

# مصادر الطاقة المتجددة وموثوقية وكفاءة أسواق الكهرباء

فرانك فيلدر وماري بيتيتيت

## عن كابسارك

مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) هو مركز عالمي غير ربحي يجري بحثاً مستقلة في اقتصاديات وسياسات وتقنيات الطاقة بشتى أنواعها بالإضافة إلى الدراسات البيئية المرتبطة بها. وتتمثل مهمة كابسارك في تعزيز فهم تحديات الطاقة والفرص التي تواجه العالم اليوم وفي المستقبل من خلال بحث غير منحازة ومستقلة وعالية الجودة لما فيه صالح المجتمع، ويقع كابسارك في الرياض بالمملكة العربية السعودية.

## إشعار قانوني

© حقوق النشر 2021 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبه بشكل ملائم لكابسارك. كما لا يجوز إعادة إنتاج هذا المستند أو جزء منه دون إذن خطي من كابسارك. ولا ينشأ عن المعلومات الواردة في هذا المستند أي ضمان أو تعهد أو أي مسؤولية قانونية –سواء مباشرة أو غير مباشرة- تجاه دقتها أو اكتمالها أو فائدتها. كما لا يجوز أن يعتبر هذا المستند –أو أي جزء منه- أو أن يفسر كنصيحة أو دعوة لاتخاذ أي قرار. الآراء والأفكار الواردة هنا تخص الباحثين معدي الدراسة، ولا تعكس بالضرورة موقف المركز ووجهة نظره.

يعتمد اختيار استخدام أسواق الكهرباء للتحويل إلى قطاع كهرباء فائق الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة على إمكانية تحقيق مستوى عالٍ من الموثوقية والكفاءة. وتقدم هذه الدراسة إطاراً لسياسات الموثوقية والمرونة والتكيف يكون مخصصاً لنظام الطاقة المتحرر الذي يتمتع بحصة كبيرة من مصادر الطاقة المتجددة. ويقدم هذا الإطار رؤى سياسات بشأن موثوقية سوق الكهرباء وأثار آليات التعويض على مصادر الطاقة المتجددة. كما يبين تحليلنا ضرورة إعادة النظر في تقييمات مدى كفاية أنظمة الطاقة المتحررة وتعزيز تعريف احتمالية فقد الجهد الكهربائي، والنظر صراحة في احتمالية زوال السوق. ويمكن للأسواق الكهربائية في ظل هذه الظروف أن تحقق نظرياً كلاً من الموثوقية والكفاءة من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بنسب كبيرة، وبتكاليف حدية صفرية أو شبه صفرية، فضلاً عن إمكانية مواجهة التحديات السوقية والفنية.

ينبغي اعتماد إطار الموثوقية والمرونة والتكيف لإجراء تحليلات للسياسات.

يتعين توسعة نطاق تعريف قيمة الجهد الكهربائي المفقود بحيث يشمل تكاليف المستهلكين غير الحاصلين على الكهرباء.

يجب على صانعي السياسات مراجعة تعريف مقياس احتمالية فقد الجهد الكهربائي ليشمل نتائج الموثوقية للأسواق الكهربائية.

يمكن للعديد من الخيارات الفنية أن تتعامل مع المستويات العالية لتوغل مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة وأن تتيح لصناع السياسات التعلم بمرور الوقت.

ينبغي أن يراعي صانعو السياسات إمكانية تقويض آليات التعويض عن مصادر الطاقة المتجددة لموثوقية ومرونة وكفاءة أسواق الجملة.

من جانب آخر، يرى البعض أنه ينبغي تنفيذ تحولات الطاقة بفعالية من حيث التكلفة من أجل الحصول على الدعم السياسي الكافي والحفاظ عليه. إذ لا يؤدي التحول الفعال من حيث التكلفة إلى إهدار الموارد على التدابير غير الفعالة والمكلفة. ويمكن بدلا من ذلك، نشر هذه الموارد لتلبية الاحتياجات المجتمعية الملحة الأخرى، مثل الرعاية الصحية والتعليم ورفع مستويات المعيشة (Lu et al. 2015). بينما يرى آخرون أنه ينبغي على عمليات التحول في مجال الطاقة بحد ذاتها أن تساعد بشكل مباشر على تحقيق هذه الأهداف الأخرى الأوسع نطاقا (Welton 2021).

بيد أن عمليات التحول في مجال الطاقة عادة ما تبدأ بإزالة الكربون من قطاع الطاقة الكهربائية. وتتوفر العديد من البدائل ذات الانبعاثات منخفضة الكربون وغير المحتوية على الكربون. كما تعتبر الكهرباء وقودا متعدد استخداماته في النقل والتدفئة وبعض العمليات الصناعية (Bompard et al. 2020). وقد اعتمدت العديد من الحكومات سياسات ترمي إلى تنفيذ نسب عالية من الطاقة المتجددة، بما فيها أهداف استخدام مصادر الطاقة المتجددة بنسبة 100 % وبدرجة عالية جدا (Barbose et al. 2016; Chapman and Itaoka 2018; Zappa, Junginger, and van den Broek 2019). وإجمالاً، قامت 139 دولة بتطوير خرائط طريق لتحقيق هدف استخدام مصادر الطاقة المتجددة بنسبة 100 % (Jacobson 2017). ويعرف (Kroposki 2017) المستويات العالية للغاية من مصادر الطاقة المتجددة على أنها نشر مصادر الطاقة بنسبة تتجاوز 50 % على أساس سنوي، وبنسبة تصل إلى 100 % على أساس فوري. ولقد استخدمنا هذا التعريف في هذه الدراسة.

غير أن البعض يتساءل عما إذا كان إنتاج الكهرباء باستخدام مستويات مرتفعة جدا من مصادر الطاقة المتجددة يجب أن يكون الغاية النهائية المفضلة للتحول بمنأى عن الوقود الأحفوري. وتشمل خيارات التخفيف الأخرى الطاقة النووية واحتجاز الكربون وإعادة التدوير وإعادة الاستخدام والعزل (Pollitt and Anaya 2016).

يعتبر التحول عن الوقود الأحفوري في قطاع الطاقة أمرا بالغ الأهمية للحد من الغازات الدفيئة وتحسين جودة الهواء وتعزيز أمن الطاقة. غير أن من المهم في الوقت نفسه المحافظة على القدرة على تحمل التكاليف وتسريع عجلة التنمية الاقتصادية (Goldthau 2014; Pollitt and Anaya 2016; Schmidt, Schmid, and Sewerin 2019). ومع ذلك، فليس من الواضح ما إذا كان من الممكن تحقيق تحول يحرز تقدما في التنمية الاقتصادية بأسعار معقولة وبمنأى عن الوقود الأحفوري (Sorrell 2010). إضافة إلى ذلك، قامت العديد من الدول بتحرير قطاعات الكهرباء فيها أو أنها لا تزال تعمل على ذلك (Joskow 2006a; Urpelainen and Yang 2019). وعلى الرغم من أن الأدلة الجوهريّة تدعم الفوائد الناتجة عن كفاءة أسواق الكهرباء (Fabrizio, Rose, and Wolfram 2007)، إلا أن هذه النتائج ما تزال خاضعة للتصحيح والتنازع بشأنها في الدراسات الأخرى (De Vries 2009; Joskow 2006b; Pollitt 2009). ومن ثم فإن فهم إمكانية تحول أسواق الكهرباء بكل موثوقية وفعالية من حيث التكلفة إلى مصادر الطاقة المتجددة وتنفيذ ذلك بنجاح تام -لا سيما بالاقتران مع السياسات الأخرى- يعتبر أمرا بالغ الأهمية.

وتجدر الإشارة إلى أن لدى صانعي السياسات أهداف سياسية واقتصادية قد لا تدعم أسواق الكهرباء ذات الكفاءة، وقد تشمل هذه الأهداف تعزيز إضفاء الطابع الديمقراطي على عملية اتخاذ القرارات المتعلقة بالسياسات وإعادة تشكيل القوى السياسية والاقتصادية، ودعم الصناعات المحلية وتحويل المخاطر الاستثمارية من الممولين إلى المطورين (Arentsen and Künneke 1996; Pollitt and Anaya 2016; Tomain 2015; Welton 2018). وقد يؤدي السعي إلى تحقيق هذه الأهداف الأخرى إلى تقويض فوائد أسواق الكهرباء (Felder 2011). علاوة على ذلك، قد تمنع المعارضة السياسية صانعي السياسات من تبني أسواق الكهرباء التي تدمج بنحو فعال وصريح العوامل البيئية الخارجية من خلال أسعار الجملة (Grubb and Newbery 2007).

سلبية لعدة ساعات وذلك بحسب ما أوردته دراسة (Blazquez et al 2018). وبالتالي، فإن هنالك حاجة إلى المزيد من الإعانات غير السوقية لجذب الاستثمارات اللازمة للاستمرار في زيادة النسبة المئوية لمصادر الطاقة المتجددة.<sup>3</sup>

بينما يرى آخرون أن المشكلة لا تكمن في التقنيات أو الأسواق وإنما في آليات التعويض عن المصادر المتجددة من خارج السوق (Brown and Reichenberg 2020; Felder 2011). ولا يزال آخرون يرون أن شرط الأرباح الصفرية قد تم الإخلال به من خلال مزيج من التوليد القابل وغير القابل للنقل والتوزيع (Eisenack and Mier 2019). وأخيرا، يشير البعض إلى وجود سقف لمعدل انتشار مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بحد أقصى وذلك لأسباب هندسية واقتصادية (Ahmady-ar et al. 2017; Denholm and Margolis 2007). وبالتالي، تواجه أسواق الكهرباء القائمة على الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة تحديات جمة من حيث الموثوقية والكفاءة. ولذلك، فإن هذه الدراسة تبحث في موثوقية وكفاءة هذه الأسواق.

ولقد جرى توزيع ما تبقى من هذا البحث على النحو الآتي: يقترح القسم (2) إطارا للموثوقية والمرونة والتكيف يتناسب مع التحديات التي تفرضها الأنظمة المتقدمة للطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة. ويطلع بوضوح أسواق الكهرباء (الكمية التي تمت موازنتها من حيث العرض والطلب في هذه الأسواق) باعتبارها مسألة أمثلة أوسع نطاقا. ويحلل القسم (3) التحديات الفنية والسوقية الرئيسة المرتبطة بزيادة مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة في أنظمة الطاقة المنحرفة، كما يعرض بعض الأمثلة العملية من الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا. ونجد أنه بالرغم من وجود تحديات فنية للأنظمة المتقدمة لمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة إلا أنه من الممكن مواجهتها من خلال مجموعة من الإستراتيجيات. وأخيرا، يختتم القسم (4) هذا البحث بتوصيات تتعلق بالسياسات.

وبغض النظر عن ماهية هذا التساؤل، فإنه لا بد من السؤال عما إذا كانت مصادر الطاقة المتجددة وأسواق الكهرباء غير متوافقة بطبيعتها. فإن كانت كذلك، فلربما يتعين على صانعي السياسات وقف جهودهم في مجال التحرير، أو إعادة تنظيم قطاع الطاقة الكهربائية.

لذلك فإننا نبحث في مدى توافق أسواق الكهرباء مع المستويات العالية للغاية من مصادر الطاقة المتجددة بناء على أساسيات هندسية واقتصادية تدعم الأسواق القائمة.

وعلى الرغم من أن مصادر الطاقة المتجددة قد تعزز الرفاهية من خلال تحسين النتائج البيئية، إلا أن أثرها النهائي يعتمد على تكاليفها بالمقارنة مع التقنيات الأخرى وفوائدها البيئية.

تتمتع سياسات مصادر الطاقة المتجددة بأهداف متعددة ومتزامنة. فبالإضافة إلى الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة وغيرها من الانبعاثات، يمكنها العمل على تطوير صناعات الطاقة المتجددة المحلية والناشئة. كما يمكنها أن تساعد في تشكيل تحالفات سياسية بين أنصار البيئة وجماعات الأعمال التجارية، وقد تعمل هذه السياسات كذلك على جذب أسعار الكهرباء المرتفعة عن عامة الناس<sup>1</sup> (Michaels 2008). نتطرق إلى مناقشة هذه المواضيع في سياق الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا.

فيما ادعى البعض عدم توافق تحرير الطاقة المتجددة والمتغيرة والمتقطعة<sup>2</sup> التي لها تكاليف حدية شبه صفرية، مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية وتوليد طاقة الرياح مع أسواق الكهرباء (Blazquez et al. 2018; Blazquez, Fuentes, and Manzano 2020). ونظرا لعدم قابلية نقل وتوزيع مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة أو محدودية قابلية انتشارها، فإنه لا يمكن التحكم في نواتجها لمطابقة حركتي العرض والطلب، الأمر الذي يعد ضروريا لضمان الموثوقية. علاوة على ذلك، فإنه وبالالتزام مع نمو حصة السوق من مصادر الطاقة المتجددة تكاد تكون أسعار الجملة معدومة أو

# 2. موثوقية أنظمة الطاقة المتحررة ومرونتها وقدرتها على التكيف

يستغرقه الحد من حجم انقطاعات التيار الكهربائي وعودة النظام إلى وتيرة عمله الطبيعية. وعلى الرغم من أن المرونة تصف تجربة ما بعد انقطاع التيار الكهربائي، إلا أن سياساتها يتم وضعها بطبيعة الحال قبل انقطاع التيار الكهربائي.

نورد فيما يلي متغيرات الموثوقية والمرونة:

$(F_y)$ : تواتر انقطاع التيار الكهربائي في السنة ( $y$ )

$(U_y)$ : متوسط مدة انقطاع التيار الكهربائي في السنة ( $y$ )، موضح بالساعات

$(S_y)$ : متوسط حجم انقطاع التيار الكهربائي في السنة ( $y$ )، موضح بالميجاواط

أخيرا، يتم تحديد حالات انقطاع التيار الكهربائي في السنة ( $y$ ) من خلال هذه المتغيرات الثلاثة، ويتم حساب إجمالي النقص في حجم الكهرباء من الشبكة في السنة ( $y$ ) على النحو التالي  $F_y, U_y, S_y$ .

كذلك نقترح إضافة قابلية التكيف إلى معجم الموثوقية والمرونة، ويمكن أن تفسر المرونة الإجراءات التي يمكنها التخفيف من التكاليف البشرية والاقتصادية لحالات انقطاع التيار الكهربائي فور حدوثها، والتي يمكن أن تكون كبيرة للغاية. ويتمثل أحد هذه الإجراءات في قطع الكهرباء بنظام التناوب بحيث يتم توزيع الطاقة المتوفرة على نطاق واسع. وتشمل الإجراءات الأخرى افتتاح ملاجئ تعمل على تقديم خدمات التدفئة والتبريد وغيرها من مهام السلامة العامة الأخرى وتوفير إمدادات الطاقة الاحتياطية. فيما نستخدم  $(A_y)$  للدلالة على مستوى القدرة على التكيف في السنة ( $y$ ). ونوضح بشكل صريح العلاقة بين التكلفة الاجتماعية والاقتصادية المترتبة على حالات انقطاع التيار الكهربائي ( $I_y$ ) والجهود المبذولة للتكيف ( $A_y$ ). وأخيرا، نقوم بتوسيع نموذج الموثوقية والمرونة الكلاسيكي

يناقش هذا القسم معجم الموثوقية والمرونة والقدرة على التكيف ومن ثم يقدم إطارها بمزيد من التفصيل.

## 1.2 معجم الموثوقية والمرونة والحاجة إلى التكيف

تتكون أنظمة الطاقة الموثوقة من الأمن (استجابة النظام الديناميكي للتغيرات) والكفاية (ثبات وجود التسهيلات الكافية لتلبية الطلب) <sup>4</sup> (Billinton and Allan 2003; Zappa, Junginger, and van den Broek 2019). وتعتبر قيمة الكهرباء المشار إليها بقيمة الجهد الكهربائي المفقود مرتفعة للغاية بالنسبة للعديد من مستهلكي الكهرباء (Ovaere et al. 2019). وبالتالي، يجب لنظام الطاقة الفعال المتسم بالكفاءة والأسواق أن يحقق التوازن بين العرض والطلب بنحو موثوق. ويشار إلى أن لمصطلحي "الموثوقية" و"المرونة" العديد من التعريفات في سياق أنظمة الطاقة الكهربائية (Billinton and Allan 1984; Kahnouei, Bolan-di, and Haghifam 2017; Phillips 2019; Plotnek and Slay 2021; Zappa, Junginger, and van den Broek 2019). ويتمثل أحد تعاريف الموثوقية في قدرة نظام الطاقة على توصيل الكهرباء للمستهلكين بالقدرة المطلوب (Zappa, Junginger, and van den Broek 2019). ويمكن قياس الموثوقية من خلال تكرر انقطاع التيار الكهربائي وحجمه ومدته (Hall, Ringlee, and Wood 1968).

وتجدر الإشارة إلى أن تعريف المرونة شهد تغيرا كبيرا بمرور الوقت (Plotnek and Slay 2021)، غير أننا وتجنبنا لتداخل تعريف المرونة مع تعريف الموثوقية فإننا نعتبر المرونة استجابة لحدث معطل (Phillips 2019)، وبعبارة أخرى، يشير مصطلح المرونة إلى قدرة الشبكة على التعافي من حالة انقطاع التيار الكهربائي الخارج عن السيطرة أو الانقطاع المتتالي أو الانقطاعات المتناوبة. وبالتالي، فإن المرونة تقاس على أنها الوقت الذي

## 2. موثوقية أنظمة الطاقة المتحررة ومرونتها وقدرتها على التكيف

تواتر وحجم ومدة انقطاعات التيار الكهربائي وما يرتبط بها من التكاليف الاجتماعية والاقتصادية المصاحبة (التي تعتمد على مستوى القدرة على التكيف). وتحدد هذه السلسلة مجتمعة مدى موثوقية الشبكة. غير أنه يمكن استخدام العديد من الأطر التحليلية للموثوقية لإجراء هذه الحسابات، ويعرف الإطار الذي تم تطبيقه على أنظمة الطاقة بإطار التقييم الاحتمالي للمخاطر (Felder 2001).

يمكن تصنيف السلسلة العديدة التي تؤدي إلى حالات انقطاع التيار الكهربائي إلى فئتين بناء على ما إذا كانت بداياتها أعطال مستقلة أو تابعة (Felder 2001)<sup>8</sup>، حيث تعد الأعطال المستقلة أكثر شيوعاً من الأعطال التابعة ولها تأثيرات أقل على موثوقية نظام الطاقة. بينما تشمل الأعطال التابعة سوء الأحوال الجوية وفشل نظام توصيل الوقود ونظام المراقبة والتحكم والتصرفات المشبوهة والضارة. ونظراً لامتداد أنظمة الطاقة بموثوقية عالية من حيث التصميم، نجد أنه لا بد من تعطل العديد من المكونات في العادة لتؤدي بالتالي إلى حدوث حالات الانقطاع في التيار الكهربائي.

يشتمل الإطار التحليلي الكامل لموثوقية نظام الطاقة ومرونته وقدرته على التكيف في السوق على ست خطوات. أولاً، تحديد وتتبع جميع السلسلة التي قد تؤدي إلى حدوث حالات انقطاع للتيار الكهربائي فوق مستوى احتمالي معين بسبب الأعطال المستقلة أو التابعة. ثانياً، مراعاة الأعطال التي تحدث داخل السوق وخارجها. ثالثاً، تقييم قدرة السوق على توضيح حركتي العرض والطلب من حيث الاحتمالية. أو بعبارة أخرى، أنه لا يفترض أن تقوم السوق بهذه الوظيفة بمنتهى الموثوقية، وتعتبر آلية التسعير مفيدة في هذا الخصوص من خلال توفير الحوافز لزيادة العرض وخفض الطلب. رابعاً، يتم تقدير احتمال وقوع كل حدث في التسلسل الزمني لانقطاع التيار الكهربائي بناء على المعطيات. خامساً، يتم تقييم تكاليف وفوائد تغيير احتمالات تسلسل حالات انقطاع التيار الكهربائي على كامل سلسلة إمداد الكهرباء. سادساً، يقدم الإطار مدخلات

من خلال اقتراح أن يتم تحليل أنظمة الطاقة ضمن إطار الموثوقية والمرونة والتكيف.

كما تعتمد موثوقية نظام الطاقة ومرونته وقدرته على التكيف مع الأسواق بدرجة كبيرة على الأصول التي يستثمرها أو يشغلها المشاركون من خارج السوق. وبعبارة أخرى، أنها تعتمد على شركات النقل والتوزيع المنظمة اقتصادياً والجهة المشغلة للنظام.<sup>5</sup> وتعتبر هذه الأصول ذات أهمية بالغة بالنسبة لأداء نظام الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، تعتمد القدرة على التكيف على السياسات الأوسع نطاقاً مقارنة بتلك المرتبطة بقطاع الطاقة وغيرها من البنية التحتية الأساسية الحيوية. علاوة على ذلك، هناك ديناميكيات مادية وسوقية وتنظيمية مهمة بين هذه المكونات التي تؤثر على الموثوقية والمرونة والتكيف، كما سنناقشه أدناه. ولهذه الأسباب، فإن الأسواق لا تستطيع بمفردها ضمان وجود مستوى فعال من الموثوقية والمرونة والتكيف.

يمكن تقسيم موثوقية نظام الطاقة ومرونته وقدرته على التكيف إلى تسلسلات من الأحداث التي تؤدي إلى حدوث انقطاع للتيار الكهربائي<sup>6</sup>، وقد يؤدي هذا الحدث عندئذ إلى تعطل المعدات الأخرى أو تغير ظروف النظام، مثل حجم الحمل الكهربائي الذي لا يمكن تقديمه بالكامل. وينتهي التسلسل بوحدة من ثلاث حالات غير متعارضة لنظام الطاقة، على النحو التالي.

1. يتم توفير الكهرباء لجميع الأحمال الثابتة
  2. يتم توفير الكهرباء لبعض الأحمال الثابتة، ويتم فصل الكهرباء عن بعضها بطريقة مقننة للموازنة ما بين حركتي العرض والطلب (أي قطع التيار الكهربائي بنظام التناوب).
  3. يتم فصل الأحمال الثابتة بنحو لا يمكن التحكم فيه (أي انقطاع التيار الكهربائي).<sup>7</sup>
- تحدد حسابات الموثوقية والمرونة والتكيف في جوهرها هذه السلسلة وتصنفها وتجمعها لقياس أثارها على

## 2. موثوقية أنظمة الطاقة المتحررة ومرونتها وقدرتها على التكيف

على الأسواق خارج نظام الطاقة الكهربائية (بما فيها الأسواق الناقصة أو غير المكتملة) التي تعمل على تسليم الوقود وسياسات المرونة والقدرة على التكيف التي يعتمدها صانعو السياسات.

كما أننا نقترح في هذا السياق، إضفاء الطابع الرسمي على هذا الإطار بناء على تعظيم الرفاهية فيما يتعلق بمتغيرات الموثوقية والمرونة والقدرة على التكيف. يتناول الإطار المعياري المتغيرات الفيزيائية (أي القدرة والطاقة)<sup>9</sup> ويأخذ في الحسبان احتمال فقد الجهد الكهربائي باعتباره أحد المدخلات. فيما يعمل نهجنا على زيادة إجمالي الرفاهية المتأثرة من قطاع الكهرباء، التي يتم تقديرها على أنها المنفعة الاجتماعية لاستهلاك الكهرباء مطروحا منها التكلفة الاجتماعية الناجمة عن حالات انقطاع التيار الكهربائي، فضلا عن التكلفة الإجمالية لتوليد الكهرباء ونقلها.

تتألف المنافع الاجتماعية لاستهلاك الكهرباء من عنصرين يتمثل الأول في المنفعة ( $V$ ) من الكهرباء المستهلكة من الشبكة. ويتم تعديل هذه المنفعة بناء على قدرة السوق على موازنة وتوفير الأصول المادية. أما المكون الثاني فيتمثل في المنفعة ( $W$ ) من استهلاك الطاقة المولدة ذاتيا في حالة نقص إمدادات الطاقة الكهربائية من الشبكة. ويرتبط هذا العنصر الأخير بقدرة نظام الطاقة على التكيف. ويعتبر القياس الكمي لمنفعة استهلاك الكهرباء عاملا رئيسا في حل إطار الموثوقية والمرونة والقدرة على التكيف. وقد تتباين هذه المنفعة بين المستهلكين وفقا لأصل مصدر الطاقة الكهربائية (من الشبكة أم من التوليد الذاتي). فيما تمثل التكاليف الاجتماعية الإضافية الناجمة عن حالات انقطاع التيار الكهربائي التكاليف التي لا تنعكس في فوائد استهلاك الكهرباء، التي تعتمد جزئيا على سياسات القدرة على التكيف.

كما أن الدالة الموضوعية لإطار الموثوقية والمرونة والتكيف مقيدة أيضا بفيزياء أنظمة الطاقة، وعليها أن توازن ما بين حركتي العرض والطلب (القيود 2ب) وأن

لتقييم سياسات الموثوقية والمرونة والقدرة على التكيف بحيث يمكن المفاضلة ما بين التدابير الثلاثة بما فيها حساب أسباب عدم اليقين.

غير أن تواتر حالات انقطاع التيار الكهربائي وحجمها ومدتها يرتبط بالتكاليف الاقتصادية والاجتماعية (Matthewman and Byrd 2014). ولا تعتبر التكلفة الاقتصادية وقيمة الجهد الكهربائي المفقود، مجرد دولارات لكل ميغاواط في الساعة وإنما دالة لجميع المتغيرات الثلاثة، ويمكن خفضها من خلال القدرة على التكيف. بالإضافة إلى ذلك، يترتب على حالات انقطاع التيار الكهربائي تكاليف اجتماعية، مثل الخسائر في الأرواح البشرية، التي يمكن قياسها بالدولار إلا أنه من الأنسب تعقبها بنحو منفصل لتجنب خفضها إلى مجرد رقم بعملة الدولار. فضلا عن ذلك، تختلف قيمة الجهد الكهربائي المفقود بحسب نوع العميل، وما إذا كان قد تم إشعاره بذلك والفترة الزمنية التي تفصل ما بين الإشعار وحدث انقطاع التيار الكهربائي ومدة استمرار حالة الانقطاع (Joskow 2006c; Ovaere et al. 2019). وبالتالي، يمكن اعتبار قيمة الجهد الكهربائي المفقود (المشار إليه بالرمز  $(I_y)$ ) موقرا تختلف قيمته العددية على طول المصفوفة متعددة الأبعاد:

$$I_y = \text{function} (F_y, U_y, S_y, A_y). \quad (1)$$

وأخيرا، تزيد الطبيعة المتغيرة والمتقطعة للطاقة المتجددة من الحاجة إلى إطار واضح للموثوقية والمرونة والتكيف.

### 2.2 إطار الموثوقية والمرونة والتكيف لأنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة العالية المتجددة المتغيرة والمتقطعة

يعتمد أداء أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة العالية المتجددة المتغيرة والمتقطعة أو العالية للغاية على التحديات الفنية والسوقية، بما فيها موثوقية آلية موازنة السوق. كما يعتمد أيضا على نقل وتوزيع الطاقة (اللدان يخضعان للتنظيم الاقتصادي وليس للسوق) وكذلك

## 2. موثوقية أنظمة الطاقة المتحررة ومرونتها وقدرتها على التكيف

سنة ( $y$ ). ويجب ألا يقتصر كل سيناريو على افتراضات الطقس فحسب، بل ينبغي أن يتضمن كذلك مجموعة من الأحداث الهامة في وحدات الشبكة أو وحدات التوليد. ويعرف هذا المفهوم في المعجم الأوروبي "بعنصر الشبكات الحرجة والطوارئ" بحسب ما حددته الشبكة الأوروبية لمشغلي نظام نقل الكهرباء (2018). ويمكن اشتقاق السياسات التشغيلية والتخطيطية من الحل الأمثل ( $F_y, U_y, S_y, A_y$ ) لتسهيل التنفيذ العملي. وتؤثر هذه السياسات من الناحية العملية على الاستثمارات في البنية التحتية والتكاليف المصاحبة لرأس المال والصيانة والتشغيل، كما أنها قد تفرض قيودا على العمليات التشغيلية مثل متطلبات احتياطي التشغيل.

تحتزم القوانين الفيزيائية للشبكة (القيود 3د). ويمكن أن تكون الطاقة غير المخدومة، المشار إليها بالرمز  $ENS_{h,y}$ ، بسبب ترشيد الأسعار (أي أن السوق لا تعمل على الموازنة) أو الترشيد غير السعري. ولقد جرى طرح الموازنة في السوق بوضوح في القيد (2ج). كما أننا نميز ما بين حجم الكهرباء الناتجة عن الموازنة في السوق ( $\pi_{h,y}^M$ ) والحجم الناتج عن إجراءات مشغل النظام من خارج السوق ( $\pi_{h,y}^R$ ).

يتعين بالإضافة إلى مراعاة البعد الزمني (السنوات  $Y \in \mathcal{Y}$ )، القيام بحل المسألة من خلال مراعاة العديد من السيناريوهات التشغيلية ذات الصلة في كل

### Sets

$\mathcal{Y}$	Years.
$\mathcal{H}$	Hours.

### Indexes

$h$	Hour in $\mathcal{H}$ .
$y$	Year in $\mathcal{Y}$ .

### RRA Variables

$F_y$	Frequency of power outages in year $y$ .
$U_y$	Duration of power outages in year $y$ .
$S_y$	Size of power outages in year $y$ .
$A_y$	Adaptability level in year $y$ .

### Parameters

$D_{h,y}(p)$	Electricity demand function in hour $h$ of year $y$ .
$a$	Discount rate.

### Function specifications

#### Physical functions

$K_y^G(F_y, U_y, S_y, A_y)$	Generation capacities in year $y$
$K_y^T(F_y, U_y, S_y, A_y)$	Transmission infrastructures in year $y$
$K_y^B(F_y, U_y, S_y, A_y)$	Distribution infrastructures in year $y$
$K_y^F(F_y, U_y, S_y, A_y)$	Fuel infrastructures in year $y$
$K_y^A(F_y, U_y, S_y, A_y)$	Adaptability infrastructures in year $y$ (e.g., back-up generator)
$\Pi_{h,y}(p, K_G)$	Electricity generation from the power system in hour $h$ of year $y$
$ENS_{h,y}$	Volume of energy not served by the grid in hour $h$ of year $y$
$SGE_{h,y}(A_y, ENS_{h,y})$	Volume of self-generated electricity in hour $h$ of year $y$

## 2. موثوقية أنظمة الطاقة المتحررة ومرونتها وقدرتها على التكيف

### Cost and Value Functions

$G_y(K_y^G)$	Generation cost in year $y$
$T_y(K_y^T)$	Transmission cost in year $y$
$B_y(K_y^B)$	Distribution cost in year $y$
$E_y(K_y^G, K_y^T, K_y^B, K_y^F, K_y^A)$	Cost of pollution externalities in year $y$
$F_y(K_y^F)$	Cost of the fuel infrastructures in year $y$
$O_y(K_y^A)$	Adaptation cost (increases with A) in year $y$
$C_y = G_y + T_y + B_y + F_y + O_y + E_y$	Total cost in year $y$
$I_y(F_y, U_y, S_y, A_y)$	Socioeconomic impact cost of power outages, <i>Societal VOLL</i> . (decreases with A)
$V$	Utility of consuming electricity from the grid
$W$	Utility of consuming electricity that has been self-produced

### Other functions

$\Pi_{h,y}^M$	Quantity of electricity cleared in the market in hour $h$ of year $y$
$\Pi_{h,y}^R$	Additional quantity of electricity produced thanks to system operator's actions in hour $h$ of year $y$ .

### Optimization problem

$$\max_{F,U,S,A} \sum_{y \in \mathcal{Y}} \left( \sum_{h \in \mathcal{H}} V(D_{h,y} - ENS_{h,y}) + \sum_{h \in \mathcal{H}} W(SGE_{h,y}) - I(A_y)F_yU_yS_y - C(F_y, U_y, S_y, A_y) \right) (1+a)^{-y} \quad (2a)$$

subject to

$$D_{h,y} = \Pi_{h,y}(F, U, S, A) + ENS_{h,y} - \text{network losses} \quad \forall h \in \mathcal{H}, \forall y \in \mathcal{Y} \quad (2b)$$

$$\Pi_{h,y} = \Pi_{h,y}^M + \Pi_{h,y}^R \quad \forall h \in \mathcal{H}, \forall y \in \mathcal{Y} \quad (2c)$$

$$\text{network and generation constraints} \quad \forall h \in \mathcal{H}, \forall y \in \mathcal{Y} \quad (2d)$$

المتعلقة بالأسواق والقيود التشغيلية وغيرها من خيارات السياسات). ثالثاً، تعتبر آلية السوق مجرد طريقة واحدة لضمان موثوقية النظام. وأخيراً، تتضمن آثار موثوقية الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة العالية للغاية (أو أي قرارات استثمارية) تفاعلات معقدة مع متغيرات اتخاذ القرار الأخرى، وفوائد استهلاك الكهرباء والتكاليف وقرارات السياسات.

نحصل بتحليلنا لهذا النموذج على النتائج التالية: أولاً، تبين شروط الترتيب الأول أن الفائدة الحدية أو الهامشية لاستثمار دولار إضافي في الموثوقية والمرونة والتكيف تكون عند المستوى الأمثل، وتخضع هذه النتيجة لقيود ملزمة. ثانياً، تنطبق نفس النتيجة على التحسينات التدريجية في الفئات المحددة للبنية التحتية (مثل توليد الطاقة ونقلها وتوزيعها بالإضافة إلى آلية الموازنة

# 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمتقطعة

غير أن الأهم من ذلك، أن بعض مصادر الطاقة المتجددة مثل منشآت توليد الطاقة الكهرومائية والكتلة الحيوية والوقود الحيوي والطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الشمسية المركزة تعتبر قابلة للتوزيع. إلا أن توافرها يعتمد في العديد من الحالات على الظروف المحلية (Tran and Smith 2017; Zappa, Junginger, and van den Broek 2019). بالإضافة إلى ذلك، نجد أن تكلفة تقنيات تخزين الطاقة الجديدة التي يمكنها توفير الطاقة من الميلي ثانية إلى الساعات آخذة في الانخفاض، فضلا عن أن هذه التقنيات تعمل على توفير خدمات متعددة (Elshurafa 2020). وبالتالي، فإن التطوير الكامل لأنظمة الطاقة المتجددة (بنسبة 100%) لا يتطلب بالضرورة نسبة 100% من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة أو حتى مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة العالية للغاية. إلا أن هذه النقطة تغيب عن البال في بعض الأحيان عند حذف كلمة "المتغير" من المناقشة.

بيد أنه تتوفر العديد من الحلول غير الحصرية والمتزامنة للتعامل مع سمات مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة، التي تشمل التنوع الجغرافي في مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة، وتحسين التنبؤ بمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة وتخزين الطاقة، بما فيها المركبات الكهربائية والحد من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة والتحكم النشط بها، والتحكم في الحمل الكهربائي وتعزيز أنظمة النقل. بينما تشمل الحلول الأخرى المكثفات المتزامنة وتعزيز العمليات المشتركة مع أنظمة الطاقة المجاورة والتدفئة والتبريد المناطقي والمضخات الحرارية والعدادات الذكية كما تتوفر حلول تقنية المعلومات والاتصالات وتحسين تصاميم السوق (Brown et al. 2018; Kroposki 2017; Paiho et al. 2018; Papaefthymiou and Dragoon 2016).

تشكل أسواق الكهرباء عنصرا رئيسا في إطار تحسين الموثوقية والمرونة والقدرة على التكيف على النحو الأمثل لأنظمة الطاقة (راجع القسم 2)، وقد تطرح مصادر الطاقة المتجددة تحديات جديدة أمام تشغيل أسواق الطاقة. يناقش هذا القسم من الدراسة التحديات الفنية والسوقية المرتبطة بمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بدرجة كبيرة في أنظمة الطاقة استنادا على أمثلة عملية مستمدة من أنظمة الطاقة الأمريكية والأوروبية. وترتبط هذه التحديات مباشرة بإطار الموثوقية والمرونة والتكيف الذي تم وصفه في القسم السابق. فيما يستعرض القسم الفرعي (3.1) الحلول التقنية التي تسمح بعمل أنظمة الطاقة ذات مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بدرجة عالية، ومن ثم يوضح القسم الفرعي (3.2) إمكانية تعامل الأسواق المحررة لبيع الكهرباء بالجملة مع مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بتكاليف متغيرة صفرية أو شبه صفرية.

## 3.1 الجدوى الفنية لأنظمة الطاقة المتجددة العالية التغير والمتقطعة

تطرح مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة تحديات فنية في الموازنة ما بين العرض والطلب لأن نواتجها غير قابلة للتوزيع ومتقطعة (Heard et al. 2017). كذلك تتعامل السياسات التشغيلية في إطار الموثوقية والمرونة والتكيف (راجع القسم 2)، مع مشكلات الموازنة من خلال تنفيذ القوانين المناسبة مثل استيفاء المتطلبات الفنية لتحقيق التوازن في النظام. إلا أنه لا يمكن تنفيذ هذه العملية إلا في حال وجود الحلول الفنية لموازنة العرض والطلب في أنظمة الطاقة ذات مصادر الطاقة المتجددة والمتقطعة العالية للغاية، وسنتطرق في هذا القسم الفرعي إلى مناقشة مثل هذه الحلول.

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمتقطعة

متعلقة بالموثوقية، إلا أن العديد من مصادر الطاقة المتجددة والمصادر المنخفضة الكربون أو غير الباعثة له ليست متقطعة. ويمكن للعديد من الإستراتيجيات المتزامنة معالجة التغير والتقطع. كما يمكن اعتماد السياسات ذات التكاليف المنخفضة، بما فيها الإدخال التدريجي لمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بهدف المساعدة في تقييم أي تحديات متعلقة بالموثوقية والتصدي لها.

#### 2.3 أسواق الكهرباء بالجملة ذات مصادر الطاقة العالية للغاية والمتجددة المتغيرة والمتقطعة

يمكن لأسواق الكهرباء بالجملة عندما يتم دمجها مع السياسات الأخرى أن تكون أداة لتحسين كفاءة قطاع الطاقة مع الحفاظ على الموثوقية (Hogan 2014). وينبغي أن تراعي أسواق الجملة المصممة بنحو سليم الخصائص الفيزيائية الفريدة للكهرباء<sup>10</sup> (Felder 2020). كما يتعين عليها أن توازن ما بين بين حركتي العرض والطلب بصورة فورية ضمن حدود ضيقة لتجنب حالات انقطاع التيار الكهربائي<sup>11</sup>. وترتبط هذه الخاصية تحديداً بما إذا كانت مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة غير متوافقة مع أسواق الكهرباء. فضلاً عن ذلك، ينبغي أن يتساوى العرض والطلب لمنع حدوث الانقطاعات المتتالية للتيار الكهربائي. ويمكن تحقيق موازنة العرض والطلب إما من خلال آلية الموازنة أو بفصل الحمل الكهربائي (أي قطع التيار الكهربائي بنظام التناوب) واتباع برنامج ترشيد غير سعري.

نجد أن سوق الكهرباء تتفرد بهذه الخاصية. بينما نجد أنه في الأسواق الأخرى وعند حدوث نقص في العرض لا يستطيع المستهلكون المتزايدون شراء السلعة أو الخدمات المرغوبة (Jaffe and Felder 1996). وعلى الرغم من أن فائض العرض والطلب يتسببان في مخاوف بشأن الموثوقية، إلا أن فائض الطلب يجسد خوفاً أكبر. إذ يمكن معالجة فائض العرض من خلال وقف التوليد الكهربائي وخفض الأسعار لزيادة الطلب<sup>12</sup>.

من ناحية أخرى، تعتمد الأدلة التجريبية لموثوقية شبكات مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة في الوقت الراهن وبنسبة 100% أو بدرجة كبيرة للغاية على مساحات صغيرة نظراً لكون الشبكات الواسعة النطاق في مرحلة البداية فقط من عملية التحول هذه (Heard et al. 2017) التي ستستغرق بعض الوقت. فضلاً عن ذلك، لا يمثل إنشاء نظام للطاقة المتجددة بنسبة 100% أو بدرجة عالية جداً قراراً يتم اتخاذه للوهلة الأولى، وإنما يمثل سلسلة من القرارات المستمرة الصادرة من نقطة البداية لنسبة منخفضة من مصادر الطاقة المتجددة. وحتى في ظل السياسات الصارمة، فإن من المرجح أن تتغير هذه النسبة بوتيرة بطيئة على مدى عدة عقود. وبالتالي، يمكن لصانعي السياسات أن يطوروا العديد من الإستراتيجيات على المدى الطويل للتعلم من الخبرات المتراكمة أثناء هذا التحول. ومن ثم يستطيعون إجراء تعديلات على سياساتهم وفقاً لذلك (Anandara et al. 2009). وقد تتم إعادة النظر في أهدافهم في حال ارتفاع التكاليف بنحو غير متوقع، أو ظهور مشكلات تتعلق بالموثوقية وذلك بالتزامن مع زيادة انتشار مصادر الطاقة المتجددة. وبالتالي، يمتلك صانعو السياسات إستراتيجية خروج ذات موثوقية من السعي وراء شبكة لمصادر الطاقة المتجددة بنسبة 100% أو بدرجة عالية جداً. ولا بد من الإبقاء على خيار تأجيل التحول أو وقفه متاحاً إذا لزم الأمر.

لذلك يرى بعض المحللين أن التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بنسبة 100% أو بدرجة عالية جداً قد يكون مجدياً، وإن كان مكلفاً، وذلك إذا ما تم السعي إليه بالاقتران مع البحوث والتطوير والتغييرات المؤسسية والسياسات ذات الصلة (Papaefthymiou and Dragoon 2016; Zappa, Junginger, and van den Broek 2019). إلا أن من المهم عدم التقليل من مدى صعوبة هذا التحول، أو حتى افتراض إمكانية حدوثه (Abbott and Cohen 2019; Heard et al. 2017).

يمكننا القول باختصار، أنه على الرغم من أن مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة تخلق تحديات

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمتقطعة

الكهرباء. غير أن بالإمكان تعديل هذا القيد من خلال التكنولوجيا والسياسات المرتبطة بها. ويمكن كذلك لمشغلي النظام الالتزام بتشغيل وحدة داخلية خلال اليوم استجابة للتغيرات الكبيرة التي قد تطرأ على النظام والتي تخرج عن افتراضات الالتزام بتشغيل وحدة اليوم التالي. لاحظ أن أسعار الوقت الفعلي يتم نشرها بعد الحدث (Zheng et al. 2010). وبالتالي، لا يعرف الحمل الكهربائي سعر الوقت الفعلي في وقت الشراء الذي يمثل كذلك وقت الاستهلاك.<sup>14</sup>

أما في أوروبا، فإن مشغلي نظام النقل وبورصات الطاقة يمثلون كيانات مستقلة مختلفة. وعلى خلاف الوضع في الولايات المتحدة الأمريكية، فلا يتمتع مشغلو نظام النقل الأوروبيون بإمكانية الوصول المباشر إلى العروض والعطاءات المقدمة في سوق الجملة، ويعملون فقط على موازنة السوق. كما أنهم يقدمون معايير لبورصات الطاقة تتم مراعاتها عند موازنة العرض والطلب في السوق النطاقي في الخطوة (1) من الجدول (1). وتمثل هذه المعايير إما قدرات نقل الطاقة المتاحة بين الدول أو مصفوفة عوامل توزيع ونقل الطاقة عندما يتم استخدام الطريقة القائمة على التدفق. تعمل سوق الجملة الأوروبية الآجلة على الموازنة بين العرض والطلب في السوق مرة واحدة للمنتجات المتوفرة على مدار الساعة في يوم معين، مع تخصيص قدرة ضمنية لسعة شبكة الطاقة. كما يستطيع مشغلو نظام النقل تعديل برامج التوزيع الخاصة بالمولدات في حال حدوث ازدحام الشبكة، إلا أن إعادة التوزيع كانت محدودة نسبياً في معظم الدول الأوروبية.<sup>15</sup> وتمثل الأسواق اليومية مزيجاً من التداول المستمر والمزادات التي تنتهي قبل 15 دقيقة على الأقل من موعد تسليم المنتجات. تعتمد إمكانية منع تسلسل الأحداث المؤدية إلى تجاوز الطلب للعرض من التسبب في حدوث حالات انقطاع للتيار الكهربائي على عدة عوامل، التي تشمل تواتر وحجم ومدة هذا الانقطاع، واحتمالية معالجة آليات السوق لهذا الانقطاع من خلال الأسعار (الخطوة 1 من الجدول 1). ويعتمد الأخير على مدى نجاح آلية السوق لا سيما إذا كانت هناك حدود سعرية ملزمة للحد من ممارسة القوة السوقية أو التحايل

نقوم في هذا القسم بتحليل أداء أسواق الكهرباء بالجملة ذات مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بدرجة عالية عبر المحاور الرئيسية المختلفة. أولاً، نأخذ في الاعتبار موثوقية آلية موازنة أسعار سوق الجملة (القسم الفرعي 1.2.3). ومن ثم، نبحث في آلية التسعير ذات التكاليف المتغيرة الصفرية أو شبه الصفرية (القسم الفرعي 2.2.3). وأخيراً، نقوم بدراسة القضايا التي طرحتها الآليات الإضافية للكفاية والتطورات التي شهدتها مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة (القسم الفرعي 3.2.3).

#### 1.2.3 موازنة العرض والطلب في السوق

لا تعمل الأسواق، بما فيها أسواق الكهرباء على الموازنة بصفة دائمة (Jaffe and Felder 1996; Joskow 2006c)، وتتكون آلية الموازنة في سوق الكهرباء من جمع المعلومات وتوفيرها ومن الحوافز الاقتصادية بما فيها إمكانية السداد والخوارزميات المطبقة من خلال البرمجيات لحساب الأسعار المرتبطة بها. وعلى الرغم من أن هذه الآلية ليست مادية، إلا أنه يمكن تحليلها من منظور الموثوقية كما لو كانت كذلك. يفترض تحليلنا توفر خدمات الموازنة الكافية للنجاح في الانتقال بنظام الطاقة من مرحلة النقص إلى مرحلة التوازن ما بين حركتي العرض والطلب. ونفترض بعبارة أخرى، إمكانية انتقال نظام الطاقة بكل موثوقية من حالة إلى أخرى.<sup>13</sup> ونقيم في القسم التالي ما إذا كان السعر الناتج مجدياً.

يتاح لمشغلي نظام النقل الإقليميين في أسواق الكهرباء الأمريكية المتحررة إمكانية الحصول على عروض شراء الأحمال الكهربائية بالجملة وعروض المولدات. وتشمل هذه الأسواق كلاً من الأسواق الآجلة والأسواق الآنية. وتعمل الأسواق الآجلة على التسوية في كل ساعة بناء على العروض والعطاءات المقدمة يوماً بعد آخر، بينما تعمل الأسواق الآنية على التسوية كل خمس دقائق بناء على قيود الطلب المادي والعروض والتوليد والنقل والموثوقية. ويعتبر الحمل الكهربائي في الأسواق الآنية متلقياً للأسعار ولا يمكن منعه مادياً من استهلاك

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمتقطعة

سابقا، فقد يتدخل مشغلو النظام في السوق قبل الأوان لضمان تطبيق هذه الفرضية. وقد يؤدي هذا الإجراء إلى خفض الأسعار وبالتالي تقويض آلية التسعير للحفاظ على الموثوقية (Joskow 2006c; Mays 2021) ويلخص الجدول (1) تسلسل الأحداث التي يجب أن تحدث لتعمل آلية الموازنة بين العرض والطلب في السوق بالشكل السليم.

يصعب من الناحية التحليلية تقدير احتمالية حدوث التسلسل الوارد في الجدول (1). ويكمن التحدي في اتباع النهج التجريبي في أن أوجه القصور الكبيرة في العرض قد لا تتكرر بما يكفي لإجراء تقديرات دقيقة. وبالمثل، يصعب تقدير احتمالية حدوث أي خطوة فردية. كما أنه لم يتم حتى الآن تطوير طرق لاختبار حدوث خطوة ما وتقييم احتمالية حدوث ذلك.

لرفع الأسعار. كما يعتمد أيضا على وجود إرادة سياسية كافية لفرض أسعار مرتفعة للغاية. وأخيرا، يمكنه أن يعتمد على حدة المسألة بحيث أنه لم يعد من المقبول اجتماعيا استخدام الأسواق لحلها.

لكي تتمكن الأسواق الآتية من الموازنة بين العرض والطلب، فإن من الضروري أن تكون الاستجابة السعرية كافية بالنظر إلى مستوى العرض. كما يجب أن يستجيب الحمل الكهربائي، بمعنى أنه يجب أن يقلل استهلاكه بشكل كاف من حيث الكمية والوقت والموقع. كذلك ينبغي أن يخضع الحمل الكهربائي للأسعار التي من المحتمل أن تكون مرتفعة للغاية، الأمر الذي يتطلب وجود سياسة أثمانية عالية الموثوقية وعدم التدخل من جانب العملية السياسية<sup>16</sup> (Joskow 2006c).

علوة على ذلك، تفترض هذه الأوصاف السوقية أن يعكس التقديم المسبق للعطاءات تفضيلات الرفاهية الحقيقية في الوقت الفعلي (Leslie et al. 2020)، والتي قد لا تحدث، لا سيما عندما تتعرض موثوقية نظام الطاقة للخطر. وبسبب الخاصية الفيزيائية المذكورة

#### الجدول 1. تسلسل الأحداث التي يجب أن تحدث لتنجح آلية موازنة العرض والطلب في السوق.

1. تعمل آلية موازنة العرض والطلب في السوق على حساب السعر اللازم لموازنة العرض والطلب في السوق بالشكل الصحيح بناء على المدخلات من المولدات الكهربائية والحمل الكهربائي ومشغل النظام
2. تتوفر خدمات الموازنة اللازمة للانتقال من الحالة الراهنة إلى حالة الموازنة بين العرض والطلب في السوق
3. لا يعمل مشغل النظام على قطع التيار الكهربائي بنظام التناوب قبل استجابة آلية الموازنة بين العرض والطلب في السوق
4. يعرف الحمل الكهربائي سعر الوقت الفعلي الذي سيدفعه إما عن طريق الإبلاغ المسبق أو الدقة في تحديد السعر.
5. يتعين على شركات الكهرباء التي ستدفع السعر في الوقت الفعلي أن تقوم بذلك (أي أنها سجلت ائمانا كافيا)
6. تفرض العملية السياسية دفع أسعار الوقت الفعلي (التي يفترض أن تكون مرتفعة للغاية).

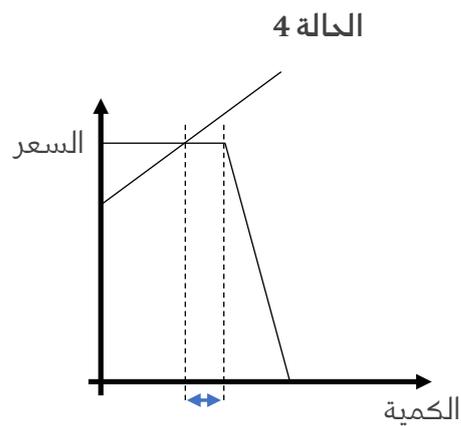
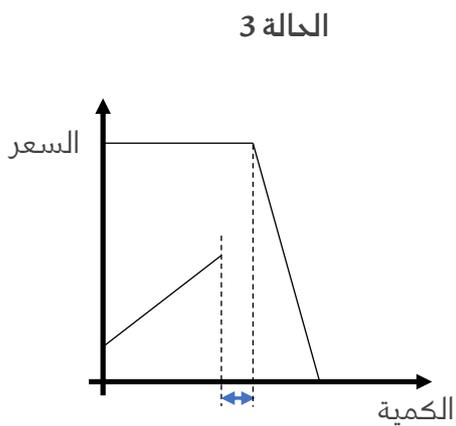
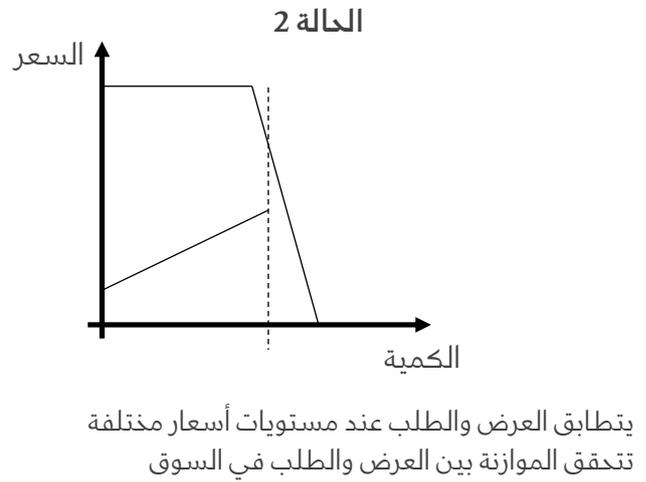
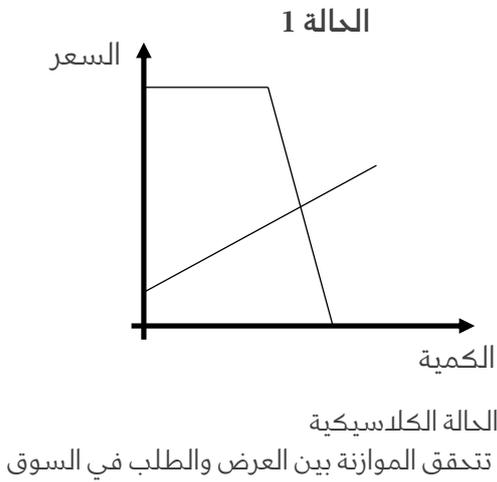
المصدر: الباحثون

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمنقطعة

يوازن بين العرض والطلب ولكنه بحاجة إلى وجود قاعدة لتحديد السعر، نظرا لاختلاف مستويات الأسعار للعرض والطلب. أما في الحالتين (3 و4)، فلا يوجد حل لموازنة العرض والطلب في السوق. فيما نجد في الحالة (3)، أن الطلب يتجاوز العرض في السوق. بينما نجد في الحالة (4)، عدم تتطابق أسعار عروض العرض والطلب. وبالتالي،  $(P_{m,3})$  و  $(P_{m,4})$  تساوي واحدا. فيما تتطابق الحالتان (3 و4) مع الترشيح غير السعري للطلب على الكهرباء من خلال قطع التيار الكهربائي بالتناوب.

يوضح الشكل (1) المواقف المختلفة التي قد تحدث أثناء موازنة العرض والطلب في السوق، ونفترض أن تكون الحالات من (1 إلى 4) حصرية ومتبادلة. فيما يشير المصطلح  $(P_i)$  إلى احتمالية حدوث الحالة  $i$  ( $i \in \{1; 2; 3; 4\}$ ). فيما نجد في كل حالة، أن الرمز  $(P_{m,i})$  يشير إلى احتمالية عدم موازنة العرض والطلب في السوق. تتوافق الحالة (1) مع الحالة الكلاسيكية التي يتقاطع فيها كل من العرض والطلب ودائما ما يحقق السوق توازنا بين العرض والطلب. وبالتالي، يساوي  $(P_{m,1})$  صفرا. أما في الحالة (2)، فإن السوق

**الشكل 1. الحالات الأربع المتعارضة للسوق.**



المصدر: الباحثون

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمتقطعة

#### 2.2.3 التسعير الفعال ذي التكاليف الحدية الصفريّة ودثبه الصفريّة

في حين ناقش القسم الفرعي السابق آلية موازنة العرض والطلب في السوق في سياق الموثوقية، فإن هذا القسم يفعل الأمر نفسه ولكن في سياق الأسعار التي تتسم بالكفاءة. وتتمثل الفرضية الأساسية في أن الأحمال التي يقدر المجتمع قيمتها بالكهرباء تكون مستعدة وقادرة على دفع أسعار كهرباء المرتفعة للغاية أثناء حالات شح الإمدادات. وقد لا تنطبق هذه الفرضية بسبب مخاوف الأسهم التي قد تتجاوز كفاءة التخصيص إذا تم اعتبار الكهرباء سلعة متميزة (Dilnot and Helm 1987)<sup>17</sup>.

الجدير بالذكر هنا، أن المؤلفات الاقتصادية لتسعير الحمل الذروي توصلت إلى أن الأسعار ترتفع حتى تتمكن الأسواق والجهات الموردة من تحقيق الموازنة بين العرض والطلب وتغطية تكاليفهم تماما. وتنطبق هذه النتيجة في بعض الحالات على العرض والطلب العشوائي (Boiteux 1949, 1960; Crew, Fernando, and Kleindorfer 1995). كما توصلت العديد من الدراسات إلى نتائج مماثلة بخصوص التطبيق على أسواق الكهرباء (Joskow 2006c) والمراجع الواردة فيه).

كذلك يمكننا في إطار بعض التبسيط، الاستدلال على المزيج الأمثل من التوليد باستخدام طريقة منحنيات الفرز الكلاسيكية (Green 2005). إذ يمكن لهذه الطريقة أن تضمن احتمالية فقد الجهد الكهربائي واسترداد تكاليف جميع وحدات التوليد. بينما يتم في أسواق الكهرباء بالجملة ذات الكفاءة، تركيب المزيج الأمثل من التوليد (الحمل الأساسي والمتوسط والذروي). ولا يتقاطع منحني العرض مع منحني الطلب لبضع ساعات في السنة. وفي هذه الحالة، يرتفع السعر ليصل إلى قيمة الجهد الكهربائي المفقود، حسب المعادلة (3) (Creti and Fontini 2019; Léautier 2019).

$$LOLP^* = \frac{hRC}{VOLL - c} \quad (1)$$

تقاس تكلفة تأجير القدرة بالساعة (hRC) و (VOLL) بوحدة عشرات الآلاف من الدولارات لكل ميغاواط ساعة. فيما تقاس التكلفة الحدية للمولد الهامشي، c، بالدولار لكل ميغاواط ساعة. وبالتالي، فإن قيمة c لا صلة لها بتحديد (LOLP)\*. وبحسب المعادلة (3)، يتغير (LOLP)\* الأمثل عند اختلاف الجهد الكهربائي المفقود (VOLL) القائمة على تفضيلات المستهلكين. كما تختلف أيضا باختلاف تقنية الذروة التي يشير إليها كل من (hRC) و (c).

كما توضح المعادلة (3)، لا تؤثر مصادر التكلفة الحدية المنخفضة أو الصفريّة تأثيرا ماديا على (LOLP)\*. علاوة على ذلك، فإن مصادر الطاقة ذات التكاليف الحدية المنخفضة مقارنة بالتكاليف الإجمالية ليست جديدة على أسواق الكهرباء بالجملة (Joskow 2006c; Leslie et al. 2020; U.S. EIA 2021). وتعتبر محطات الطاقة الكهرومائية والنووية أمثلة على مثل هذه المصادر. فضلا عن ذلك، لا تؤثر الطبيعة المتقطعة للتقنيات على (LOLP)\* الأمثل كما هو محدد في المعادلة (3) إذا بقيت تقنية الذروة على حالها. وفي هذه الحالة، قد تؤثر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة فقط على حجم الكهرباء غير المخدومة بتغيير شكل منحني الحمل المتبقي. ومع ذلك، فإن (LOLP)\* الأمثل يختلف بالنسبة لنظام الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بنسبة 100% غير المزود بوحدة حرارية لأوقات الذروة. وفي هذه الحالة، يعتمد على خصائص نظام الطاقة (مثل أصول التخزين وتقنيات البيوت الذكية للتحكم في استخدامات الكهرباء). وتنتج هذه الصيغة أيضا عندما تكون أسعار الجملة بالسالب.<sup>18</sup>

ولا يعتبر (LOLP) مقياسا لاحتمالية فقد الجهد الكهربائي. وبدلا من ذلك، فإنه يقيس احتمالية تجاوز الطلب للعرض. ويتوقف التأثير الفعلي لتجاوز الطلب للعرض على عدة عوامل. وبالتالي، ينبغي إعادة النظر في الصيغة القياسية لـ (LOLP) (المعادلة 3) في سياق أسواق الكهرباء والقدرة على التكيف. أولا، يركز النهج الكلاسيكي على تجاوز الطلب للعرض ولا يراعي بوضوح

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمنقطعة

المستويات المنخفضة حتى بدون التخزين الذي يمكنه خفض الأسعار الصفيرية أو شبه الصفيرية (Leslie et al. 2020). وبالتالي، فإنه باستطاعة أسعار الجملة أن توازن بنحو فعال ما بين العرض والطلب، وذلك بمنحني طلب مائل بدرجة كافية، ومن ثم، يمكن استرداد التكاليف الإجمالية عند المستوى الأمثل للاستثمار في التوليد. وتنطبق هذه النتيجة حتى وإن كانت التكلفة الحدية للوحدة الهامشية أقل من تكلفتها الإجمالية.<sup>19</sup> وبالتالي، تعتمد الكفاءة على احتمالية نجاح آلية الموازنة بين العرض والطلب في السوق وعلى مستوى قيمة الجهد الكهربائي المفقود VOLL.

يتم تحديد الجهد الكهربائي المفقود (VOLL) من خلال عملية تنظيمية، ومن ثم يتم تحديده لأغراض عملية قبل شهور إن لم تكن سنوات من حدوث العجز الفعلي. ولذلك، قد يتم تحديده عند مستوى عال جدا أو منخفض جدا بدلا من المستوى الأمثل. فإن كانت القيمة منخفضة جدا، فلن تتم تلبية بعض الطلبات على الكهرباء، مما يؤدي إلى تكبد خسائر اقتصادية مرتبطة بذلك، أما إذا كانت القيمة مرتفعة للغاية، فستكون الأسعار التي تم تحديدها باستخدام الجهد الكهربائي المفقود (VOLL) مرتفعة للغاية، كذلك، على الرغم من أن تواتر حدوث مثل هذه الحالات ومدتها سيكونان أقل مما لو تم تحديد الجهد الكهربائي المفقود دون القيمة الفعلية له.

وأخيرا، لا ترجع عدم كفاءة السوق إلى التكلفة الحدية الصفيرية أو عدم انتظام مصادر الطاقة المتجددة، بل أنها قد تنشأ بسبب التفاعلات غير المتوقعة بين آليات التسعير السوقية الفعالة والآليات غير السوقية (Felder 2011). فعندما ينخفض سعر الطاقة إلى الصفر، نجد أن مولدات الطاقة الكهربائية المتجددة المتغيرة والمنقطعة ذات التكلفة المتغيرة شبه الصفيرية لا تبالي بمسألة التوزيع. ومع ذلك، تؤدي الآليات غير السوقية التي توفر تعويضات إضافية بناء على حجم الكهرباء التي تم ضخها بشكل فعال في الشبكة إلى حدوث تشوهات ومنافسة بين المولدات ليتم توزيعها

آلية الموازنة بين العرض والطلب في السوق. وبالتالي، لا بد من توسعة نطاقه ليشمل احتمالية عدم موازنة العرض والطلب في السوق عندما يكون قطع التيار الكهربائي بنظام التناوب ضروريا. ثانيا، عندما يتجاوز الطلب العرض، قد يستخدم المستهلكون معدات التكيف الخاصة بهم (مثل المولدات الذاتية أو العوازل المنزلية) لتخفيف آثار الموقف.

أما من الناحية العملية، فإننا نأخذ في الاعتبار الحالات الأربع المتعارضة والموضحة في الشكل (1). فيما تتوافق احتمالية الحالة الموثوق (المشار إليه بـ P) مع المعادلة (4). ويشير  $P_{B,i}$  إلى احتمالية حدوث انقطاع تام للتيار الكهربائي في الحالة (i). ويمثل  $P_{R,i}$  احتمالية الترشيد غير السعري وقطع التيار الكهربائي بنظام التناوب في الحالة (i). وفي هذا السياق، تعكس المعادلة (3) الحالة التي لا يحدث فيها أي انقطاع للتيار الكهربائي نتيجة الافتقار إلى القدرات المادية أو عدم قطع التيار الكهربائي بنظام التناوب بسبب الترشيد غير السعري.

$$P = \sum_{i=1}^4 P_i (1 - P_{R,i}) (1 - P_{B,i}) \quad (4)$$

وكما وضحنا في القسم الفرعي (3. 2. 1)، فإن قطع التيار الكهربائي بنظام التناوب مطلوب في الحالتين (3 و4) بسبب عدم وجود حل لموازنة العرض والطلب في السوق (أي الترشيد غير السعري). وبالتالي، فإن  $P_{R,3}$  و  $P_{R,4}$  يساوي واحدا. أما في الحالتين (1 و2)، فتتحقق الموازنة بين العرض والطلب في السوق  $P_{R,1} = 0$  و  $P_{R,2} = 0$  إلا أنه لا يزال من الممكن حدوث حالات انقطاع في التيار الكهربائي بسبب المشكلات الفنية في الوقت الفعلي. وأخيرا، تصبح المعادلة (4) بالصيغة التالية:

$$P = P_1 (1 - P_{B,1}) + P_2 (1 - P_{B,2}) \quad (5)$$

توضح المعادلة (5) اعتماد الموثوقية على احتمالية انقطاع التيار الكهربائي، واحتمالية حدوث الحالتين (1 و2). ولا يراعي التحليل الكلاسيكي هذا المصطلح (الموثوقية).

إن وجود طلب مرن يعمل على رفع الأسعار فوق

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمتقطعة

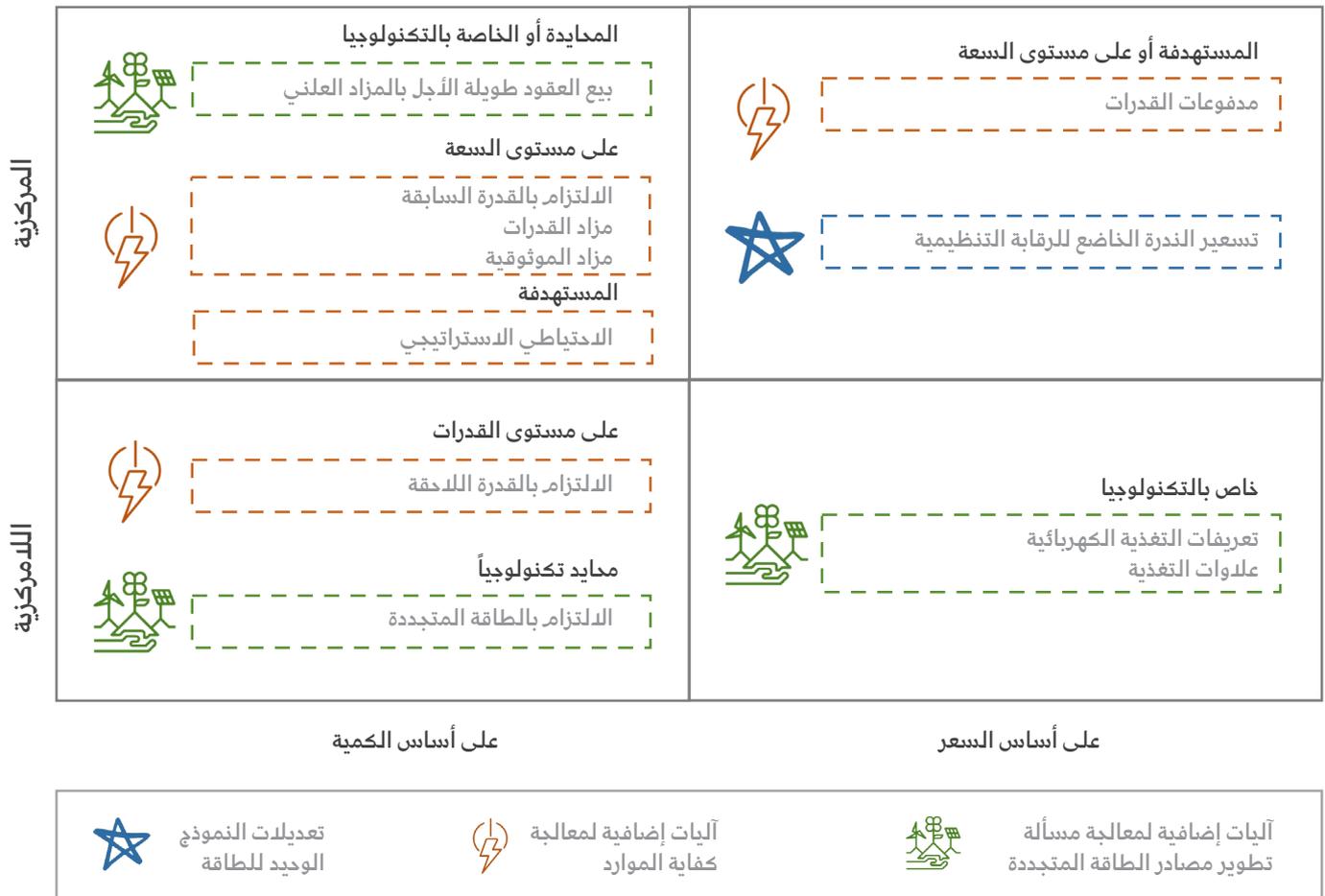
حتى عند نشوء الأسعار الصفيرية أو السالبة.

#### 3.2.3 متطلبات القدرات وطرق التعويض عن مصادر الطاقة المتجددة القائمة على السوق

تنتشر في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا على نطاق واسع متطلبات القدرات وغيرها من الآليات المحددة الرامية إلى تعزيز تطوير الطاقة المتجددة المتغيرة

والمقطعة. وقد تتخذ هذه الآليات أشكالاً مختلفة (راجع الشكل 2)، ويمكن تصنيفها على أساس الكمية أو السعر والمركزية أو اللامركزية. كما يمكن تصنيف آليات القدرة على أنها آليات محددة الأهداف أو آليات على مستوى القدرات. ويمكن تصنيف آليات الدعم على أنها آليات محايدة أو خاصة بالتكنولوجيا.

الشكل 2. نظرة عامة على التعديلات أو الآليات الإضافية في أنظمة الطاقة المحررة.



المصدر: Petit et al. (2021)

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمنقطعة

قد طبقت نظام تعريفات التغذية الكهربائية أو خطط الدعم الأخرى ذات الصلة. غير أنه وبسبب إرشادات المساعدات الحكومية الصادرة عن المفوضية الأوروبية في عام 2014 (European Commission 2014)، نجد أن الدول الأوروبية تحولت تدريجياً إلى علاوات التغذية الكهربائية (Boasson 2021). وبالرغم من أن علاوات التغذية الكهربائية تركز على الجانب الاستثماري، إلا أن معظم الدول الأوروبية طبقت آليات «ضمانات المنشأ» للسماح للموردين باقتراح الطاقة الكهربائية النظيفة للمستهلكين النهائيين. ولكن خلافاً للدوليات المتحدة الأمريكية، لم تصبح معايير حافزة الطاقات المتجددة الآلية السائدة في أوروبا.

يمكننا استنتاج الخلاصات التالية المتعلقة بالموثوقية والكفاءة من الاختلافات القائمة بين آليات الطاقة المتجددة المتغيرة والمنقطعة. أولاً، لا تحدد آليات الطاقة المتجددة خدمات الموازنة اللازمة لتحقيق متطلبات الموثوقية في النظام الكبير للطاقة. يتطلب نقل نظام الطاقة من حالة موثوقة إلى أخرى إلى خدمات تحقيق التوازن في الخدمات، نظراً لإمكانية تغير العرض والطلب عبر المراحل الزمنية من أجزاء من الثانية إلى أيام. وإن تضمنت آليات مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمنقطعة متطلبات المرونة، فمن المحتمل أن توفر الخدمات المطلوبة.<sup>21</sup>

ومع ذلك، قد تحتاج الطاقة المتجددة المتغيرة والمنقطعة إلى مجموعة من خدمات الموازنة الأكثر اتساعاً من المجموعة الحالية من الخدمات المساندة (Karbouj et al. 2019).<sup>22</sup> يوفر القصور الذاتي الميكانيكي للتوربينات الدوارة استقراراً لأنظمة الطاقة من خلال توليد الكهرباء (Johnson, Rhodes, and Webber 2020; Karbouj et al. 2019). وقد تحتاج الإمكانيات المتزايدة لوجود احتياطات التشغيل التقليدية (أي الدوران لمدة عشر دقائق، والتوقف عن الدوران لمدة عشر دقائق، واحتياطات الثلاثون دقيقة) إلى زيادة خصوصاً مع الكميات الكبيرة من الطاقة المتجددة المتغيرة والمنقطعة. وقد تكون هناك حاجة إلى أنواع

تستخدم متطلبات القدرات في الولايات المتحدة الأمريكية لتحقيق مستويات ملائمة من الكفاية المحددة للموارد في أسواق الكهرباء بالجملة (Jaffe and Felder 1996). ويتعين على شركات الكهرباء شراء القدرة الكافية لتغطية الأحمال الذروة خلال فترات الذروة في النظام، بالإضافة إلى شراء هامش احتياطي مشروط ومحسوب لتحقيق الاحتمالية المرغوبة لفقد الجهد الكهربائي (LOLP).

من جانب آخر، تتشابه معايير حافزة الطاقات المتجددة (RPS) مع أسواق القدرة من حيث يلزم أن يكون الحد الأدنى المطلوب لكمية مصادر الطاقة المتجددة بناءً على الحمل بالتجزئة. ويمكن الوفاء بهذا المطلب من خلال آلية سوقية لشراء وبيع ائتمانات الطاقة المتجددة. أما في أسواق مشغلي نظام النقل الإقليمي (RTO)، ففي حين تحدد الدول معايير حافزة الطاقات المتجددة، نجد أن الحكومة الفيدرالية تنظم أسواق القدرة. وتعمل السوق الآجلة للطاقة النظيفة (FCEM) على توحيد معايير حافزة الطاقات المتجددة من مختلف الولايات القضائية في سوق واحدة قد تكون خاضعة للولاية القضائية الاتحادية.<sup>20</sup> غير أن معايير حافزة الطاقات المتجددة والسوق الآجلة للطاقة النظيفة تعتبر منفصلة عن أسواق القدرة. فيما تم في المقابل، إنشاء سوق متكاملة لقدرة الطاقة النظيفة (ICCM) تهدف للجمع ما بين آلية تعويض قدرة سوق الجملة، وتفويض مصادر الطاقة المتجددة المشابهة للسوق (Spees et al. 2021). ويشير إلى هذه الأساليب مجتمعة بمعايير سوق الطاقة المتجددة القائمة على السوق.

لم يسهم نظام تداول الانبعاثات في الاتحاد الأوروبي الذي أُطلق في عام 2005 في ضخ استثمارات كافية في الطاقة المتجددة المتغيرة والمنقطعة بأوروبا (Brohé and Burniaux 2015; Löfgren et al. 2014). ولقد أدرجت أهداف مصادر الطاقة المتجددة للدول الأوروبية في التوجيه الذي يحمل رقم التصنيف (EC 2009/28). ولتعزيز المزيد من الاستثمارات في التقنيات المتجددة وبلوغ هذه الأهداف، نجد أن العديد من الدول الأوروبية

### 3. التحديات الفنية والسوقية في أنظمة الطاقة المحررة ذات الطاقة المتجددة العالية والمتغيرة والمتقطعة

الاتحادية متطلبات الطاقة المتجددة ويتم دمجها مع متطلبات كفاية الموارد. وبالنظر إلى تلك المتطلبات، نجد أن إيرادات القدرة والطاقة والخدمات المساندة متنسقة داخليا (من الناحية النظرية). وبالتالي، تعتمد كفاءة أسواق الكهرباء ذات الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة بدرجة عالية أو عالية للغاية على كيفية التعويض عن مصادر الطاقة المتجددة وليس على تقلبها أو تقطعها أو تكاليفها الحدية شبه الصفرية.

كما أن النقاش حول الرفاهية الاجتماعية غير المثلى ونشر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة ذات الحلقة المفتوحة ينطبق كذلك على السياق الأوروبي. وبالفعل، تؤدي علاوات التغذية الكهربائية والأهداف السياسية للطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة إلى تطوير مصادر الطاقة المتجددة التي لا يرجح أن تحقق أمثلة حصة للطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة، أو الرفاهية الاجتماعية. علاوة على ذلك، تعتبر القواعد المفصلة لعلاوات التغذية الكهربائية مهمة لنجاح أو فشل عملية دمج الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة في أنظمة الطاقة.

إضافية من الاحتياطات، مثل الموارد الاحتياطية المتوفرة على فترات زمنية أطول (EU-SysFlex 2018). ولن تعتمد الاحتياجات المستقبلية للمرونة على مدى سعة انتشار مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة فقط، بل ستعتمد أيضا على تقنيات الطاقة المتجددة والخصائص المكانية لأنظمة الطاقة (Koltsaklis, Dagoumas, and Panapakidis 2017). وقد يكون التنسيق بين أسواق الجملة المخصصة للاحتياطات حلا لتعزيز كفاءة أنظمة الطاقة ذات الحصص العالية من الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة (Van den Bergh and Delarue 2020).

وقد تؤدي التفويضات المتعلقة بمصادر الطاقة المتجددة في الولايات المتحدة الأمريكية إلى زيادة أو تقليص مستوى الرفاهية الاجتماعية. فضلا عن ذلك، فإن من غير المرجح أن تكون مثالية اجتماعيا من منظور الرفاهية. وتجدر الإشارة إلى أن معايير حافظة الطاقات المتجددة والأسواق الآجلة للطاقة النظيفة التي تديرها الدول تقطع الصلة بين الاستثمارات في مصادر الطاقة المتجددة وأسعار الجملة. ويتم في ظل هذه الآليات تحديد مستويات الاستثمارات في الطاقة المتجددة من الناحية السياسية وليس بحسب أسعار سوق الجملة. ويتم تصميم آلية الدفع لمصادر الطاقة المتجددة خارج سوق الجملة، كما هي الحال في معايير حافظة الطاقات المتجددة، لتحديد الإيرادات لكل ميجاواط ساعة لموارد الطاقة المتجددة القابلة للتطبيق بهدف تغطية أي نقص في الإيرادات يحدث من سوق الجملة.<sup>23</sup>

إن معايير حافظة الطاقات المتجددة والأسواق الآجلة للطاقة النظيفة التي تديرها الدول تجعل من قرارات الاستثمار في السعة لمصادر الطاقة المتجددة القابلة للتطبيق حلقة (سياسية) مفتوحة. وفي المقابل، تعتمد مصادر التوليد الأخرى على الإيرادات المتأتبة من أسواق الجملة لاسترداد تكاليفها الإجمالية. كما تعمل هذه الآليات كذلك على نقل بعض مخاطر الاستثمار من المطورين إلى الممولين. أما بالنسبة للسوق المتكاملة لقدرة الطاقة النظيفة، فتحدد الجهة التنظيمية

## 4. الاستنتاجات والآثار المترتبة على السياسات

المجمعة حاليا ضمن المقياس المرجعي لاحتمالية فقد الجهد الكهربائي. وينبغي أن تخضع أسواق الكهرباء لتحليلات الموثوقية لكي يتسنى للسياسات الكافية والفعالة تحسين أدائها من خلال تجنب حالات الانقطاع المتناوبة والمتتالية للتيار الكهربائي.

رابعاً، تتوفر العديد من الخيارات الفنية المتاحة لتحقيق هدف المستويات العالية للغاية من مصادر الطاقة المتجددة. ويمكن تعديل الأسواق لتحقيق هذا الهدف المتعلق بسياسات الطاقة المتجددة، كما أن آليات من داخل السوق مفضله على الآليات من خارجه. ويمكن لصانعي السياسات أن يتعلموا بمرور الوقت صياغة سياسات توفر موارد موازنة كافية بكفاءة وفعالية من حيث التكلفة لزيادة مستويات الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة. وقد يكون هذا النهج أكثر فعالية من الالتزام بتفويضات الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة دون الاستفادة من التجارب.

خامساً، تعتمد موثوقية وكفاءة أسواق الكهرباء ذات المستويات العالية والعالية للغاية من الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة على طريقة إعادة حساب مصادر الطاقة المتجددة. وينبغي على صانعي السياسات مراعاة الموثوقية والآثار المترتبة على كفاءة تمويل مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة خارج أسواق الكهرباء بالجملة دون تقديم الحوافز لها بهدف توفير خدمات الموازنة والمرونة التي ستزداد الحاجة إليها بالتزامن مع ارتفاع مستويات انتشارها .

يمكن للأسواق ذات مصادر الطاقة المتجددة البالغة الارتفاع أو بنسبة 100 % أن تكون موثوقة وفعالة إذا تم استخدام نهج متكامل لتحليل الموثوقية والمرونة والقدرة على التكيف وآليات السوق. ويقدم هذا البحث إطاراً مفاهيمياً للأسواق الكهرباء بالجملة بصفته خياراً من الخيارات السياسية لتطبيق الطاقة المتجددة شديدة الارتفاع . ولذلك ينبغي أن يتم اعتماد هذا الإطار لتحليل السياسات.

كذلك يمكن استخلاص العديد من الآثار على صعيد السياسات من هذا التحليل. أولاً، لا يمكن تحليل موثوقية ومرونة أسواق الكهرباء بمعزل عن الأمور الأخرى. وينبغي بدلاً من ذلك، دراستها في إطار السياق الكامل لكامل سلسلة إمدادات نظام الطاقة وسياسات التكيف من خارج القطاع. ويتعين على صانعي السياسات دمج سياسات الموثوقية والمرونة والتكيف من خلال البدء بإطار تحليلي متكامل، مثل الإطار المقترح في هذا البحث .

ثانياً، يعد تواتر حالات الانقطاع وحجمها ومدتها من الأجزاء الأساسية اللازمة لتحليل السياسات المتعلقة بالموثوقية والمرونة. وتعد هذه الخصائص الثلاث مطلوبة لوصف قيمة الجهد الكهربائي المفقود بشكل مناسب. ومن ثم، قد لا يجوز تفسير قيمة الجهد الكهربائي المفقود على أنه مجرد رقم بسيط، وإنما كنتيجة لهذه السمات (الموتر) على الأقل. وقد لا توضح قيمة الجهد الكهربائي المفقود بعض التكاليف الإضافية للمجتمع والتي ينبغي دراستها ودمجها في السياسات. ولذلك، يتعين على صانعي السياسات إعادة النظر في تعريف قيمة الجهد الكهربائي المفقود في تحليلاتهم ومقترحاتهم.

ثالثاً، تعتبر احتمالية فقد الجهد الكهربائي الكلاسيكية مقياساً مفيداً ولكنه غير مكتمل لموثوقية أسواق الكهرباء بالجملة، ويجب على صانعي السياسات الذين يعملون على تقييم دور أسواق الكهرباء في تحقيق أهدافهم التمييز بشكل أكبر بين الحالات المختلفة

- <sup>1</sup> أبلغت إحدى هيئات تنظيم الطاقة الحكومية أحد الباحثين بأنه تم اعتماد آلية تمويل معينة للطاقة المتجددة بهدف إخفاء تكاليف فواتير الكهرباء عن المستخدمين النهائيين.
- <sup>2</sup> لكل من طاقة الرياح والطاقة الشمسية مخزجات طاقة متباينة، وقد تتغير هذه المخزجات بطرق يمكن التنبؤ بها في مثل حالات شروق وغروب الشمس، وبطرق لا يمكن التنبؤ بها (متقطعة)، كما يحدث عندما يتغير الغطاء السحابي المحلي. وبالتالي، ينبغي وصفها بأنها متغيرة ومتقطعة. كما يشار إليها أيضا بمصادر الطاقة المتجددة غير المتزامنة (Johnson, Rhodes, and Webber 2020) وموارد الطاقة المتجددة المتغيرة (Zappa, Junginger, and van den Broek 2019).
- <sup>3</sup> غير أن الباحثين توصلوا إلى أن هذه النتيجة تنطبق فقط على الأسواق المحررة وليس على الأنظمة المخططة مركزيا. علاوة على ذلك، قد لا تنطبق هذه الحالة على مصادر الطاقة المتجددة غير المتغيرة، أو التي لا تترتب عليها تكاليف حدية صفرية.
- <sup>4</sup> تشير العديد من المصطلحات القابلة للتغيير إلى مدى كفاية التوليد، بما في ذلك "أمن الإمدادات" و"الموثوقية" و"كفاية الموارد" و"تنوع العرض" (Joskow 2006c).
- <sup>5</sup> قد يكون مشغل النظام مشغل نقل إقليمي ومشغل نظام مستقل أو مشغلا لنظام النقل.
- <sup>6</sup> يراعي أحد هذه التحليلات كل حالة ممكنة لكل عنصر ممكن في نظام الطاقة، ويشمل هذا التحليل جميع الحالات الممكنة غير المتعارضة.
- <sup>7</sup> تمثل حالات انقطاع التيار الكهربائي انقطاعات غير مخطط لها في خدمات الكهرباء عن العديد من العملاء التي يستمر أمدها لأكثر من خمس دقائق (Hines, Apt, and Talukdar 2009). وتحدث الانقطاعات الخارجة عن السيطرة أو المتتالية عندما يفقد مشغل نظام الطاقة السيطرة على الشبكة. وفي هذه الحالة، تنفصل مرافق التوليد والنقل بصورة تلقائية عن الشبكة لحماية الأفراد والمعدات لتكون متاحة لاستعادة الطاقة في الوقت المناسب. وبينما تمثل حالات انقطاع التيار الكهربائي بنظام التناوب انقطاعات للطاقة المنظمة عن الأحمال. ويمكننا القول باختصار، أن حالات الانقطاع المتناوبة وغير المسيطر عليها تعمل على تنفيذ الترشيح غير السعري (Joskow 2006c)، الذي يعتبر أقل كفاءة مقارنة بالأساليب القائمة على الأسعار (De Nooij, Lieshout, and Koopmans 2009).
- <sup>8</sup> كذلك يرتبط مصطلح "العطل لسبب مثبت" بالعطل الذي ينطوي عليه تلف مكونين أو أكثر في وقت واحد أو في نفس الوقت تقريبا، وهو النتيجة المباشرة لسبب مشترك (Kančev and Čepin 2011, 1).
- <sup>9</sup> يمكن ترجمة هذه المسألة إلى مسألة مماثلة بمتغيرات فيزيائية: التوليد والنقل والتوزيع والبنى التحتية للوقود ومستوى القدرة على التكيف.
- <sup>10</sup> يعتبر مصطلح "السوق الحرة" مصطلحا غامضا وينطوي على العديد من الدلالات، فيما يستخدم مصطلح "السوق المصمم" للدلالة على خلق السياسة الحكومية لسوق لم تكن لتوجد لولا ذلك. إلا أن هذا المفهوم يتعارض مع معظم الأسواق التي يتم تطويرها بصورة رسمية أو غير رسمية من خلال الجهود غير الحكومية.
- <sup>11</sup> علاوة على ذلك، يتعين تسعير التدفق الحلقى بفعالية في أسواق الكهرباء. نظرا لتدفق الكهرباء الموجودة في شبكة متداخلة على طول مسارات متعددة، وتأثيرها على التدفقات في جميع المسارات الأخرى. وبالتالي، فإن هنالك حاجة إلى وجود آلية لتمثيل العوامل الخارجية الإيجابية والسلبية بحيث يمكن استخدام شبكة النقل بفعالية تامة من حيث التكلفة دون تعريض الموثوقية للخطر.
- <sup>12</sup> تشمل هذه العملية الطاقة المتجددة المتغيرة والمتقطعة على الرغم من تردد صانعي السياسات في تقليص الموارد المتجددة عند توافر الخيارات الأخرى (Pollitt and Anaya 2016).

<sup>13</sup> أما من الناحية العملية، فإن الحال ليست كذلك، ولكن يمكن تقييم احتمالية هذه الفرضية ودمجها في التحليل الشامل للموثوقية.

<sup>14</sup> قد يضطر مشغلي النظام في بعض الحالات إلى حساب الأسعار بسبب نقص البيانات أو مراجعتها بأثر رجعي

<sup>15</sup> غير أن أحد الاستثناءات الملحوظة يتمثل في دولة ألمانيا، حيث تجاوز إجمالي الحجم السنوي لإجراءات إدارة ازدحام الشبكة 15 تيرا واط ساعة منذ عام 2015 (Bundesnetzagentur 2020). ويعادل هذا الحجم أكثر من 2% من الاستهلاك الألماني النهائي، وقد أسفرت هذه النتيجة عن زيادة الازدحام الداخلي بين شمال البلاد وجنوبها. وتقع معظم مصادر الطاقة المتجددة في شمال ألمانيا، بينما توجد المراكز الكبرى للأحمال في الجنوب.

<sup>16</sup> بعد حالات انقطاع التيار الكهربائي بنظام التناوب التي شهدتها ولاية تكساس الأمريكية في شهر فبراير 2021، وجهت العديد من الدعوات المنادية بعدم مطالبة مستهلكي التجزئة بدفع فواتير الكهرباء المرتفعة للغاية التي نجم عنها ارتفاع أسعار الكهرباء بالجملة.

<sup>17</sup> يعرف الباحث (Mann 2006) السلع المتميزة بأنها "السلع التي يؤدي التدخل الحكومي والرغبة الإجمالية فيها إلى الدفع بحدوث زيادات في معدل الفائدة". بينما يعرفها الباحثين (Kapstein and Busby 75, 2010) بأنها "السلع المتاحة للجميع بغض النظر عن مستويات دخلهم"

<sup>18</sup> لا تعتبر الأسعار السالبة أو الصفيرية مشكلة بحد ذاتها. إلا أن مدى تأثيرها على الكفاءة تتوقف على مسيبتها. فإن كان السبب وراء ذلك يتمثل في دفع مبالغ مالية خارج السوق، مثل الائتمان الضريبي الإنتاجي، فقد يؤدي ذلك إلى عدم الكفاءة. أما إذا كان السبب متمثلاً في وحدات التوليد التي تقدم أسعاراً سالبة لتبقى قيد التشغيل في الشبكة، فقد تكون هذه الأسعار مجدية بسبب ارتفاع تكاليف بدء التشغيل أو الإيقاف.

<sup>19</sup> قد تتكون الكتلة الهامشية للعرض بالنسبة لبعض محطات الطاقة الحرارية من وحدة التوليد التي تتجاوز تكلفتها الحدية متوسط تكلفتها للجزء الأخير من نطاقها التشغيلي (Felder and Peterson 1997). وفي هذه الحالة، يتقاطع منحنى العرض الهامشي (أو الكتلة الهامشية للتوليد) مع منحنى الطلب. ويعتبر السعر الناتج كافياً لوحدة التوليد التي يتم تركيبها لاسترداد جميع تكاليفها.

<sup>20</sup> يمكن أن يخضع هذا السوق أيضاً للإدارة من جانب الولايات الأمريكية، كما هو الحال في المبادرة الإقليمية لغازات الاحتباس الحراري.

<sup>21</sup> قد توفر معايير سوق مصادر الطاقة المتجددة قدراً من المرونة والقدرة على التكيف، لا سيما عندما تقتزن بسياسات أخرى. فيمكن على سبيل المثال، أن تتيح إمكانية تشغيل مرافق الطاقة الشمسية الموزعة دون تعرض سلامة العاملين للخطر عندما يكون باقي نظام التوزيع من دون كهرباء.

<sup>22</sup> تحتوي أنظمة الطاقة على أنظمة للمراقبة والإشراف وجمع البيانات وذلك لتحديد الأعطال شبه اللحظية وعزلها، وتعتمد هذه الأنظمة على الأسواق لضمان توفير خدمات مساندة كافية لإدارة التغيرات في الطاقة الحقيقية. وتجري معالجة التغيرات في الطاقة التفاعلية من خلال وسائل غير سوقية، مثل التخطيط وعمليات النقل ومتطلبات ربط التوليد.

<sup>23</sup> إذا تلقت مصادر التوليد الأخرى، مثل الوحدات النووية في العديد من الولايات الأمريكية، لمدفوعات من خارج السوق فعندها ستنشأ مخاوف مماثلة بشأن الكفاءة.

- Abbott, Malcolm, and Bruce Cohen. 2019. "Maintaining the Security of Supply in the Australian National Electricity Market with Higher Levels of Renewable Energy." *The Electricity Journal* 32(9):106645.
- Ahmadyar, Ahmad Shabir, Shariq Riaz, Gregor Verbič, Archie Chapman, and David J. Hill. 2017. "A Framework for Assessing Renewable Integration Limits with Respect to Frequency Performance." *IEEE Transactions on Power Systems* 33(4):4444–53. DOI: [10.1109/tpwrs.2017.2773091](https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2773091)
- Anandarajah, Gabriel, Neil Strachan, Paul Ekins, Ramachandran Kannan, and Nick Hughes. 2009. *Pathways to a Low Carbon Economy: Energy Systems Modelling*. London: UK Energy Research Centre.
- Arentsen, Maarten J., and Rolf W. Künneke. 1996. "Economic Organization and Liberalization of the Electricity Industry: In Search of Conceptualization." *Energy Policy* 24(6):541–52. DOI: [10.1016/0301-4215\(96\)00044-4](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00044-4)
- Barbose, Galen, Ryan Wiser, Jenny Heeter, Trieu Mai, Lori Bird, Mark Bolinger, Alberta Carpenter, Garvin Heath, David Keyser, Jordan Macknick, Andrew Mills, and Dev Millstein. 2016. "A Retrospective Analysis of Benefits and Impacts of US Renewable Portfolio Standards." *Energy Policy* 96:645–60. DOI: [10.1016/j.enpol.2016.06.035](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.035)
- Billinton, Roy, and Ronald N. Allan. 1984. "Power-system Reliability in Perspective." *Electronics and Power* 30(3):231–6.
- . 2003. "Reliability of Electric Power Systems: An Overview." In *Handbook of Reliability Engineering*, edited by Hoang Pham, 511–28. London: Springer-Verlag.
- Blazquez, Jorge, Rolando Fuentes-Bracamontes, Carlo Andrea Bollino, and Nora Nezamuddin. 2018. "The Renewable Energy Policy Paradox." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82:1–5. DOI: [10.1016/j.rser.2017.09.002](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.002)
- Blazquez, Jorge, Rolando Fuentes, and Baltasar Manzano. 2020. "On Some Economic Principles of the Energy Transition." *Energy Policy* 147:111807. DOI: [10.1016/j.enpol.2020.111807](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111807)
- Boasson, Elin Lerum. 2020. "Europeanization of Renewables Support." In *Comparative Renewables Policy*, edited by Elin Lerum Boasson, Merethe Dotterud Leiren, and Jørgen Wettestad, 58–72. Abingdon: Routledge. DOI : [10.4324/9780429198144-5](https://doi.org/10.4324/9780429198144-5)
- Boiteux, Marcel. 1949. "La Tarification des Demandes en Pointe." *Revue Generale de l'Electricite* 58:157–79.
- Boiteux, Marcel. 1960. "Peak-load Pricing." *The Journal of Business* 33(2):157–79. DOI: [10.1086/294331](https://doi.org/10.1086/294331)
- Bompard, Ettore, Audun Botterud, Stefano Corgnati, Tao Huang, Mehdi Jafari, Pierluigi Leone, Stefano Mauro, Giuseppe Montesano, Carlo Papa, and Francesco Profumo. 2020. "An Electricity Triangle for Energy Transition: Application to Italy." *Applied Energy* 277:115525. DOI: [10.1016/j.apenergy.2020.115525](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115525)
- Brohé, Arnaud, and Sylvain Burniaux. 2015. "The Impact of the EU ETS on Firms' Investment Decisions: Evidence from a Survey." *Carbon Management* 6(5-6):221–31. DOI: [10.1080/17583004.2015.1131384](https://doi.org/10.1080/17583004.2015.1131384)

- Brown, Tom W., Tobias Bischof-Niemz, Kornelis Blok, Christian Breyer, Henrik Lund, and Brian V. Mathiesen. 2018. "Response to 'Burden of Proof: A Comprehensive Review of the Feasibility of 100% Renewable-electricity Systems'." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92:834–47. DOI: [10.1016/j.rser.2018.04.113](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.113)
- Brown, Tom, and Lina Reichenberg. 2020. *Decreasing Market Value of Variable Renewables Is a Result of Policy, Not Variability*. arXiv preprint arXiv:2002.05209.
- Bundesnetzagentur, 2020. "Publications on Network and Security System from the Bundesnetzagentur." [https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Energy/Companies/SecurityOfSupply/NetworkSecurity/Network\\_security\\_node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Energy/Companies/SecurityOfSupply/NetworkSecurity/Network_security_node.html).
- Chapman, Andrew J., and Kenshi Itaoka. 2018. "Energy Transition to a Future Low-carbon Energy Society in Japan's Liberalizing Electricity Market: Precedents, Policies and Factors of Successful Transition." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:2019–27. DOI: [10.1016/j.rser.2017.06.011](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.011)
- Creti, Anna, and Fulvio Fontini. 2019. *Economics of Electricity: Markets, Competition and Rules*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Crew, Michael A., Chitru S. Fernando, and Paul R. Kleindorfer. 1995. "The Theory of Peak-load Pricing: A Survey." *Journal of Regulatory Economics* 8(3):215–48. DOI: [10.1007/bf01070807](https://doi.org/10.1007/bf01070807)
- De Nooij, Michiel, Rogier Lieshout, and Carl Koopmans. 2009. "Optimal Blackouts: Empirical Results on Reducing the Social Cost of Electricity Outages Through Efficient Regional Rationing." *Energy Economics* 31(3):342–7. DOI: [10.1016/j.eneco.2008.11.004](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.11.004)
- De Vries, Laurens James. 2005. "Securing the Public Interest in Electricity Generation Markets: The Myths of the Invisible Hand and the Copper Plate." Ph.D. Diss. Delft University of Technology.
- Denholm, Paul, and Robert M. Margolis. 2007. "Evaluating the Limits of Solar Photovoltaics (PV) in Traditional Electric Power Systems." *Energy Policy* 35(5):2852–61. DOI: [10.1016/j.enpol.2006.10.014](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.014)
- Dilnot, Andrew, and Dieter Helm. 1987. "Energy Policy, Merit Goods and Social Security." *Fiscal Studies* 8(3):29–48.
- Dworkin, Michael H., and Rachel Aslin Goldwasser. 2007. "Ensuring Consideration of the Public Interest in the Governance and Accountability of Regional Transmission Organizations." *Energy LJ* 28:543.
- Eisenack, Klaus, and Mathias Mier. 2019. "Peak-load Pricing with Different Types of Dispatchability." *Journal of Regulatory Economics* 56(2):105–24. DOI: [10.1007/s11149-019-09394-9](https://doi.org/10.1007/s11149-019-09394-9)
- Elshurafa, Amro M. 2020. "The Value of Storage in Electricity Generation: A Qualitative and Quantitative Review." *Journal of Energy Storage* 32:101872. DOI: [10.1016/j.est.2020.101872](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101872)
- European Commission. 2009. "Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources and Amending." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028>.
- European Commission. 2014. "Communication from the Commission — Guidelines on State Aid for Environmental Protection and Energy 2014-2020." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52014XC0628%2801%29>.

European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSOE). 2018. *CACM List of Information to ACER*. Brussels: ENTSOE.

EU-SysFlex. 2018. "State-of-the-Art Literature Review of System Scarcities at High Levels of Renewable Generation. Deliverable D2.1 of the European EU-SysFlex project." [http://eu-sysflex.com/wp-content/uploads/2018/12/D2.1\\_State-of-the-Art\\_Literature\\_Review\\_of\\_System\\_Scarcities\\_at\\_High\\_Levels\\_of\\_Renewable\\_Generation\\_V1.pdf](http://eu-sysflex.com/wp-content/uploads/2018/12/D2.1_State-of-the-Art_Literature_Review_of_System_Scarcities_at_High_Levels_of_Renewable_Generation_V1.pdf).

Fabrizio, Kira R., Nancy L. Rose, and Catherine D. Wolfram. 2007. "Do Markets Reduce Costs? Assessing the Impact of Regulatory Restructuring on US Electric Generation Efficiency." *American Economic Review* 97(4):1250–77. DOI: [10.1257/aer.97.4.1250](https://doi.org/10.1257/aer.97.4.1250)

Felder, Frank A. 2001. "An Island of Technicality in a Sea of Discretion': A Critique of Existing Electric Power Systems Reliability Analysis and Policy." *The Electricity Journal* 14(3):21–31. DOI: [10.1016/s1040-6190\(01\)00183-x](https://doi.org/10.1016/s1040-6190(01)00183-x)

———. 2011. "Examining Electricity Price Suppression Due to Renewable Resources and Other Grid Investments." *The Electricity Journal* 24(4):34–46. DOI: [10.1016/j.tej.2011.04.001](https://doi.org/10.1016/j.tej.2011.04.001)

———. 2020. "Market Versus Planning Approaches to Transmission and Distribution Investment." In *Transmission Network Investment in Liberalized Power Markets*, edited by Mohammad Reza Hesamzadeh, Juan Rosellón, and Ingo Vogelsang, 257–74. Cham: Springer. DOI: [10.1007/978-3-030-47929-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47929-9_9)

Felder, Frank A., and Steve R. Peterson. 1997. "Market Power Analysis in a Dynamic Electric

Power." *The Electricity Journal* 10(3):12–19. DOI: [10.1016/s1040-6190\(97\)80373-9](https://doi.org/10.1016/s1040-6190(97)80373-9)

Goldthau, Andreas. 2014. "Rethinking the Governance of Energy Infrastructure: Scale, Decentralization and Polycentrism." *Energy Research & Social Science* 1:134–140. DOI: [10.1016/j.erss.2014.02.009](https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.009)

Green, Richard. 2005. "Electricity and Markets." *Oxford Review of Economic Policy* 21(1):67–87. DOI: [10.1093/oxrep/gri004](https://doi.org/10.1093/oxrep/gri004)

Grubb, Michael, and David Newbery. 2007. "Pricing Carbon for Electricity Generation: National and International Dimensions." *Cambridge Working Papers in Economics*.

Hall, J. D., Robert J. Ringlee, and Allen J. Wood. 1968. "Frequency and Duration Methods for Power System Reliability Calculations: I-Generation System Model." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 9:1787–96. DOI: [10.1109/tpas.1968.291986](https://doi.org/10.1109/tpas.1968.291986)

Heard, Benjamin P., Barry W. Brook, Tom M.L. Wigley, and Corey J.A. Bradshaw. 2017. "Burden of Proof: A Comprehensive Review of the Feasibility of 100% Renewable-electricity Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76:1122–33. DOI: [10.1016/j.rser.2017.03.114](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.114)

Hines, Paul, Jay Apt, and Sarosh Talukdar. 2009. "Large Blackouts in North America: Historical Trends and Policy Implications." *Energy Policy* 37(12):5249–59. DOI: [10.1016/j.enpol.2009.07.049](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.049)

Hogan, William W. 2014. "Electricity Market Design and Efficient Pricing: Applications for New England and Beyond." *The Electricity Journal* 27(7):23–49. DOI: [10.1016/j.tej.2014.07.009](https://doi.org/10.1016/j.tej.2014.07.009)

- Jacobson, Mark Z., Mark A. Delucchi, Zack A.F. Bauer, Savannah C. Goodman, William E. Chapman, Mary A. Cameron, Cedric Bozonnat, Liat Chobadi, Hailey A. Clonts, Peter Enevoldsen, Jenny R. Erwin, Simone N. Fobi, Owen K. Goldstrom, Eleanor M. Hennessy, Jingyi Liu, Jonathan Lo, Clayton B. Meyer, Sean B. Morris, Kevin R. Moy, Patrick L. O'Neill, Ivalin Petkov, Stephanie Redfern, Robin Schucker, Michael A. Sontag, Jingfan Wang, Eric Weiner, and Alexander S. Yachanin. 2017. "100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World." *Joule* 1(1):108–21.
- Jaffe, Adam B., and Frank A. Felder. 1996. "Should Electricity Markets Have a Capacity Requirement? If So, How Should It Be Priced?" *The Electricity Journal* 9(10):52–60. DOI: [10.1016/S1040-6190\(96\)80157-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6190(96)80157-6)
- Johnson, Samuel C., Joshua D. Rhodes, and Michael E. Webber. 2020. "Understanding the Impact of Non-Synchronous Wind and Solar Generation on Grid Stability and Identifying Mitigation Pathways." *Applied Energy* 262:114492. DOI: [10.1016/j.apenergy.2020.114492](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114492)
- Joskow, Paul L. 2006a. "Introduction to Electricity Sector Liberalization: Lessons Learned from Cross-Country Studies." *Electricity Market Reform: An International Perspective* 1:1–32. DOI: [10.1016/B978-008045030-8/50002-3](https://doi.org/10.1016/B978-008045030-8/50002-3)
- . 2006b. "Markets for Power in the United States: An Interim Assessment." *The Energy Journal* 27(1):1–36. DOI: [10.5547/ISSN0195-6574-ej-vol27-no1-2](https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-ej-vol27-no1-2)
- . 2006c. "Competitive Electricity Markets and Investment in New Generating Capacity." AEI-Brookings Joint Center Working Paper 06-14.
- Kahnamouei, Ali Shakeri, Tohid Ghanizadeh Bolandi, and M-R. Haghifam. 2017. "The Conceptual Framework of Resilience and Its Measurement Approaches in Electrical Power Systems." IET International Conference on Resilience of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2017), 1–11.
- Kančev, Duško, and Marko Čepin. 2011. "Common Cause Failures: Explicit Modelling of Single Failure Event Within Different Common Cause Groups." Proceedings of NENE201, NSS.
- Kapstein, Ethan B., and Joshua W. Busby. 2020. "Making Markets for Merit Goods: The Political Economy of Antiretrovirals." *Global Policy* 1(1):75–90. DOI: [10.1111/j.1758-5899.2009.00012.x](https://doi.org/10.1111/j.1758-5899.2009.00012.x)
- Karbouj, Hazem, Zakir Hussain Rather, Damian Flynn, and Hassan W. Qazi. 2019. "Non-synchronous Fast Frequency Reserves in Renewable Energy Integrated Power Systems: A Critical Review." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 106:488–501. DOI: [10.1016/j.ijepes.2018.09.046](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.09.046)
- Koltsaklis, Nikolaos E., Athanasios S. Dagoumas, and Ioannis P. Panapakidis. 2017. "Impact of the Penetration of Renewables on Flexibility Needs." *Energy Policy* 109:360–9. DOI: [10.1016/j.enpol.2017.07.026](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.026)
- Kroposki, Benjamin. 2017. "Integrating High Levels of Variable Renewable Energy into Electric Power Systems." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 5(6):831–7. DOI: [10.1007/s40565-017-0339-3](https://doi.org/10.1007/s40565-017-0339-3)
- Léautier, Thomas-Olivier. 2019. *Imperfect Markets and Imperfect Regulation: An Introduction to the Microeconomics and Political Economy of Power Markets*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Leslie, Gordon W., David I. Stern, Akshay Shanker, and Michael T. Hogan. 2020. "Designing Electricity Markets for High Penetrations of Zero or Low Marginal Cost Intermittent Energy Sources." *The Electricity Journal* 33(9):106847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106847>
- Löfgren, Åsa, Markus Wråke, Tomas Hagberg, and Susanna Roth. 2014. "Why the EU ETS Needs Reforming: An Empirical Analysis of the Impact on Company Investments." *Climate Policy* 14(5):537–58. DOI: [10.1080/14693062.2014.864800](https://doi.org/10.1080/14693062.2014.864800)
- Lu, Yonglong, Nebojsa Nakicenovic, Martin Visbeck, and Anne-Sophie Stevance. 2015. "Policy: Five Priorities for the UN Sustainable Development Goals." *Nature News* 520(7548):432. DOI: [doi.org/10.1038/520432a](https://doi.org/10.1038/520432a)
- Mann, Stefan. 2006. "Merit Goods in a Utilitarian Framework." *Review of Political Economy* 18(4):509–20. DOI: [10.1080/09538250600915691](https://doi.org/10.1080/09538250600915691)
- Matthewman, Steven, and Hugh Byrd. 2014. "Blackouts: A Sociology of Electrical Power Failure." Lincoln Repository.
- Mays, Jacob. 2021. "Missing Incentives for Flexibility in Wholesale Electricity Markets." *Energy Policy* 149:112010. DOI: [10.1016/j.enpol.2020.112010](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112010)
- Michaels, Robert J. 2008. "A National Renewable Portfolio Standard: Politically Correct, Economically Suspect." *The Electricity Journal* 21(3):9–28. DOI: [10.1016/j.tej.2008.03.003](https://doi.org/10.1016/j.tej.2008.03.003)
- Ovaere, Marten, Evelyn Heylen, Stef Proost, Geert Deconinck, and Dirk Van Hertem. 2019. "How Detailed Value of Lost Load Data Impact Power System Reliability Decisions." *Energy Policy* 132:1064–75. DOI: [10.1016/j.enpol.2019.06.058](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.058)
- Paiho, Satu, Heidi Saastamoinen, Elina Hakkarainen, Lassi Similä, Riku Pasonen, Jussi Ikäheimo, Miika Rämä, Markku Tuovinen, and Seppo Horsmanheimo. 2018. "Increasing Flexibility of Finnish Energy Systems—A Review of Potential Technologies and Means." *Sustainable Cities and Society* 43:509–23. DOI: [10.1016/j.scs.2018.09.015](https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.015)
- Papaefthymiou, Georgios, and Ken Dragoon. 2016. "Towards 100% Renewable Energy Systems: Uncapping Power System Flexibility." *Energy Policy* 92:69–82. DOI: [10.1016/j.enpol.2016.01.025](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.025)
- Petit, Marie, Burcin Unel, Rolando Fuentes, and Frank A. Felder. 2021. "Climate and Power System Reliability in the Aftermath of the Texas Blackouts." *IAEE Energy Forum*. Third Quarter 2021, 12–16.
- Phillips, Stephanie. 2019. "Federal Regulation for a Resilient Electricity Grid." *Ecology LQ* 46:415.
- Plotnek, Jordan J., and Jill Slay. 2021. "Power Systems Resilience: Definition and Taxonomy with a View Towards Metrics." *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 33:100411. DOI: [10.1016/j.ijcip.2021.100411](https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100411)
- Pollitt, Michael. 2009. "Evaluating the Evidence on Electricity Reform: Lessons for the South East Europe (SEE) Market." *Utilities Policy* 17(1):13–23. DOI: [10.1016/j.jup.2008.02.006](https://doi.org/10.1016/j.jup.2008.02.006)
- Pollitt, Michael G., and Karim L. Anaya. 2016. "Can Current Electricity Markets Cope with High Shares of Renewables? A Comparison of Approaches in Germany, the UK and the State of New York." *The Energy Journal* 37(S2):69–88. DOI: [10.5547/01956574.37.si2.mpol](https://doi.org/10.5547/01956574.37.si2.mpol)

- Schmidt, Tobias S., Nicolas Schmid, and Sebastian Sewerin. 2019. "Policy Goals, Partisanship and Paradigmatic Change in Energy Policy—Analyzing Parliamentary Discourse in Germany Over 30 Years." *Climate Policy* 19(6):771–86. DOI: [10.1080/14693062.2019.1594667](https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1594667)
- Sorrell, Steven. 2010. "Energy, Economic Growth and Environmental Sustainability: Five Propositions." *Sustainability* 2(6):1784–809. DOI: [10.3390/su2061784](https://doi.org/10.3390/su2061784)
- Spees, Kathleen, Travis Carless, Walter Graf, Sam Newell, Lily Mwalenga, Sean Chew, Frederick Corpuz, and Kathryn Peters. 2021. *Alternative Resource Adequacy Structures for Maryland*. Boston: The Brattle Group. [Alternative Resource Adequacy Structures for Maryland Final Brattle Study March 2021.pdf](#)
- Tomain, Joseph P. 2015. "The Democratization of Energy." *Vanderbilt Journal of Transnational Law* 48:1125.
- Tran, Thomas T.D., and Amanda D. Smith. 2017. "Evaluation of Renewable Energy Technologies and Their Potential for Technical Integration and Cost-effective Use Within the US Energy Sector." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80:1372–88. DOI: [10.1016/j.rser.2017.05.228](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.228)
- United States Energy Information Administration (EIA). 2011. "Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2021." US Department of Energy, January.
- Urpelainen, Johannes, and Joonseok Yang. 2019. "Global Patterns of Power Sector Reform, 1982–2013." *Energy Strategy Reviews* 23:152–62. DOI: [10.1016/j.esr.2018.12.001](https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.001)
- Van den Bergh, Kenneth, and Erik Delarue. 2020. "Energy and Reserve Markets: Interdependency in Electricity Systems with a High Share of Renewables." *Electric Power Systems Research* 189:106537. DOI: [10.1016/j.epsr.2020.106537](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106537)
- Welton, Shelley. 2018. "Grasping for Energy Democracy." *Michigan Law Review* 116(4):581–644.
- Welton, Shelley. 2021. "Rethinking Grid Governance for the Climate Change Era." *California Law Review* 109:209.
- Zappa, William, Martin Junginger, and Machteld van den Broek. 2019. "Is a 100% Renewable European Power System Feasible by 2050?" *Applied Energy* 233:1027–50. DOI: [10.1016/j.apenergy.2018.08.109](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109)
- Zheng, Tongxin, and Eugene Litvinov. 2010. "On Ex Post Pricing in the Real-time Electricity Market." *IEEE Transactions on Power Systems* 26(1):153–64. DOI: [10.1109/tpwrs.2010.2050707](https://doi.org/10.1109/tpwrs.2010.2050707)



## نبذة عن الباحثين

### فرانك فيلدر



فرانك مهندس ومحلل لسياسات الطاقة ومدير برنامج تحويلات الطاقة والطاقة الكهربائية. عمل قبل انضمامه لكابسارك أستاذا باحثا في كلية التخطيط والسياسة العامة في جامعة روتجرز ومديرا لمركز الطاقة والاقتصاد والسياسات البيئية. وقد أجرى أثناء توليه لهذه المناصب بحثا أساسية وتطبيقية في مجالات نمذجة أنظمة الطاقة الكهربائية وسياسات الطاقة النظيفة وتغير المناخ للمؤسسات الأكاديمية والوكالات الحكومية ومرافق الطاقة. كما عمل مستشارا اقتصاديا ومهندسا نوويا.

### ماري بيتيتيت



ماري باحث مشارك أول في برنامج تحويلات الطاقة والطاقة الكهربائية في كابسارك. تركز أبحاثها الحالية على نمذجة أنظمة الطاقة وتصاميم السوق المخصصة لتحويلات الطاقة. عملت قبل انضمامها إلى كابسارك مهندسا للبحوث في وحدة البحوث والتطوير التابعة لمجموعة كهرباء فرنسا في باريس. وخلال مسيرتها في مجموعة كهرباء فرنسا، عملت على تصميم سوق الكهرباء على المدى الطويل والقصير وشبكات النقل على النطاق الأوروبي وفرص الشحن الذكي للسيارات الكهربائية.

وهي حاصلة على درجة الدكتوراه في الاقتصاد من جامعة دوفين في فرنسا ودرجة الماجستير في اقتصاديات البيئة والطاقة من École des Ponts ParisTech ودرجة الماجستير في الهندسة من ENSTA Institut Polytechnique de Paris في فرنسا.

## نبذة عن المشروع

يعد هذا البحث جزءا من مشروع ” الابتكارات في أسواق الكهرباء والأنظمة الشبكية والاستثمارات والتقنيات منخفضة الكربون“ المندرج تحت برنامج كابسارك لتحويلات الطاقة والكهربائية. ويهدف هذا المشروع إلى تقديم رؤى حول تحول قطاع الكهرباء السعودي. ويتسم هذا التحول بالرغبة في زيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة واستبدال الوقود السائل بالغاز الطبيعي. كما يجب أن يضمن تحقيق التوازن المالي وزيادة صادرات الكهرباء وإنتاج الهيدروجين الأخضر وتنويع الاقتصاد السعودي من خلال التوظيف. ويقدم هذا المشروع رؤى حول التحول من خلال المناقشة والتعلم من أسواق الكهرباء في كافة أنحاء العالم.



[www.kapsarc.org](http://www.kapsarc.org)