對措施更加具體。然而該方法往往僅限於工程韌性，著重於系統性能，其風險在於過於嚴格，並且缺乏與其他生態系統的相互聯繫。專注於能源基礎設施的韌性確實有很大的局限性，但也希望針對該行業進行更具體的分析，從而有助於監管的改進。

在過去的十年中，由於缺乏對電網的維護，風險不斷增加，野火就是一個例子，顯示出與能源系統營運商的經濟監管模式有關的問題，以及在發生損害時營運商和公共當局承擔疏忽責任的風險。同時這也指向了一個基本問題：「韌性」是否應該作為經濟監管模式的一部分貨幣化，還是作為一個單獨的監管目標，不

同政策對社會影響巨大，需謹慎考慮，特別是在供應層面的風險更為劇烈。有些能源系統運營商是小型、公有、單一目的的公司，這些不同的經濟狀況很可能會限制其投資能力。

我們也可以觀察能源模型工具在一定程度上，將韌性作為參數考慮在內。事實上，由於能源模型是制定能源規劃決策的基礎，因此在這些模型中考慮韌性也至關重要。然而，確保韌性通常是根據這些模型中的公用事業成本來計算的（例如，風暴後更換或維修電線的價格），這對其實施和融資造成了障礙，因此需要轉型與改革。

在氣候變遷的背景下，天然氣和電力系統的韌性可能會因各種因素而受到不同的影響。

（一）天然氣系統韌性：

1. 容易受到極端天氣事件的影響（例如，氣溫突然下降導致對空間供暖的需求大幅增加或颶風擾亂海上天然氣生產設施），都可能會增加需求並擾亂供應和運輸基礎設施。
2. 由於歐洲是全球天然氣市場的一部分，其對數量有限的供應商、運輸路線和儲存設施的依賴，可能會因戰爭和地緣政治緊張局勢而導致供應破壞的風險增加。
3. 生產和運輸過程中甲烷（一種強效溫室氣體）的洩漏會對環境產生負面影響（例如北溪海上天然氣管道爆炸或美國阿利索峽谷天然氣洩漏）。

（二）電力系統韌性：

1. 容易受到極端天氣事件（例如颶風、乾旱、熱浪）的影響，進而影響發電（例如減少水力發電、增加冷卻需求）和輸配電網路（例如由於野火）。
2. 對集中式發電和輸電基礎設施的依賴，這些基礎設施容易遭受連鎖失效並導致大規模停電。
3. 加強風能和太陽能等再生能源整合，這些能源可能為間歇性，且遷就於天氣，並且需要對電網基礎設施和儲存解決方案進行額外投資以提高運作韌性。

雖然這兩種系統都具有不同的風險（天然氣更容易遭受地緣政治風險，而電力更容易遭受自然和氣候相關風險），但隨著新的低碳能源技術和載體（例如低碳氫，由水電解或蒸汽重整而產生）出現，天然氣和電力將變得更加需要一體化或進行部門整合。為了使歐洲實現淨零氣候目標，歐洲天然氣和電力系統會需要結合（藉由氫氣生產和混合熱泵等），因此電力產業特有的氣候相關風險，也將發生在天然氣系統上，反之亦然。

二、歐盟相關立法要求分析

（一）根據電力立法制定 TSO 和 DSO 網路發展計劃的標準：

根據《電力指令(Electricity Directive)》，輸電系統營運商(TSO)應至少每兩年向監管機構提交一份國家十年電網發展計畫(Network Development Plan, NDP)。在制定計畫時，輸電系統營運商必須考慮使用需求、迴響、儲能設施或其他資源作為系統擴展替代方案的潛力。他們還必須考慮消費、與其他國家的貿易以及整個聯盟和區域輸電網路投資計畫的前景。實施 NDP 所需的投資必須由 TSO 或監管機構（如果後者不執行的話）確認。

根據《電力指令》第 31 條，配電系統營運商(DSO)應負責確保系統能夠長期滿足合理的電力分配需求，並在經濟條件下運作、維護和發展安全、可靠和高效的電力系統，並將環境和能源效率一同納入考量。因此，電力供應的安全性和可靠性被視為歐洲 DSO 的關鍵任務，但也同樣沒有明確提到抵禦極端事件的能力。根據《電力指令》，DSO 有義務至少每兩年發布一次電網發展計畫，並將該計畫提交給監管機構。電網發展計畫應提供所需中長期靈活性服務的透明度，並應列出未來五到十年的投資計劃，以及特別強調連接新電網所需的主要配電基礎設施。

（二）ENTSO-E 和 ENTSO-G 制定聯盟級十年電網發展計畫的標準

《電力指令》第 30 條第（1）款（b）項，要求歐洲輸電系統營運商聯盟（ENTSO-E）和歐洲天然氣輸送系統運

營商聯盟（ENTSO-G）制定十年網絡發展計劃（Ten Year Network Development Plan, TYNDP），根據該法規第 48 條，TYNDP 是一份不具有法律約束力的文件。TYNDP 應包括「整合網絡建模、場景開發和系統韌性評估」，可見韌性被明確提及為制定 TYNDP 的一項標準，這會影響投資決策，投資決策應與計畫保持一致。因此，電網投資規劃是確保能源系統具有足夠韌性的首要條件，可以被視為實現歐盟電網監管韌性目標的第一步。

（三）區域停電規劃協調的制定標準

根據《電力法規》第 37 條第（1）款（f）項，區域協調中心應按照所規定的程序和方法進行「區域停電規劃協調」，該程序和方法已在第 714/2009 號法規（EC）第 18（5）條所通過的系統運作指南（SOGI）中規定。每個區域安全協調員應考慮相關輸電系統營運商提供的資訊來進行區域營運安全分析，以即時發現任何停電計畫中的不相容性。根據此評估，協調員應就停電計畫中檢測到的不相容問題列一份清單，以及為解決不相容問題提出的解決方案（SOGI 第 80 條第（4）款）。TSO 本身有義務將區域安全協調員提供的評估結果納入決策考量。

（四）與電力平衡、緊急情況和復原相關的網絡規範

2017 年 11 月 23 日歐盟制定的第 2017/2195 號《電力平衡指南》（EBGL），以及 2017 年 11 月 24 日第 2017/2196 號《E&R 網絡規範（Emergency and Restoration Network Code）》（用於電力緊急與復原電網相關規範），也包含了韌性建置的相關要求。電力平衡指的是 TSO 可以在任何時候啟用的一組操作流程，以確保系統頻率維持在預先定義的穩定性範圍內。如同 SOGI 所見，取得電力平衡所需之靈活性、需求響應或儲能的整合，都將增強電網的韌性。

《E&R 網絡規範》以 SOGI 的要求為基礎，定義了解決電力緊急情況和復原的規範與流程。SOGI 辨識了不同的關鍵系統狀態，包括正常狀態、警戒狀態、緊急狀態、斷電

狀態和復原狀態。SOGI 也定義了規範和原則，以確保滿足維護操作安全的條件。根據《E&R 網絡規範》，各 TSO 應制定「系統防禦計畫」（第 11-22 條）和「復原計畫」（第 23-25 條），並遵循三個步驟：計畫設計階段；計畫實施階段（落實必要措施）；啟動階段（積極運用計畫中確立之措施）。這項程序再次證明系統運營商的規劃是韌性建置很重要的一部分，其中風險情況的定義和緩解措施至關重要。

(五) 針對「罕見和極端自然災害」制定區域電力危機情境設定方法標準

ENTSO-E 必須根據 2019 年 6 月 5 日歐洲議會和歐盟理事會關於電力行業風險防範的第 2019/941 號法規（第 5 條），「制定電力危機情境最相關區域的方法，並提交給歐洲能源監管機構」並也必須考慮到「罕見和極端自然災害」的風險（第 5 條第（2）款（a）項）。

(六) 根據關鍵實體韌性指令對關鍵實體進行監管

根據《關鍵實體韌性指令(Critical Entities Resilience Directive)》，有一些能源資產是被定義為「關鍵實體(critical entities)」的，即對於維持重要社會功能、提供經濟活動、強化公共衛生、保護自然環境安全至關重要的實體。這些實體必須由所有成員國辨識通過（進行成員國風險評估），並將遵守一系列義務規範，旨在增強其在內部市場提供服務的韌性和能力。該指令要求成員國遵循基於風險的方法（關鍵實體風險評估），確定並制定有助於關鍵實體韌性的措施，著重於與履行重要社會職能或經濟活動最相關的實體。為了確保採取這種有目標性的方法，每個成員國應在統一的框架內對相關的自然和人為風險進行評估，包括跨部門或跨境性質的風險，這些風險都可能影響提供基本服務，包括人為事故、自然災害、公共衛生緊急狀態（例如流行病）以及混合威脅或其他對抗性威脅（例如恐怖攻擊）。

三、法律和監管環境中的障礙

儘管歐盟能源立法提出了多項氣候韌性解決方案，但這些方法過於特定，主要聚焦於能源系統效能，如充足性、供應安全、可靠性和頻率穩定性。面對能源系統整合需求和自然災害對能源生產及運輸資產的影響，需要更全面的監管方法來建立韌性。不同能源載體和生產類型，如天然氣和電力運輸資產，受到自然災害的影響不同。同樣地，離岸風能、分散式再生能源、核電廠和水力發電廠在面對天氣壓力時反應也各異。

歐盟立法對電網營運商提出了明確要求，電網規劃應作為評估能源系統韌性需求的基本要求，因為它是相關投資的基礎。無論短期還是長期，電網規劃的評估標準和方法必須完整涵蓋韌性建設的所有組成部分。核心問題是「韌性」是否應成為營運商經濟監管模式的一部分，通過經濟誘因進行投資，或者是否應將其獨立出來，作為單獨的監管問題。決策者必須考慮如何將韌性指標納入監管決策，以促進全面和有效的能源系統韌性建設。

四、成本效益分析作為提高韌性的工具

成本效益分析（CBA）是監管網路決策的基礎，尤其在電力和天然氣等產業。從 CBA 角度理解投資影響需要權衡成本與效益，但評估往往未能充分納入韌性效益，導致評估出現偏差。電力方面，《ENTSO-E 電網開發專案成本效益分析指南》和《十年發展計畫實施指南》等文件聚焦於供應安全，但很少涉及韌性問題。ENTSO-E 的 CBA 指南僅一次提到韌性，表示將「災害和氣候韌性」進行貨幣化非常具挑戰性，因低機率高衝擊事件評估困難，導致韌性效益常被低估。

為減少影響，ENTSO-E 傾向使用多標準分析，但仍需透過預防性維護和高度發展的規劃工具等積極措施來增強韌性。此外，保留硬體備件和建立跨區共享工程人員協議等策略，對意外中斷或緊急情況中的快速恢復至關重要，應列為投資考慮的優先事項。而引入經濟激勵措施，如對供應中斷的客戶進行補償，可進一步

促進經濟迅速復甦。然而，監管架構必須保持靈活性以適應此類策略，並在韌性、可靠性等相關成本之間取得最佳平衡。

天然氣方面，ENTSOG 於 2018 年開發的第二次 CBA 方法標誌著重大進步。不同於電力分析方法，天然氣分析方法明確涵蓋韌性考量，解決氣候和供應壓力等風險。天然氣 CBA 方法量化在壓力條件下，避免需求削減的益處，突顯系統韌性。它不僅評估需求削減風險，還獨立評估系統對氣候壓力的韌性及其他風險事件共同評估的能力。這種詳細的分析方法，提供了對韌性的全面理解，涵蓋影響天然氣系統運作的各種因素。

天然氣和電力產業之間的連結，進一步強調韌性的重要性。隨著歐洲走向全面脫碳，部門整合的趨勢讓氣候變遷對電力和天然氣系統的影響被放大。天然氣 CBA 方法有效解決了極端天氣事件對天然氣需求的影響，但缺乏系統定義和機率估算，野火等意外風險與災害對風險評估和貨幣化構成挑戰。

自 2022 年 6 月起生效的修訂版跨歐洲能源基礎設施法規 (Trans-European Networks for Energy Regulation, TEN-E) 標誌著重大轉變，它擴大了範圍，將能源儲存、二氧化碳網路和智慧電網等新的投資類別納入考量，反映不斷變化的能源格局和歐盟的氣候和能源目標，並考慮到氫運輸和儲存基礎建設，凸顯氫在實現脫碳目標方面的日益重要。然而，修訂後的 TEN-E 法規並未要求特定的天然氣 CBA 方法進行分析，這背離了先前的做法。法規要求為不同類別的候選項目制定統一的 CBA 分析方法，並與成員國和利益相關者進行細節諮詢。

五、電力市場的韌性和可靠性

韌性和可靠性是電力市場中的重要考慮因素。兩者的共同目標是確保穩定的電力供應，但韌性需要面對更廣泛的挑戰和衝突。量化可靠性時，常用指標如系統平均中斷持續時間指數 (SAIDI) 和系統平均中斷頻率指數 (SAIFI)，這些指標主要關注短期和小規模影響，提供系統效能的簡要概略。然而，韌性涉及處理低機率、高衝擊的天氣事件，這些事件通常持續時間長且影響廣泛。

對於增強大規模中斷韌性的投資項目，現有的可靠性指標並不足夠。

討論韌性相關決策時，通常會參考 N-1 標準。雖然傳統上認為採用更嚴格的標準（如 N-2 或 N-3）來增加系統冗餘是最佳方法，但最近的研究表明，增強網絡穩定性（尤其是在應對暴風雨等極端天氣事件時）可能更有效。

目前已有多種關於韌性指標的建議。例如，以效能為基礎的分析方法，強調使用定量數據來評估基礎設施在特定中斷期間的效能，考慮停電時間、恢復時間及損害和恢復成本。或是以單一組件和整個傳輸系統脆弱性建模為中心的分析方法，通過最佳電力潮流估算和隨機模擬來量化極端天氣事件的影響，包括預期能源未供應、負載頻率損失和離線輸電線路數量等指數。

儘管這些方法見解良好，但需進一步發展和完善，以解決電力市場韌性的複雜性，並適應不斷變化的問題。

六、天然氣市場的可靠性和韌性

考慮到天然氣運輸、分配和消費中斷的重大風險，歐洲天然氣市場的可靠性和韌性至關重要。天然氣基礎設施面臨嚴重風險，需要遵守歐洲標準化委員會（CEN）、ENTSOG 等歐盟機構及各國技術協會制定的技術標準和供應品質指標。

儲存設施在系統韌性中發揮關鍵作用，特別是在 2018 年北極爆炸等氣候事件期間，天然氣需求大幅增加。然而，在烏克蘭戰爭之前，僅有十個國家對天然氣儲存進行監管。戰爭後，歐盟委員會對所有成員國施加了到 2026 年的能源儲存注入義務，以增強供應安全。

歐盟沿海國家主要使用液化天然氣建設，既可安裝於內陸，也可安裝於浮動船舶上，如浮動儲存和再氣化裝置（FSRU），增強靈活性並降低建造成本。

監管供應連續性涉及各種指標，例如系統平均中斷持續時間指數（SAIDI），但不同營運商的解釋各異，增加了標準化的複雜性。天然氣品質差異（如高熱值和低熱值區域）可能分割市場並

限制聯繫能力。國家天然氣監管機構需要追蹤關鍵指標以確保安全 and 品質標準，強調互通性和標準化韋伯指數等定義的一致性。

七、貨幣化

將韌性效益貨幣化非常具有挑戰性，尤其是針對強暴風雨和野火等高衝擊、低機率事件。儘管最近監管發展（如義大利 DSO 對韌性的監管）有所進展，但將韌性指標納入決策過程仍然複雜。ENTSO-E 推崇的多標準方法是可行的，但將其納入監管決策需要更明確的細節討論，以充分激勵韌性投資。

電力的失載值（VoLL）和天然氣的供氣中斷成本（CoDG）等可靠性指數可用於貨幣化韌性效益，但全面的成本效益分析需結合發生機率和預期效益的建模。VoLL 估算還需考慮各種因素，包括客戶類型、時間、季節和停電持續時間。

Anderson 等人（2019）根據 VoLL 估算提出了與持續時間相關的客戶損失函數，以確認高衝擊事件的金錢成本。然而，傳統的 VoLL 措施可能無法完全反映長期、大規模停電的成本，這會擾亂電力供應以外的相關服務和基礎設施運作。在這種情況下，還必須考慮間接成本，包括由停電引起的其他損失，如交通號誌失靈導致的混亂和事故、通訊中斷造成的信息傳遞延遲、公共安全服務（如警察和消防）因停電而效率降低，以及醫院、學校、供水和污水處理系統、公共交通、通訊網絡等。整體而言，需要為大規模損失事件分配更高的失載值，並根據事故持續時間調整客戶損失函數，如此可以更完善地評估系統中斷的嚴重程度。結合 Anderson 等人（2019）所提出的方法，與 Panteli 等人的模型（2017）可以幫助將大規模破壞性事件的影響貨幣化，結合事故發生的機率來估算韌性投資的預期收益。

八、結論

我國可借鑒歐盟經驗，統一對「韌性」的定義，制定明確的監管指南，確保不同能源部門在面臨自然災害時協調一致。定期制定並更新電網和天然氣系統的發展計畫，全面考慮極端天氣事件的影響，並包括系統擴展、儲能設施及跨國貿易的考量，強調

系統韌性。隨著再生能源普及和分散式能源系統發展，提升電網靈活性尤為重要。

此外，成本效益分析（CBA）應包括韌性效益的評估，為投資決策提供依據。可以設計經濟激勵措施，鼓勵系統運營商投資韌性項目，並補償供應中斷的客戶，以促進經濟迅速復甦。隨著天然氣和電力系統之間的相互依賴性增加，應開發新的韌性指標，分析在一個部門遭遇問題時，另一部門如何提供支援，保持整個系統的穩定。雖然將韌性效益貨幣化具有挑戰性，但對電力網絡開發計畫的監管決策至關重要。應積極開展相關研究，建模並估算災害機率，準確評估韌性投資的效益。

提升能源系統的韌性對應對氣候變遷挑戰至關重要。我國可參考歐盟經驗，從監管框架、經濟激勵、能源系統規劃和技術投資等方面入手，建立更加穩定和韌性的能源系統，以確保在未來的自然災害和氣候變遷中，能源供應的可靠性和安全性。

參考文獻

Friðrik Már Baldursson., Catherine Banet., Chi Kong Chyong.(2023).
Building Resilience in Europe's Energy System. CERRE
(Retrieved from: <https://cerre.eu/publications/building-resilience-in-europes-energy-system/>)