

قيمة التخزين في توليد الكهرباء: مراجعة نوعية وكمية

عمرو الشرفاء

عن كابسارك

مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك) مركز عالمي غير ربحي يجري بحوثاً 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 بحوث غير منحازة ومستقلة وعالية الجودة لما فيه صالح المجتمع، ويقع كابسارك في الرياض بالمملكة العربية السعودية.

إشعار قانوني

© حقوق النشر 2020 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.

تجري هذه الدراسة مراجعة شاملة للدراسات السابقة المتعلقة بتقييم التخزين في صناعة الكهرباء، وتركز على المنهجيات الأساسية الثلاث المستخدمة، وهي: التكلفة المعيارية للتخزين (LCOS)، ونماذج تكلفة الإنتاج، والنماذج المبنية على السوق.

توفر التكلفة المعيارية للتخزين متوسط التكلفة التي بها تتساوى التكلفة والعوائد، ويقدر نموذج تكلفة الإنتاج الوفورات التي حققت من خلال استخدام التخزين، وينظر النهج القائم على السوق إلى التخزين كما لو تم تداوله في سوق تنافسية.

نرى أن التخزين يقدم على المدى القريب قيمة أكبر للمرافق المتكاملة عمودياً، التي يمكنها استيعاب فوائده التخزين بشكل كامل لتحقيق تكاليف توليد أقل على مستوى النظام، مقارنة بالمستثمرين في بيئات السوق.

من نواح كثيرة، تشبه الاتجاهات الحالية في اعتماد التخزين تلك المراحل الأولية التي سادت أثناء انتشار الطاقة المتجددة. ومن المفيد لصناع السياسات والجهات المشاركة في الصناعة مراجعة التجارب الناتجة عن ظهور التقنيات السابقة التي أثرت في قطاع الكهرباء.

التكلفة التعادلية، ويقدر نموذج تكلفة الإنتاج الوفورات التي حققت من خلال اعتماد التخزين، وينظر النهج القائم على السوق إلى التخزين كما لو تم تداوله في سوق تنافسية. وناقش هنا مزايا وعيوب كل طريقة. يشير التحليل الذي أجريناه إلى أن قيمة التخزين الكبرى تكمن في تقديم خدمات احتياطي التوليد. وبالنظر إلى لوائح السوق الحالية، نرى أن التخزين على المدى القريب سيكون أكثر قيمة في المرافق المتكاملة عمودياً مقارنة ببيئات السوق المفتوحة. أخيراً، ندرس كيف يمكن لجهود اعتماد التخزين الحالية أن تستفيد من الدروس التي وفرها اعتماد تقنيات الطاقة المتجددة في العقدين الماضيين.

تقنيات تخزين الكهرباء لها العديد من الاستخدامات المفيدة في قطاع الطاقة، ويمكن أن تكون مكملة لتوليد الطاقة المتجددة المتغيرة لتحقيق مستقبل منخفض الكربون. وبالنسبة لصناع السياسات والمرافق والمستثمرين، تتطلب القرارات الفعالة في هذا السياق فهمًا لكيفية تحديد القيمة النقدية للتخزين. وعلى ضوء ذلك تجري هذه الدراسة مراجعة شاملة للدراسات السابقة المتعلقة بتقييم التخزين، وتركز على المنهجيات الأساسية الثلاث المستخدمة -التكلفة المعيارية للتخزين، ونماذج تكلفة الإنتاج، والنماذج المبنية على السوق- التي ينتج كل منها نتائج مختلفة. توفر التكلفة المعيارية للتخزين متوسط

أو مصدر للطاقة، لكن أنظمة البطاريات لا تستطيع تزويد الطاقة عادة بموثوقية إلا لمدة أربع ساعات في تطبيقات المرافق الحالية (Li et al. 2019).

وعلى الرغم من المزايا التي يوفرها التخزين، إلا أن العديد من التحديات التنظيمية والسوقية والتقنية تعرقل انتشاره. فمن وجهة نظر تنظيمية، تصعب إدارة التخزين لأنه يمكن تطبيقه عبر سلسلة قيمة الكهرباء بأكملها. ولا تملك المرافق الحالية خبرة كافية للتعامل مع مثل هذه التقنية الخاصة؛ إذ إن المرافق الحالية وأسواق الكهرباء ألقت استخدام المولدات الحرارية المعتادة دون مشاكل لعقود (Debia, Pineau, and Siddiqui 2019). ومع ذلك اتخذت بعض المرافق والأسواق حول العالم خطوات تقدمية وعدلت لوائحها التنظيمية للسماح للتخزين بالمنافسة في تقديم الخدمات.

لتنظيم التخزين وتعظيم قيمته بشكل فعال يجب على صناع السياسات فهم الفوائد التي يمكن أن يوفرها وكيف يمكن أن تؤثر على مزيج الطاقة (Berrada, Loudiyi, and Zorkani 2016). ومن الضروري التمييز بين القيمة والتكلفة البسيطة أو الربحية؛ فهذا يساعد المنظمين والمرافق والمستثمرين في فهم الجدوى المالية لمشاريع التخزين بشكل أفضل (Alabdullatif, Gerding, and Perez-Diaz 2020; Gailani et al. 2020). ويمكن أن يوفر التخزين العديد من الخدمات في بيئات متنوعة على نطاق واسع، من المنازل خارج الشبكة إلى المرافق الكبيرة وأسواق الكهرباء المفتوحة. ووفقاً لذلك حاولت العديد من الدراسات تحديد قيمته. تتضمن الدراسات السابقة منهجيات تقييم مختلفة نتج عنها مجموعة من النتائج العديدة وغيرها من النتائج.

ولأن تقييم التقنيات أمر بالغ الأهمية لتنظيمها، فإن هذه الدراسة توفر مراجعة شاملة حول كيفية حساب قيمة التخزين في الدراسات السابقة. هذه الدراسة تجيب على سؤالين بحثيين أساسيين، هما: كيف تحدد

تتزايد حصة تثبيت الطاقة المتجددة بشكل مطرد في جميع أنحاء العالم، مدفوعة بانخفاض تكاليف رأس المال وزيادة المخاوف البيئية. ومع أن تقنيات الطاقة المتجددة تتمتع بتكلفة هامشية قريبة من الصفر ولا تصدر أي انبعاثات كربونية عند استخدامها، إلا أن هذا النوع من الطاقة -مثل الطاقة الشمسية والرياح- متقطع. عندما تشكل مصادر الطاقة المتجددة جزءاً صغيراً نسبياً من إجمالي السعة، يمكن للمرافق استيعاب هذا الأمر دون صعوبات تذكر. ولكن مع ارتفاع حصة مصادر الطاقة المتجددة، يصبح الحفاظ على استقرار الشبكة وموثوقيتها أكثر صعوبة (Mararakanye and Bekker 2019).

يمكن أن يتيح تخزين الكهرباء استخدامًا أوسع وأكثر قوة للطاقة المتجددة (Abrell, Rausch, and Streitberger 2019; Haas et al. 2018). ومثل قطاع الطاقة المتجددة، زادت صناعة البطاريات بشكل كبير من كفاءة التكلفة، مما يعني أسعاراً أقل بكثير، وهو توجه من المتوقع أن يستمر على نطاق واسع (Cole and Frazier 2019). وقد تراجعت أسعار أنظمة البطاريات من حوالي 1000 دولار أمريكي لكل كيلو واط في الساعة (kWh/\$) في عام 2010م إلى حوالي 150 إلى 200 دولار أمريكي لكل كيلو واط في الساعة في عام 2020م. ومع ذلك فإن هذا السعر ليس تنافسياً حتى الآن في جميع المناطق الجغرافية والتطبيقات.

يختلف التخزين عن تقنيات توليد الحرارة وتوليد الطاقة المتجددة من نواح كثيرة. أولاً: يمكن تفعيل التخزين على مستويات التوليد والنقل والتوزيع (Kyriakopoulos and Arabatzis 2016). ثانياً: يمكن اعتماد التخزين في أسواق الطاقة والسعة والأسواق الإضافية المساندة، ويمكن أن يوفر خدمات متعددة في وقت واحد. ثالثاً: لا يمكن للتخزين توفير الطاقة إلى أجل غير مسمى، فيمكن أن يستمر التوليد الحراري وتوليد الطاقة المتجددة طالما يتوفر الوقود

ويصف القسم (3) طرق التقييم الرئيسية المعتمدة في الدراسات السابقة، ويتبعه القسم (4) بمراجعة كمية شاملة. ثم يناقش القسم (5) النتائج العددية ويقدم رؤى للدراسات المستقبلية، ويدرس أيضًا نقاط القوة والضعف لتقنيات التقييم المختلفة. وأخيرًا يختتم القسم (6) الدراسة ويلخص نتائجها الرئيسية.

الدراسات السابقة القيمة النقدية للخدمات المختلفة التي يوفرها التخزين؟ وما نقاط القوة والضعف في كل طريقة؟

يتكون ما تبقى من هذه الدراسة من خمسة أقسام. يقدم القسم (2) نظرة عامة على الخدمات التي يمكن أن يوفرها التخزين في على نطاق المرافق والتوزيع.

2. ما الخدمات التي يمكن أن يوفرها التخزين؟

يلخص الجدول (1) تطبيقات وخدمات التخزين الجديرة بالملاحظة، التي تنظم حسب اتصال الشبكة والحجم. كما يوفر أحجام / ساعات البطاريات النموذجية لكل منها. وهذا يسلط الضوء على القدرات التقنية العديدة لتقنيات تخزين الكهرباء وتأثيرها المحتمل في قطاعات السوق.

تستعرض هذه الدراسة الدراسات السابقة المتعلقة بمنهجيات التقييم للتخزين. ولأن التخزين يمكن اعتماده لخدمة تطبيقات متنوعة على نطاق واسع بمقاييس مختلفة -داخل الشبكة أو خارجها- توجد مجموعة من تقنيات التقييم. ومن ثم فإن نظرة عامة على الخدمات المختلفة التي يمكن أن يوفرها التخزين هي نقطة انطلاق مفيدة.

الجدول 1. ملخص خدمات تقنيات التخزين.

حجم البطارية النموذجي بالميجاواط (MW)	الخدمة	الحجم	حالة اتصال الشبكة
10-300	الطاقة و/أو المراجعة	مرفق	على الشبكة
10-300	قدرة الشركة (الذروة)		
1-100	الاستجابة للتردد		
1-100	احتياطي التنظيم		
10-100	الطوارئ / احتياطات (غير) التدوير		
2-400	متابعة الحمل - زيادة		
10-100	فوائد النقل والتوزيع		
-	البداية السوداء		
-	تجميع القيمة		
0.01-0.2	الطاقة و/أو المراجعة	موزعة	على الشبكة
0.01-0.2	خفض تكلفة الطلب عند الذروة		
0.01-0.2	إلغاء/تقليل خفض إنتاج الطاقة المتجددة		
0.025-1	الطاقة و/أو المراجعة	الشبكة الصغرى ¹ (Microgrid)	خارج الشبكة
0.025-1	الاحتياطات		
0.1-1	التحكم في التردد		
0.025-1	تعزيز كفاءة مولدات الديزل		
0.025-1	إلغاء/خفض إنتاج الطاقة المتجددة		
0.001-0.01	الطاقة	أسرة واحدة	على الشبكة
0.001-0.01	تعزيز كفاءة مولدات الديزل		
0.001-0.01	إلغاء/تقليل خفض إنتاج الطاقة المتجددة		

¹قد تكون الشبكات الصغرى متصلة بالشبكة الرئيسية أو معزولة تمامًا. ومع ذلك تستبعد الحالة السابقة لأن هذا يجعلها في الأساس مقياسًا للمرافق، التي تتم مناقشتها بشكل منفصل.

2.1. تطبيقات التخزين على الشبكة

يمكن تصنيف الخدمات المتصلة بالشبكة إما على نطاق المرافق (كبيرة) أو التوزيع (صغيرة). يشمل الأخير القطاعات السكنية والتجارية والصناعية (Fisher, Apt, and Whitacre 2019). على سبيل المثال، يتمتع منتج Tesla Power Wall الشهير بقدرة طاقة قابلة للاستخدام تبلغ 13.5 كيلوواط في الساعة، ويمكن أن يوفر 5 كيلوواط من الطاقة المستمرة (7 كيلوواط من الذروة). إذا وصلت العديد من أنظمة التخزين صغيرة الحجم، فيمكن معاملتها كنظام واحد على نطاق المرافق، وهذا يتطلب نهج تقييم مختلف (Gissey et al. 2019). ومن ناحية أخرى، تتراوح مشاريع التخزين النموذجية على نطاق المرافق ما بين 1 ميجاواط (MW) إلى 200 ميجاواط، ويمكن أن توفر الطاقة لمدة ساعة إلى أربع ساعات.

2.1.1. تطبيقات التخزين على نطاق المرافق

الطاقة و/أو المراجعة: يسهل تخزين الكهرباء شكلاً من أشكال المراجعة، وهي جني الأرباح عن طريق شحن أجهزة التخزين -أي شراء الكهرباء- عندما تكون أسعار الطاقة منخفضة وتفريغها -أي بيع الكهرباء- عندما تكون أسعار الطاقة مرتفعة (Kadri and Raahemifar 2019). أحياناً يستخدم المصطلحين "الطاقة" و "المراجعة" بالتناوب في الدراسات السابقة في تطبيقات التخزين على نطاق المرافق. وبالنسبة لمصادر الطاقة المتجددة، يسمح التخزين بتخزين الطاقة التي ولدت خلال فترات زيادة العرض للبيع أو الاستخدام لاحقاً (Hu et al. 2019; Queiroz, Lopes, and Martins 2020). وبالمثل، يمكن للمرافق زيادة الأرباح عن طريق تمديد الطاقة المخزنة خلال أوقات ذروة الطلب. بدون التخزين، يتحملون عادةً نفقات كبيرة عن طريق تشغيل مولدات إضافية -عادةً الأقل كفاءة في المزيج- لتلبية الطلب الزائد.

السعة الثابتة (الذروة): يجب على مشغلي النظام ضمان توفر قدرة توليد كافية للشركة (قابلة للتمديد) لتلبية الذروة المتوقعة في الطلب (Gupta et al. 2020). واعتماداً على مزيج الطاقة للنظام وأجهزة الحمل، يمكن أن يوفر التخزين خياراً أكثر فعالية من حيث التكلفة لسعة الذروة مقارنة بالتقنيات المعتادة. وكما هو مذكور أعلاه، عادةً ما تلبية المرافق ذروة الطلب باستخدام مولدات ثانوية عالية التكلفة.

الاحتياطات: تعتبر الاحتياطات من بين الخدمات الأكثر أهمية والأكثر قيمة التي يمكن أن يؤديها التخزين داخل نظام الطاقة. يشار إليها أيضاً باسم "احتياطات التشغيل" و/أو "الخدمات الإضافية"، تساعد الاحتياطات على ضمان استقرار الشبكة والتوصيل الموثوق للطاقة (Hummon et al. 2013). يتطلب مشغلو الشبكة الحفاظ على التيار المتغير عند التردد المحدد أو بالقرب منه، بشكل عام 60 هرتز (Hz) (أو 50 هرتز حسب الدولة). ولتجنب عدم الاستقرار، يجب أن تستجيب المولدات لانحرافات التردد الكبيرة في غضون ثوانٍ (Tang et al. 2019). تشير الاحتياطات التنظيمية -أو الأولية- إلى الاحتياطات الجاهزة لتلبية الطلب في إطار زمني قصير نسبياً (15 دقيقة إلى ساعة واحدة) (Bignucolo et al. 2017). وتخصص احتياطات الطوارئ -سواء كانت دورانية أو لا- للاستجابة في إطار زمني أطول قليلاً (30 دقيقة إلى ساعتين). وتصف الزيادة الاحتياطيات القادرة على الاستجابة للتغيرات في الطلب خلال إطار زمني لساعات متعددة (Hu et al. 2018). كما يوفر الطلب منحني يعرف بإسم "duck curve" وهو مثال مناسب على سبب أهمية التخزين في الاحتياطات، خاصة من حيث الزيادة. يرجى ملاحظة أن المصطلحات والتعريفات الدقيقة والفترات الزمنية المتعلقة بالاحتياطات تختلف في الدراسات السابقة.

2. ما الخدمات التي يمكن أن يوفرها التخزين؟

تجميع القيم: تجميع القيم هو قدرة نظام التخزين على توفير أكثر من واحدة من الخدمات المذكورة سابقًا في وقت واحد (Nguyen, Copp, and Byrne 2019). قد يتطلب ذلك قدرة أكبر وينتج عنه المزيد من دورات الشحن أو التفريغ لجهاز التخزين، مما يقلل من عمره. لذلك ينبغي تقييم الآثار المالية والقيمة المكتسبة من تقديم خدمات متعددة بعناية.

2.1.2. تطبيقات التخزين على مستوى التوزيع

الطاقة و/أو المراجعة: كما نوقش أعلاه، تسهل أنظمة التخزين المراجعة ويمكن أن تزيد من أرباح -أو تقلل تكاليف- منتجي الكهرباء. وعلى مستوى التوزيع، يحدث هذا عندما تفرض رسوم على المستهلكين من خلال تسعير وقت الاستخدام (TOU) أو آليات مماثلة. فعلى سبيل المثال، يتيح التخزين أيضًا الاحتفاظ بالطاقة الناتجة عن تثبيت الطاقة المتجددة على مستوى التوزيع ليتم بيعها -إذا سمح المرفق بإعادة البيع إلى الشبكة، من خلال "صافي القياس" مثلًا- أو استخدامها عندما تكون الأسعار مرتفعة.

يرجى الرجوع إلى (Ela, Milligan, and Kirby 2011) للمزيد من الشرح المفصل.

منافع النقل والتوزيع: يجب على المشغلين الاستثمار في البنية التحتية للنقل والتوزيع (T&D)، سواء بتحديثها أو استخدام خطوط نقل وتوزيع جديدة تمامًا. ولأن متطلبات الاستثمار في النقل والتوزيع مرتفعة للغاية، يمكن أن يساعد التخزين في تأجيل هذه النفقات (Li et al. 2020) بعدة طرق، بما في ذلك تسوية الذروة أو تخفيف الازدحام في المواقع المقيدة (Wogrin and Gayme 2015)، خصوصًا عندما تمثل مصادر الطاقة المتجددة حصة كبيرة من مزيج الطاقة. ويمكن أن يقلل التخزين أيضًا من خسائر النقل والتوزيع من خلال تحديد الموقع الأمثل. فعلى مستوى التوزيع بشكل خاص، يمكن للتخزين تحسين الجهد وتقليل تدفق الكهرباء التفاعلية (Mehrjerdi and Hemmati 2019). وفي العديد من الشبكات، يحدث ازدحام كبير في النقل والتوزيع بضع مرات فقط في السنة. بدلًا من بناء بنية تحتية إضافية للنقل والتوزيع لن تكون مستخدمة بشكل كاف، ويمكن للمشغلين اعتماد تخزين الطاقة المتنقل كحل عملي وفعال من حيث التكلفة (Kim and Dvorkin 2019) لحوادث الازدحام المتقطعة وقليلة الحدوث.

إعادة تشغيل وحدة الطاقة ذاتيًا: عند إعادة تشغيل وحدة الطاقة ذاتيًا، تشغل المولد باستخدام مصدر في الموقع، مثل التخزين أو مولد الديزل، بدلًا من سحب الطاقة من الشبكة (Li et al. 2019). قد يكون هذا ضروريًا أثناء حالات الفشل على مستوى النظام مثلًا.

تعقيد الاستثمارات التي تكون على المدى البعيد.

2.2. تطبيقات التخزين خارج الشبكة

يمكن تقسيم التطبيقات خارج الشبكة إلى قسمين: شبكة صغرى (Microgrid) وأسرة مفردة. بينما لا تقدم الدراسات السابقة حاليًا تعريفًا قياسيًّا للشبكة الصغرى، إلا أن وزارة الطاقة الأمريكية تصنفها على أنها مجموعة من الحمل المترابط وموارد الطاقة الموزعة ضمن حدود كهربائية محددة بوضوح تعمل ككيان واحد يمكن التحكم فيه فيما يتعلق بالشبكة الرئيسية (Sumper 2019). يمكن توصيل الشبكة الصغرى بالشبكة الرئيسية أو القائمة بذاتها في "نمط الجزيرة". هذا الأخير هو ما نركز عليه هنا؛ فالشبكات الصغرى للجزيرة توفر حلاً قابلاً للتطبيق لكهربية المواقع البعيدة التي يكون الاتصال بشبكة أكبر فيها باهظ التكلفة (Krishan and Suhag 2019). تشمل الفئة الفرعية الأخرى -أي الأسر المنفردة- جميع المساكن غير المتصلة بشبكة أكبر، في المناطق النائية بشكل عام.

خفض الحمل الذروي: عادة ما تحاسب المرافق المستهلكين وفقاً لاستهلاكهم للكهرباء (أي الفواتير الحجمية). وفي العديد من الدول تضاف أيضاً رسوماً ثابتة -تسمى أحياناً "رسوم الطلب"- بناءً على ذروة استخدام العملاء للكهرباء خلال الفترة المفوترة. يمكن أن تقلل أنظمة التخزين هذه النفقات عن طريق شحن الطاقة خلال فترات انخفاض الطلب وتفريغها عندما يرتفع الاستهلاك. ومن الناحية المالية، يمكن تقييم ذلك باستخدام صافي القيمة الحالية (NPV) أو نهج فترة الاسترداد لتحديد ما إذا كانت تخفيضات رسوم الطلب تتجاوز تكلفة تثبيت وتشغيل التخزين (Tiemann et al. 2020). بشكل عام، ستكون قدرة التخزين المحددة هي الأمثل لتقليل التكلفة الإجمالية للطاقة والتخزين للمستهلك.

إلغاء/تقليل خفض الإنتاج من الطاقة المتجددة: عندما يتجاوز ناتج أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية -أو غيرها من الأنظمة غير قابلة للتمدد- على مستوى التوزيع الحمل، يجب تفريغ الكهرباء الزائدة في الشبكة أو تخزينها أو تبديدها. تسمح أنظمة التخزين لمنتجي الطاقة المتجددة على النطاق الصغير -مثل الأسر والمنشآت الصناعية- بالاحتفاظ بهذه الطاقة لبيعها أو استخدامها لاحقاً (Parra and Patel 2019). ولتعظيم قيمة تطبيق معين للطاقة المتجددة والتخزين، يجب على المستهلك تحديد التركيبة المثلى للتقنيات والمواصفات، بناءً على تكاليف العمر المتوقعة والأرباح أو المدخرات. وإذا كانت أسعار الكهرباء المصدرة -المعروفة باسم تعريفية التغذية الكهربائية (FITs)- مرتفعة بدرجة كافية (كما رأينا في ألمانيا)، فمن المحتمل أن يؤدي التحسين إلى تخزين كبير ونظام كهروضوئي. ومع ذلك تميل المرافق إلى خفض تعريفية التغذية الكهربائية (وزيادة معدلات الكهرباء) بمرور الوقت، مما يزيد من

2. ما الخدمات التي يمكن أن يوفرها التخزين؟

تعزيز كفاءة مولدات الديزل: تنتشر مولدات الديزل في الشبكات الصغرى. إن تشغيل مولد الديزل بأقل بكثير من طاقته المقدره يقلل من كفاءته وينتج عنه مشكلة "التجميع الرطب"؛ إذ لا يحرق وقود الديزل بل يمر عبر نظام العادم. لهذا السبب يمكن لأجهزة التخزين أن تعزز كفاءة مولدات الديزل عن طريق الشحن في أوقات انخفاض الطلب لتكون بمثابة الحمل (Diab et al. 2019).

إلغاء/تقليل خفض الإنتاج من الطاقة المتجددة: كما هو الحال في التطبيقات الأخرى، يمكن للتخزين المستخدم في الشبكات الصغيرة الاحتفاظ بالكهرباء الزائدة الناتجة عن مصادر الطاقة المتجددة ليتم استخدامها لاحقًا، مما يقلل الحاجة إلى تفرغ الطاقة.

2.2.2. تطبيقات التخزين للأسرة الواحدة

الطاقة: نظام خارج الشبكة تمامًا لا يوفر أي فرصة للمراجعة. سيكون دور التخزين توفير الطاقة فقط.

تعزيز كفاءة مولد الديزل: كما هو مذكور أعلاه.

إلغاء/تقليل خفض الإنتاج من الطاقة المتجددة: إذا استخدمت الأسر الطاقة الشمسية الكهروضوئية للتوليد، فيمكن أن يلعب التخزين دورًا تكميليًا، كما هو موضح أعلاه.

2.2.1. تطبيقات التخزين في الشبكة الصغرى (Microgrid)

الطاقة و/أو المراجعة: تنطبق المفاهيم الأساسية الموضحة أعلاه على الشبكات الصغرى. ومع ذلك بالنسبة للجزر الصغيرة أو غيرها من المناطق المعزولة، قد تكون هناك إمكانية ضئيلة أو معدومة للمراجعة إذا كان المستهلكون -الأسر في قرية صغيرة مثلًا- يتشاركون طلبًا مماثل. وفي مثل هذه الحالات، سيكون التخزين مفيدًا بشكل أساسي لتوفير الطاقة واستقرار الشبكة. يمكن أن يقلل أيضًا من استهلاك الوقود السائل (الديزل بشكل أساسي)، خاصة بالنظر إلى زيادة اعتماد الشبكات الصغيرة الهجينة التي تجمع بين الطاقة الشمسية الكهروضوئية والديزل والتخزين. ومن المستحسن تقليل استخدام الديزل لأسباب بيئية، ومع ذلك -مع زيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة- ترتفع تكلفة إلغاء الديزل بشكل كبير، وقد أدى ذلك إلى مناقشة طرق أكثر ابتكارًا لتحقيق شبكات صغرى للطاقة المتجددة بنسبة 100% (Baldinelli et al. 2020).

الاحتياطات: كما نوقش أعلاه، يمكن أن يوفر التخزين خدمات احتياطية لتحسين استقرار الشبكة بطريقة فعالة من حيث التكلفة. وبالنسبة للشبكات الصغيرة، يكون هذا مفيدًا بشكل خاص جنبًا إلى جنب مع مخرجات مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة.

3. كيف تحسب قيمة التخزين؟

3.1. التكلفة المعيارية للتخزين (LCOS)

تقوم التكلفة المعيارية للتخزين (LCOS) بإعادة استخدام صيغة التكلفة المعيارية للطاقة (LCOE) في سياق التخزين. والتكلفة المعيارية للطاقة هي المقياس الأكثر استخدامًا لمقارنة تكاليف التوليد لتقنيات مختلفة (Fan et al. 2019; Pettinau et al. 2017). تتمتع التكلفة المعيارية للطاقة بمزايا مهمة؛ فهي ترصد مكونات التكلفة الرئيسية المرتبطة بالتقنية، ويسهل فهمها، وتتطلب القليل من القوة الحسابية. ومع ذلك فإن هذا النهج أيضًا له قيود كبيرة. على سبيل المثال، لا تتميز التكلفة المعيارية للطاقة برصد بعض الميزات الخاصة بالتقنية، مثل القدرة السريعة على رفع الطاقة المزودة على الزيادة السريعة وقابلية التشغيل الاختياري. للحصول على مناقشات مفصلة حول إيجابيات وسلبيات التكلفة المعيارية للطاقة يرجى الرجوع إلى (Elshurafa (2017) و (Nissen and Harfst (2019).

تشارك التكلفة المعيارية للتخزين والتكلفة المعيارية للطاقة في المعادلة الجبرية (1) الموضحة أدناه. تساوي "التكلفة المعيارية" متوسط سعر الكهرباء المطلوب على مدى عمر جهاز التخزين (المولد) للتساوي مع إجمالي تكاليف شرائه وتشغيله، مخصصًا لتكلفة رأس المال. بدلاً من ذلك، يمكن اعتبار هذا على أنه سعر الكهرباء الذي يجعل صافي القيمة الحالية للتدفقات النقدية مدى الحياة يساوي صفرًا. وفي أبسط صورة، يمكن كتابة معادلة التكلفة المعيارية للتخزين على النحو التالي:

$$LCOS = \frac{CAPEX + \sum_1^n \frac{Costs_n}{(1+DR)^n}}{\sum_1^n \frac{E_n}{(1+DR)^n}}$$

استعرض القسم السابق التطبيقات العديدة لتخزين الكهرباء على مستوى المرافق والتوزيع، داخل وخارج الشبكة، بدءًا من التزويد الأساسي بالطاقة وصولًا إلى تحسين استقرار الشبكة وزيادة كفاءة توليد الطاقة المتجددة. ونظرًا لمثل هذا التنوع، فليس غريبًا أن نرى الباحثين قد تبنوا طرقًا عديدة لتحديد قيمة التخزين في سياقات مختلفة، والاستمرار في تعديل الأساليب الحالية وتطوير أساليب جديدة.

الخصائص التقنية الفريدة للتخزين تجعل التقييم أكثر صعوبة من التوليد التقليدي. على سبيل المثال، تقيم التكاليف الرأسمالية لمحطات الوقود الأحفوري التقليدية من حيث التكلفة لكل وحدة طاقة (على سبيل المثال، دولار/ ميجاواط). هذا النهج غير كافٍ للتخزين لأن سعة الطاقة للبطارية -ميجاواط للساعة على سبيل المثال- تحدد مقدار الكهرباء التي يمكنها تفريغها (Belderbos et al. 2017). يعتمد أداء البطارية وبالتالي القيمة- بشكل كبير على درجة الحرارة التي تصعب نمذجتها. تشمل الخصائص الأخرى التي تؤثر على تقييم التخزين الحد الأدنى المسموح به لحالة الشحن، ومعدل التفريغ الذاتي، وعمر دورة البطارية. لخصت هذه المعاملات والعديد من المعاملات التقنية الأخرى المتعلقة بالتخزين في الملحق A.

لقد أجرينا مراجعة واسعة للدراسات السابقة المتعلقة بتقييم التخزين ووجدنا أن ثلاثة أنواع من المنهجيات تستخدم عادة لتقييم التخزين من الناحية النقدية: التكلفة المعيارية للتخزين، ونماذج تكلفة الإنتاج، والنهج المبني على السوق. هناك أيضًا عدة طرق أخرى، ولكن لا تستخدم كثيرًا. وعلى هذا النحو، فإن القسم التالي سيقترن على مناقشة الأساليب التي اعتمدت على نطاق واسع في الدراسات السابقة.

3. كيف يتم حساب قيمة التخزين؟

هذه الدراسات تتعامل مع التخزين على أنه تقنية مستقلة لإمداد الطاقة في حساباتهم للتكلفة المعيارية للتخزين.

تقوم أبحاث أخرى بتقييم القيمة الإجمالية للأنظمة الهجينة التي تجمع بين التخزين والطاقة الشمسية الكهروضوئية أو تقنيات أخرى (Lai and McCulloch 2017; Pawel 2014; Mundada, Shah, and Pearce 2016). ولا توفر هذه التحليلات تكلفة صريحة لعنصر التخزين وحده. وفي التطبيقات الهجينة، يقوم النظام الشمسي الكهروضوئي بشحن نظام التخزين، ويمكن افتراض أن هذا الشحن يحدث بتكلفة (Lai and McCulloch 2017) أو بدون (Pawel 2014; Mundada, Shah, and Pearce 2016)، مما سيؤثر على التقييم.

بشكل عام، تعد التكلفة المعيارية للتخزين أكثر قابلية للتطبيق في سيناريوهات "خارج الشبكة". يصبح النهج أقل فائدة للأنظمة التخزين على الشبكة -أو الهجينة- لأنه يتجاهل العديد من العوامل التي تؤثر على فعالية التكلفة والقدرة التنافسية. وتشمل هذه العوامل حجم البطارية (والأنظمة الهجينة، وسعة التوليد)، ومتى يتم شحن وتفريغ النظام ومدى تكرار ذلك، وأسعار الكهرباء الحالية للشبكة، وغيرها من المعايير. لذلك، فإن الأساليب الأكثر تعقيداً التي يمكن أن تفسر مثل هذه المتغيرات يمكن أن تنتج نتائجاً أكثر وضوحاً.

3.2. نماذج تكلفة الإنتاج

لأن أنظمة التخزين وتطبيقاتها تصبح أكثر تعقيداً، لا سيما من خلال التفاعل مع الشبكة، ودمج القرارات المشروطة (على سبيل المثال، شحن البطاريات من الشبكة عندما تنخفض الأسعار إلى ما دون حد معين)، أو فرض القيود (على سبيل

حيث CAPEX هي التكلفة الرأسمالية السريعة، و n هي عمر المشروع بالسنوات، و $Costs_n$ هي تكلفة تشغيل وشحن جهاز التخزين في السنة n ، و DR هو معدل الخصم، و E_n هو ناتج الطاقة التراكمي في السنة n .

ومن ثم تعطي التكلفة المعيارية للتخزين نسبة التكلفة إلى الطاقة، وتقاس عادةً بالدولار لكل كيلوواط في الساعة. وبالنسبة للمولدات التقليدية، تشمل شروط التكاليف في المعادلة تكاليف التشغيل والصيانة الثابتة (O&M) والتكاليف المتغيرة (الوقود بشكل عام). وبالنسبة لأجهزة التخزين، تشمل تكاليف التشغيل والصيانة وتكاليف الشحن.

قامت دراسات مثل (Jülch et al (2015)، و (Jülch (2016) و (Smallbone et al (2017) باستخدام تعبير التكلفة المعيارية للتخزين أعلاه، والنواتج لمدخلات الطاقة ذات الصلة من خلال كفاءة البطارية (دورة الشحن والتفريغ). قام (Belderbos et al (2017) بشمل الضرائب وتكاليف إيقاف التشغيل في تحليل التكلفة المعيارية للتخزين الخاص بهم، وقاموا بتقديم مقاييس أخرى لمعالجة القضايا التشغيلية والربحية. وفي دراسة (Obi et al (2017) أدرج الاستهلاك والفوائد والضرائب العقارية وضرائب الدخل والقيمة المتبقية في حسابات التكلفة المعيارية للتخزين التي قاموا بها. وعلى عكس ذلك قام

(Comello and Reichelstein (2019) بتقسيم التكلفة المعيارية للتخزين إلى تكلفة مستوية منفصلة للطاقة وتكلفة مستوية لمكونات الطاقة. وأخذ المؤلفان أيضاً في الاعتبار الاختلافات الموسمية وأجرى تحليلاً مفصلاً لآليات الدعم الفيدرالية في الولايات المتحدة الأمريكية. وأضاف (Schmidt et al (2019) اختلافاً مفيداً آخر باستخدام التقويم الزمني والدورات المكافئة الكاملة لتحديد متى يجب استبدال البطاريات. لاحظ أن جميع

3. كيف يتم حساب قيمة التخزين؟

سعرها في اليوم التالي)، وجدت الدراسة أن هذه الخدمات لا تنتج عوائد مالية جذابة على أساس فردي. ومع ذلك يمكن أن يؤدي إجمالي الإيرادات من تجميع القيم للخدمات المتعددة إلى إضافة أرباح لبعض المؤسسات.

تستخدم دراسات أخرى برامجًا متاحة تجاريًا لتحسين حجم أنظمة تخزين الطاقة الشمسية. فقد قام (Elshurafa and Aldubyan 2019) باستخدام HOMER لتحسين حجم نظام تخزين الطاقة الشمسية المستقل في المناطق الريفية بالمملكة العربية السعودية، بينما قام (O'Shaughnessy et al 2018) باستخدام REopt لتحسين حجم وتمديد نظام هجين لتخزين الطاقة الشمسية على الشبكة في سياق سكني أمريكي، مع مراعاة إمكانية تحويل الحمل. وتعتمد كلتا حزمتي البرامج على صافي القيمة الحالية لتقييم فعالية التكلفة.

تقدم نماذج المحاكاة بديلًا لنماذج التحسين (التي قد يكون من الصعب إنشاؤها وتتطلب أحيانًا طويلة نسبيًا لحسابها وحلها). وتستخدم نماذج المحاكاة القوة الحسابية المباشرة لإيجاد حل لسيناريو بمدخلات محددة. على سبيل المثال، يمكن للباحث تحديد القيم للنطاق المحتمل لأسعار الكهرباء، وسعة النظام الكهروضوئي، وأحجام بنك البطاريات، كما يمكنه استخدام نموذج محاكاة لحساب صافي القيمة الحالية لجميع الاحتمالات الممكنة.

استخدمت العديد من الدراسات نماذج المحاكاة لتقييم الأنظمة الهجينة لتخزين الطاقة الشمسية على مستوى التوزيع. قام (Tervo et al 2018) بتطوير برنامج مخصص في MATLAB لتقييم اقتصاديات أنظمة تخزين الطاقة الشمسية السكنية في جميع الولايات الأمريكية الخمسين ومقارنة تكلفتها المعيارية للطاقة بتكلفة الحصول على الكهرباء من الشبكة. تتراوح قدرة

المثال، شحن البطاريات من الطاقة الشمسية الكهروضوئية فقط)، تصبح النماذج الرياضية أكثر أهمية لإجراء التحليل الكمي. ويمكن تصنيف هذه النماذج بشكل عام إلى نماذج التحسين ونماذج المحاكاة.

يهدف التحسين إلى تعظيم أو تقليل دالة موضوعية -عادةً صافي القيمة الحالية- في ظل قيود محددة. إذ يمكنه استخدام نماذج مبنية خصيصًا أو برامج متاحة تجاريًا. تتضمن الدراسات السابقة العديد من الأمثلة على الأول التي تتطلب الكثير من القوى العاملة لصنعها، ولكن يمكن تغييرها لتناسب سيناريو معين بشكل أكثر دقة من الحلول التجارية. قام (Dietrich and Weber 2018) بتطوير نموذج رياضي يعتمد طريقة الأعداد الصحيحة المختلطة لتصميم نظام هجين لتخزين الطاقة الشمسية على الشبكة في ألمانيا، مع منحني طلب على الكهرباء وبيانات إنتاج كهروضوئية دقتها الزمنية خمس دقائق. يأخذ النموذج أيضًا في الاعتبار تعريف التغذية على الطاقة المصدرة إلى الشبكة. ويدرس (Gitzadeh and Fakharzadegan 2014) نموذجًا آخر يعتمد طريقة الأعداد الصحيحة المختلطة، أنشئ للمنازل في الولايات المتحدة، وهو يأخذ في الاعتبار رسوم كل من وقت الاستخدام وذروة الطلب لزيادة صافي الربح السنوي.

استخدم الباحثون أيضًا نماذج تحسين مخصصة لتقليل تأثير أنظمة تخزين الطاقة الشمسية على الشبكة عن طريق تقليل الحمل الذروي، وانحرافات فرق الجهد التي تنتج عن تدفق الطاقة العكسي (Ratnam and Weller 2018; Ratnam, Weller,) (and Kellett 2015). استخدمت دراسة أخرى نمذجة التحسين لتقييم فائدة تثبيت أنظمة تخزين مستقلة في المؤسسات الصغيرة والمتوسطة الحجم في ألمانيا، وقامت بتقييم إمكانية اعتماد التخزين لكسب تدفقات إيرادات متعددة من خدمات مختلفة (Braeuer et al. 2019). وفي سياق السوق الألمانية (إذ يتم شراء الكهرباء لليوم التالي حسب

3. كيف يتم حساب قيمة التخزين؟

وباستخدام هذا النهج، قام (Denholm et al (2013) بحساب قيمة اعتماد التخزين في غرب الولايات المتحدة الأمريكية، واستنتجت الدراسة أن التخزين أكثر قيمة عند توفير الاحتياطات بدلاً من الطاقة. وفي دراسة أخرى، قام Ellison و Bhatnagar و Karlson (2012) بتقدير قيمة التخزين في هاواي، ووجدوا أن إضافة التخزين خفضت التكلفة الإجمالية للتوليد. ونتجت الوفورات عن التشغيل الأكثر كفاءة للتوليد التقليدي؛ فخفض التخزين كمية احتياطات التدوير التي توفرها وحدات الدورة الواحدة والمركبة بشكل غير فعال. حدد تحليل أجراه معهد أبحاث الطاقة الكهربائية (EPRI) التحديات المرتبطة باعتماد التخزين في الوسط الغربي للولايات المتحدة الأمريكية (Rastler 2011). والجدير بالذكر أن الدراسات الثلاث السابقة استخدمت PLEXOS، وهي حزمة برامج متاحة تجارياً لنمذجة قطاعي الطاقة والنقل. كما استخدم (Kintner-Meyer et al (2012) حزمة برامج مختلفة (PROMOD) لتقييم الآثار المترتبة على التكلفة لاعتماد التخزين في غرب الولايات المتحدة الأمريكية، ومثل الدراسات الأخرى أعلاه، وجد أن التخزين المستخدم للمراجعة فقط لن يكون مربحاً. أخيراً، وجد نموذج تم تطويره لتقييم تأثير تخزين البطاريات على تكاليف التوليد في استراليا أن اعتماد التخزين يمكن أن يقلل التكلفة المعيارية للطاقة بنسبة 13-22٪، ويقلل الطاقة المهجرة بنسبة تصل إلى 76٪ (Keck et al. 2019).

ونظراً لمرونة نماذج التحسين والمحاكاة، وتطبيقها في سياقات مختلفة داخل وخارج الشبكة، وعلى نطاقات التوزيع والمرافق، وعبر مناطق جغرافية مختلفة، فليس من المستغرب أن تجد الدراسات العديدة المذكورة أعلاه قيماً مختلفة للتخزين. علاوة على ذلك، هناك العديد من العوامل التي تؤثر على الجاذبية المالية لاعتماد التخزين غير تكلفة وقدرات التقنية ذاتها. وتشمل هذه العوامل أسعار الكهرباء، وتكلفة وحدات الطاقة

الأنظمة الكهروضوئية من 1 كيلوواط إلى 10 كيلوواط، وأنظمة التخزين من 0 كيلوواط في الساعة إلى 14 كيلوواط في الساعة. وبالمثل قام (Merei et al (2016) بدراسة جدوى لتركيب نظام تخزين الطاقة الشمسية لمتجر في ألمانيا. فتنوع حجم النظام الكهروضوئي كدالة لحمل الذروة، وتراوحت سعة نظام التخزين من 0 كيلوواط في الساعة إلى 50 كيلوواط في الساعة. أجرى المؤلفون أيضاً تحليلاً للحساسية من خلال تغيير تكاليف رأس المال والمعايير الأخرى. وطورت دراسة أخرى نموذج محاكاة لدراسة ربحية التخزين على الشبكة في إسبانيا (Dufo-López and Bernal-Agustín 2015)، ووجدت أنه بناءً على تكاليف تخزين البطاريات الحالية وأسعار الكهرباء في وقت إجراء الدراسة، سيكون للتخزين صافي قيمة حالية سلبية في هذا التطبيق.

استخدمت أبحاث أخرى نماذج محاكاة على نطاق المرافق لحساب الحد الأدنى من التكلفة الممكنة المطلوبة -بما فيها الوقود، والتشغيل، والصيانة، والاحتياطات، وما إلى ذلك- لتلبية الطلب بشكل موثوق. يمكن لهذه المنهجية أن تقدر التخزين بشكل فعال -سواء على نطاق التوزيع أو المنفعة- عن طريق أخذ الفرق بين التكلفة الأدنى لسيناريو بدون تخزين وسيناريو بديل يشمل التخزين (ولكنه متطابق بخلاف ذلك). على سبيل المثال، إذا أدى التخزين في سنة معينة إلى توفير 10 ملايين دولار على سيناريو بدون تخزين، لنظام بسعة 200 ميغاواط، فإن الفائدة السنوية أو قيمة التخزين ستكون 50 دولاراً لكل كيلوواط في السنة (دولار / كيلو واط - السنة). لاحظ أن الدراسات السابقة عندما تقوم الخدمات المتعلقة بالسعة -مثل الاحتياطات- تستخدم دولار / كيلوواط -السنة (أو دولار / كيلوواط - الساعة)، ويشير الأخير إلى وحدة ساعة محتفظ بها لمدة ساعة واحدة.

الشمسية، وتكلفة وتوافر الوقود، وتكلفة توليد الذروة، وحصص مصادر الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة.

الخدمات الاحتياطية صغيرة. وإذا كان نظام تخزين معين كبيراً بما يكفي، فقد يصبح محدد أسعار لخدمات معينة (Artega and Zareipour 2019). لهذا السبب إذا كانت التقنية الجديدة ستؤثر على تكلفة التوليد، فيمكن بناء نموذج محاكاة السوق لتحديد الآثار المترتبة. ويمكن استخدام نماذج التحسين / المحاكاة في أي بيئة، مرفق متكامل عمودياً أو أسواق مفتوحة للخدمات المفصلة. ومع ذلك تتطلب نماذج التقييم المبني على السوق وجود سوق، وكذلك هناك العديد من أوجه التشابه بين نماذج المحاكاة والنماذج المبني على السوق.

3.3. التقييم بناء على السوق

كما هو موضح من الاسم، يستخدم التقييم المبني على السوق أسعار السوق الحالية لتحديد قيمة خدمة معينة سيوفرها التخزين (أو أي تقنية أخرى) (Tómasson, Hesamzadeh, and Wolak 2020). وعلى المستوى الأساسي، ينطبق هذا النهج على أي سلعة أو خدمة توجد لها سوق فعالة. وفي سياق الخدمات ذات الصلة بالتخزين، يتلقى مشغل نظام الكهرباء عطاءات من الجهات المشتركة في السوق التي تسعى إلى توفير الكهرباء أو الخدمات ذات الصلة، ويحسن التشغيل لتقليل التكاليف بناءً على هذه العطاءات². وعندما يقبل المشغل العطاءات، تتلقى الجهة المشاركة السعر الهامشي للخدمة ذات الصلة (Pérez-Arriaga 2014). لذلك تقدم أسعار السوق الفعلية مؤشراً جيداً لما سيحصل عليه مقدم العطاء. وفي بيئة السوق، قد تتغير الأسعار بسرعة وتتنوع حسب الخدمات والفترات الزمنية والسلطات القضائية. ولذلك ينبغي التعامل مع الأسعار الفعلية السابقة بحذر.

قام (Byrne and Silva-Monroy 2012) بإجراء دراسة تقييمية لجهاز تخزين بناءً على إيراداته المستقبلية المتوقعة. واستخدما البيانات الفعلية من مشغل النظام المستقل في كاليفورنيا، وقاما بالتحقيق في الحد الأقصى من الإيرادات المحتملة لسيناريو المراجعة وسيناريو المراجعة بالإضافة إلى الاحتياطي من خلال التحسين الخطي. وجدت الدراسة قيمة إيجابية في كلا السيناريوهين. ومع ذلك فإن القيمة المكتسبة من الاحتياطي تتجاوز بكثير قيمة المراجعة. وبالمثل حاول (Drury Denholm, and Sioshansi 2011) تحديد قيمة تقنية تخزين الهواء المضغوط في عدد من الولايات الأمريكية، باستخدام بيانات الأسعار الفعلية للطاقة والاحتياطي بمساعدة نموذج التمدد. واستنتجوا أن المراجعة وحدها لا تبرر استخدام تخزين الهواء المضغوط في معظم الأسواق. ومع ذلك فإن دراسة الجدوى تصبح أكثر جاذبية مع إضافة الإيرادات الاحتياطية - وهي حالة أخرى يكون فيها التخزين أكثر قيمة عند استخدامه للاحتياطيات بدلاً من المراجعة.

تتمثل الميزة الرئيسية للتقييم المبني على السوق في إمكانية تحقيق قيمة الخدمة دون أي حساب. ومع ذلك، لكي تقدم الأسعار الفعلية معنى أساسياً للتقييم، يجب على المرء أن يفترض أن إدخال التخزين - أو أي تقنية - لن يؤثر على السوق. بعبارة أخرى، يجب أن يكون التأثير صغيراً جداً لتغيير الأسعار ويجب أن يكون التخزين "متلقي سعر" في هذا السياق (Rahimiyan and Baringo 2015). وكما سيظهر، لا يصح هذا الافتراض دائماً لأن سوق

² يعتمد مشغل النظام أيضاً على نماذج لوصف السوق وتقييم الأداء. بالنظر إلى أوجه التشابه في اصطلاحات التسمية في الدراسات السابقة، لا ينبغي الخلط بين هذه النماذج ونماذج المحاكاة / التحسين التي تم طرحها في القسم السابق.

4. المراجعة الكمية

التكلفة المعيارية للتخزين تكلفة التعادل لتقنية التخزين وحدها، في ظل مجموعة من الافتراضات المحددة؛ ومن ثم فإن القيم الأقل تكون أكثر ملاءمة. وكما هو موضح في القسم السابق، لا يمكن ترجمة التكلفة المعيارية للتخزين على الفور إلى الربحية أو القدرة التنافسية من حيث التكلفة على مستوى المرافق أو التوزيع لأنه يستبعد العديد من العوامل ذات الصلة. وبالمثل -بالنسبة للتقييم المبني على السوق- تمثل النتائج التعويض الذي سيحصل عليه التخزين -أو أي تقنية- مقابل تقديم الخدمة المحددة، وتفترض أن تقديمه لا يؤثر على أسعار السوق. من خلال ربط هذه القيمة السوقية بالتكاليف الرأس مالية والتشغيلية لاستخدام تقنية التخزين، سيتمكن المستثمرون من تحديد ما إذا كان التخزين مجدياً من الناحية المالية أم لا. وفي نماذج المحاكاة (تكلفة الإنتاج)، يمثل الناتج التخفيض السنوي في التكاليف التي حققت بسبب اعتماد التخزين مقابل سيناريو بدون تخزين، وهنا تكون القيم الأعلى أكثر جاذبية³.

استعرض القسمان السابقان الخدمات التي يمكن أن يوفرها التخزين والطرق المستخدمة في الدراسات السابقة لتقييمها. يجمع الجدول (2) أدناه نتائج التقييم الكمي والخصائص الرئيسية من كل دراسة ذات صلة تم البحث فيها في هذه الدراسة. نلاحظ أن هذه الأرقام النقدية ناتجة عن عدد كبير من الافتراضات والحسابات، ومن المستحيل تضمينها جميعاً هنا. يوضح الجدول المقياس لكل استخدام محدد، وبالتالي تظهر بعض الدراسات في الجدول أكثر من مرة، مثل المقاييس (على سبيل المثال، المرافق أو التوزيع)، والجغرافيا / الموقع، وتقنية جهاز التخزين (على سبيل المثال، أيون الليثيوم، وحمض الرصاص، والماء، إلخ)، والخدمة المقدمة، ووصفاً موجزاً لكيفية تقييم الخدمة (التكلفة المعيارية للتخزين، أو نماذج تكلفة الإنتاج، أو نماذج السوق كما هو موضح في القسم السابق).

لتفسير الأرقام العددية الموضحة في الجدول (2) بشكل صحيح، من المهم ملاحظة كيف قامت الدراسات المذكورة بحساب هذه الأرقام. تمثل قيم

³ لاحظ أن التخزين قد يزيد تكاليف التوليد بدلاً من خفضها. في مثل هذه الحالات تصبح قيمتها سالبة.

الجدول 2. مراجعة الدراسات السابقة لطرق التقييم والأرقام النقدية الناتجة.

المراجع	النطاق	الخدمة التي يتم تقييمها	المنطقة الجغرافية	التقنية	طريقة التقييم	الأرقام النقدية
Günter and Marinopoulos 2016	التوزيع	حد الذروة	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	أيون-ليثيوم (Li-ion)	النموذج: تحليل التكلفة والفائدة بناءً على صافي القيمة الحالية.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
Dufo-López and Bernal-Agustín 2015		حد الذروة	إسبانيا	متعدد	النموذج: نموذج محاكاة ومقارنة صافي القيمة الحالية لسيناريوهات مختلفة.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
O'Shaughnessy et al. 2018		حد الذروة والطاقة / المراجعة	الولايات المتحدة الأمريكية	غير محدد	النموذج: استخدم المؤلفون برنامج تحسين تجاري وزادوه بشكل أكبر لتقليل صافي القيمة الحالية (NPV) لنظام تخزين الطاقة الشمسية الهجين.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
Gitizadeh and Fakharzadegan 2014		حد الذروة والطاقة / المراجعة	الولايات المتحدة الأمريكية (كارولينا الشمالية)	غير محدد	النموذج: قام المؤلفون ببناء نموذج تحسين لنظام تخزين الطاقة الشمسية الهجين لزيادة صافي الربح السنوي.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
Tervo et al. 2018		الطاقة / المراجعة	الولايات المتحدة الأمريكية (50 ولاية)	أيون-ليثيوم	التكلفة المعيارية للطاقة: اعتمد Matlab لحساب التكلفة الإجمالية لنظام تخزين الطاقة الشمسية الهجين.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
Merei et al. 2016		الطاقة / المراجعة	ألمانيا (آخن)	أيون-ليثيوم	النموذج: اعتمد نموذج محاكاة لحساب التكاليف السنوية للعديد من سيناريوهات تخزين الطاقة الشمسية	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
Günter and Marinopoulos 2016		الطاقة / المراجعة	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	أيون-ليثيوم	النموذج: اعتمد تحليل التكلفة والفائدة بناءً على صافي القيمة الحالية.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
Mahani et al. 2020		الطاقة والخدمات المساعدة	الولايات المتحدة الأمريكية (نيو جيرسي)	غير محدد	النموذج: بنى نموذج تحسين يعتمد على طريقة الأعداد الصحيحة المختلطة وحساب صافي القيمة الحالية.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده. (توفير في التكاليف) 0.1 - 1.5 دولارًا/كيلوواط (التكاليف)
Comello and Reichelstein 2019		الطاقة	الولايات المتحدة الأمريكية	أيون-ليثيوم	التكلفة المعيارية للتخزين: تم اعتماد صيغة مختلفة عن التكلفة المعيارية للتخزين المعهودة، تفرق بين مكونات الكهرباء والطاقة.	0.10 - 0.17 دولارًا/كيلوواط في الساعة
Pawel 2014		الطاقة	غير محدد	أيون-ليثيوم	التكلفة المعيارية للتخزين	1.678 يورو/كيلوواط في الساعة
Jülch et al. 2015		الطاقة	ألمانيا	حمض الرصاص (IA)	التكلفة المعيارية للتخزين: تشمل التكلفة التأمين والعاكس.	0.74 - 0.98 يورو/كيلوواط في الساعة
Elshurafa and Aldubyan 2019		الطاقة	المملكة العربية السعودية	حمض الرصاص	النموذج: استخدم برنامج تجاري لتقليل تكلفة عمر نظام تخزين الطاقة الشمسية الهجين بناءً على صافي القيمة الحالية.	لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.
Pawel 2014		الطاقة	غير محدد	حمض الرصاص	التكلفة المعيارية للتخزين	3.072 يورو/كيلوواط في الساعة

4. المراجعة الكمية

الأرقام النقدية	طريقة التقييم	التقنية	المنطقة الجغرافية	الخدمة التي يتم تقييمها	النطاق	المراجع
0.75 – 0.83 يورو/كيلوواط في الساعة	التكلفة المعيارية للتخزين: تشمل التكلفة التأمين والعاكس.	LFP	غير محدد	الطاقة		Jülch et al. 2015
0.338 يورو/كيلوواط في الساعة	التكلفة المعيارية للتخزين	تدفق الأكسدة والاختزال (Redox-flow)	غير محدد	الطاقة		Pawel 2014
لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.	التكلفة المعيارية للطاقة: تحسب تكلفة نظام هجين يشتمل على الطاقة الكهروضوئية والتخزين والتوليد المشترك.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (ميشيغان)	الطاقة		Mundada, Shah, and Pearce 2016
لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده.	النموذج: اعتمد نموذجًا أمثل لتقليل صافي القيمة الحالية لنظام تخزين الطاقة الشمسية الهجين.	غير محدد	غير محدد	الطاقة		Dietrich and Weber 2018
35 دولارًا/كيلوواط (في العام (متوسط)	السوق: القيم التي تم الحصول عليها من أسعار التوازن المتاحة لتنظيم الاحتياطي.	أيون-ليثيوم	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	احتياطي (تنظيم)	المرفق	Günter and Marinopoulos 2016
433 يورو/كيلوواط في العام	التكلفة المعيارية للتخزين	أيون-ليثيوم	غير محدد	احتياطي (تنظيم)		Zakeri and Syri 2015
256 يورو/كيلوواط في العام	التكلفة المعيارية للتخزين	حمض الرصاص	غير محدد	احتياطي (تنظيم)		Zakeri and Syri 2015
163 – 203 دولارًا/كيلوواط في العام	السوق: تم حساب القيمة من خلال الإيرادات المبنية على النموذج التي يحكمها سعر التوازن للسوق لخدمة التنظيم.	NaS ودارة الموازنة (flywheel)	الولايات المتحدة الأمريكية (نيويورك)	احتياطي (تنظيم)		Walawalkar, Apt, and Mancini 2007
105 – 305 دولارًا/كيلوواط في العام	السوق: بيانات السوق للاحتياطي التنظيمي من 2002م إلى 2011م.	مائية	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	احتياطي (تنظيم)		Kirby 2012
165 يورو/كيلوواط في العام	النموذج: نموذج التحسين.	غير محدد	إسبانيا	احتياطي (تنظيم)		Sigrist, Lobato, and Rouco 2013
110 – 223 دولارًا/كيلوواط في العام	النموذج: نموذج التشغيل الأمثل باستخدام برنامج تجاري.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (المنطقة الغربية)	احتياطي (تنظيم)		Denholm et al. 2013
1~ دولار/كيلو واط في العام	النموذج: نموذج التشغيل الأمثل تم تطويره لنظام الحافلات-IEEE 24	هواء مضغوط	غير محدد	احتياطي (التدوير)		Das, Krishnan, and McCalley 2015
35 – 88 دولارًا/كيلوواط في العام	السوق: بيانات السوق للاحتياطي التنظيمي من 2002م إلى 2011م.	مائية	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	احتياطي (التدوير)		Kirby 2012
65 – 149 دولار/كيلو واط في العام	السوق: الأسعار المتاحة من مشغلي النظام	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (متعدد)	احتياطي (التدوير)		Denholm and Letendre 2007

الأرقام النقدية	طريقة التقييم	التقنية	المنطقة الجغرافية	الخدمة التي يتم تقييمها	النطاق	المراجع
65 – 165 دولارًا/كيلوواط في العام	النموذج: نموذج التشغيل الأمثل باستخدام البرامج التجارية.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (المنطقة الغربية)	احتياطات (التدوير)		Denholm et al. 2013
6 – 41 دولارًا/كيلوواط في العام	السوق: بيانات السوق للاحتياطي التنظيمي من 2002م إلى 2011م.	مائية	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	الاحتياطات (غير قابلة للتدوير)		Kirby 2012
493 يورو/كيلوواط في العام	التكلفة المعيارية للتخزين	أيون-ليثيوم	غير محدد	مميزات النقل والتوزيع		Zakeri and Syri 2015
232 يورو/كيلوواط في العام	التكلفة المعيارية للتخزين	حمض الرصاص	غير محدد	مميزات النقل والتوزيع		Zakeri and Syri 2015
161 يورو/كيلوواط في العام	التكلفة المعيارية للتخزين	هواء مضغوط	غير محدد	مميزات النقل والتوزيع		Zakeri and Syri 2015
98 يورو/كيلوواط في العام	النموذج: نموذج تحسين.	غير محدد	إسبانيا	حد الذروة		Sigrist, Lobato, and Rouco 2013
0.23 – 0.37 يورو/كيلوواط في الساعة	التكلفة المعيارية للتخزين	أيون-ليثيوم	غير محدد	الطاقة		Jülch 2016
0.54 دولارًا/كيلوواط في الساعة	التكلفة المعيارية للتخزين: استخدم صيغة مختلفة عن التكلفة المعيارية للتخزين المعهودة، تسمى بتكلفة التوصيل المعيارية (LCOD).	أيون-ليثيوم	إفريقيا	الطاقة		Lai and McCulloch 2017
0.15 – 0.19 يورو/كيلوواط في الساعة	التكلفة المعيارية للتخزين	حمض الرصاص	غير محدد	الطاقة		Jülch 2016
0.064 دولارًا/كيلوواط في الساعة	التكلفة المعيارية للتخزين	حمض الرصاص	الولايات المتحدة الأمريكية	الطاقة		Obi et al. 2017
646 يورو/كيلوواط في السنة	التكلفة المعيارية للتخزين	حمض الرصاص	غير محدد	الطاقة		Zakeri and Syri 2015
62 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (نيويورك)	الطاقة		Drury, Denholm, and Sioshansi 2011
55 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	الطاقة		Drury, Denholm, and Sioshansi 2011
50 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (MISO)	الطاقة		Drury, Denholm, and Sioshansi 2011

4. المراجعة الكمية

المراجع	النطاق	الخدمة التي يتم تقييمها	المنطقة الجغرافية	التقنية	طريقة التقييم	الأرقام النقدية
Drury, Denholm, and Sioshansi 2011		الطاقة	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	هواء مضغوط	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	25 دولارًا/كيلوواط في السنة
Sioshansi, Denholm, and Jenkin 2011		الطاقة	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	هواء مضغوط	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	53 - 80 دولارًا/كيلوواط في السنة
Obi et al. 2017		الطاقة	غير محدد	هواء مضغوط	التكلفة المعيارية للتخزين	0.055 دولار/كيلو واط في الساعة
Figueiredo, Flynn, and Cabral 2006		الطاقة	كندا (ألبرتا)	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية بناءً على أسعار السوق.	122 دولارًا/كيلوواط في السنة
Figueiredo, Flynn, and Cabral 2006		الطاقة	هولندا	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية بناءً على أسعار السوق.	95 دولارًا/كيلوواط في السنة
Figueiredo, Flynn, and Cabral 2006		الطاقة	المملكة المتحدة	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية بناءً على أسعار السوق.	38 دولارًا/كيلوواط في السنة
Figueiredo, Flynn, and Cabral 2006		الطاقة	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية بناءً على أسعار السوق.	38 دولارًا/كيلوواط في السنة
Figueiredo, Flynn, and Cabral 2006		الطاقة	إسبانيا	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية بناءً على أسعار السوق.	23 دولارًا/كيلوواط في السنة
Figueiredo, Flynn, and Cabral 2006		الطاقة	ألمانيا	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية بناءً على أسعار السوق.	16 دولارًا/كيلوواط في السنة
Figueiredo, Flynn, and Cabral 2006		الطاقة	الدول الإسكندنافية	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية بناءً على أسعار السوق.	0~ دولارًا/كيلوواط في السنة
Sioshansi, Denholm, and Jenkin 2011		الطاقة	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	ضخ المياه	السوق: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق	73 - 113 دولارًا/كيلوواط في السنة
Smallbone et al. 2017		الطاقة	غير محدد	ضخ الحرارة	التكلفة المعيارية للتخزين	0.03 - 0.05 يورو/كيلوواط في الساعة
Walawalkar, Apt, and Mancini 2007		الطاقة	الولايات المتحدة الأمريكية (مدينة نيويورك)	NaS	السوق: تحسب القيمة من خلال الإيرادات المبنية على النموذج التي يحكمها سعر التوازن للسوق لمدة أربع ساعات من التخزين.	76 - 211 دولارًا/كيلوواط في السنة
Lai and McCulloch 2017		الطاقة	إفريقيا	VRB	التكلفة المعيارية للتخزين: استخدم متغيراً من التكلفة المستوية للتخزين، تسمى بتكلفة التوصيل المعيارية (LCOD).	0.50 دولارًا/كيلوواط في الساعة

الأرقام النقدية	طريقة التقييم	التقنية	المنطقة الجغرافية	الخدمة التي يتم تقييمها	النطاق	المراجع
0.50 دولارًا/ كيلوواط في الساعة	التكلفة المستوية للتخزين	VRB	غير محدد	الطاقة		Jülch 2016
46 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: طور نموذج تحسين تحكمه أسعار السوق.	مائية	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	الطاقة		Kirby 2012
50 - 100 دولارًا/ كيلوواط في السنة	السوق: طور نموذج تحسين تحكمه أسعار السوق للفترة 2002-2007م.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	الطاقة		Sioshansi et al. 2009
35 - 80 دولارًا/ كيلوواط في السنة	النموذج: نموذج التمديد الأمثل باستخدام البرامج التجارية.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (المنطقة الغربية)	الطاقة		Denholm et al. 2013
10 - 50 دولارًا/ كيلوواط في السنة	النموذج: نموذج التحسين بمدخلات وأسعار تحكمها السوق لعام 2003م.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	الطاقة		Eyer, Corey, and Iannucci Jr 2004
25 - 40 دولارًا/ كيلوواط في السنة	النموذج: نموذج التحسين.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	الطاقة		Byrne and Silva-Monroy 2012
20 - 60 دولارًا/ كيلوواط في السنة	النموذج: نموذج التحسين بمدخلات وأسعار تحكمها السوق لعام 2001م.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	الطاقة		Eyer, Corey, and Iannucci Jr 2004
لم يوفر رقمًا نقديًا صريحًا للتخزين وحده	النموذج: قدم مقياسًا بلا أبعاد لتقييم قيمة التخزين.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (متعدد)	الطاقة		Braff, Mueller, and Trancik 2016
0.156 - 325 دولارًا/كيلوواط في الساعة	التكلفة المعيارية للتخزين	غير محدد	غير محدد	الطاقة		Lazard 2019
1.4 دولارًا/واط نسبة صافي القيمة الحالية لسعة تخزين البطارية المثبتة	النموذج: تم استخدام برنامج متاح تجاريًا لحساب صافي القيمة الحالية.	أيون-ليثيوم	الولايات المتحدة الأمريكية (البنوي)	تجميع القيم (مميزات الطاقة والنقل)		Baek et al. 2020
103 - 153 دولارًا/ كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	ضخ المياه	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	تجميع القيم (مدفوعات الطاقة والسعة)		Sioshansi, Denholm, and Jenkin 2011
86 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (نيويورك)	تجميع القيم (احتياطيات الطاقة والطوارئ)		Drury, Denholm, and Sioshansi 2011
80 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	تجميع القيم (احتياطيات الطاقة والطوارئ)		Drury, Denholm, and Sioshansi 2011
65 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (MISO)	تجميع القيم (احتياطيات الطاقة والطوارئ)		Drury, Denholm, and Sioshansi 2011

4. المراجعة الكمية

الأرقام النقدية	طريقة التقييم	التقنية	المنطقة الجغرافية	الخدمة التي يتم تقييمها	النطاق	المراجع
47 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	تجميع القيم (احتياطات الطاقة والطوارئ)		Drury, Denholm, and Sioshansi 2011
93 - 120 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: الإيرادات السنوية المحسوبة من خلال نموذج التحسين في بيئة السوق.	هواء مضغوط	الولايات المتحدة الأمريكية (PJM)	تجميع القيم (مدفوعات الطاقة والسعة)		Sioshansi, Denholm, and Jenkin 2011
230 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: نموذج التحسين.	غير محدد	إسبانيا	تجميع القيم (حد الذروة واحتياطي التنظيم)		Sigris, Lobato, and Rouco 2013
117 - 160 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: نموذج التحسين.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	تجميع القيم (احتياطي الطاقة والتنظيم)		Byrne and Silva-Monroy 2012
62 - 75 دولارًا/كيلوواط في السنة	النموذج: طور نموذج تحسين تحكمه أسعار السوق.	غير محدد	الولايات المتحدة الأمريكية (كاليفورنيا)	تجميع القيم (الطاقة، احتياطات التنظيم، واحتياطات التدوير)		Kirby 2012

ملحوظة: LFP = ليثيوم - فوسفات حديد، MISO - مشغل نظام مستقل في أمريكا الشمالية، NaS = الصوديوم - الكبريت، PJM = الربط بين بنسلفانيا ونيوجيرسي وماريلاند، VRB = بطارية التدفق والأكسدة فاناديوم (Vandium).

المفاهيمية لتقنية مكون معينة عديمة الصلة. ومع ذلك قد يرغب العديد من المستثمرين على مستوى المرافق والمرافق ومشغلي النظام -سواء كانوا في بيئة متكاملة عمودياً أو في بيئة سوقية- في معرفة المساهمة الفردية لكل تقنية لإجراء تحليل ونمذجة أكثر دقة.

5.2. متطلبات الاحتياطات مقابل متطلبات الطاقة

يشير الجدول (2) إلى أن التطبيقات الأعلى قيمة لتقنيات التخزين هي الاحتياطات التنظيمية، تليها احتياطات التدوير والطاقة / المراجعة (Zafirakis et al. 2016). وكما وضع الجدول (1)، تتطلب الخدمات الاحتياطية أنظمة تخزين أصغر من خدمات الطاقة، وبالتالي رأس مال أقل. ومن ثم فإن الاستثمارات في التخزين للتطبيقات الاحتياطية تميل إلى أن تكون أكثر جاذبية ولها فترات سداد أقصر. ومع ذلك فإن الاحتياطات لا تمثل سوى حصة صغيرة من التكلفة الإجمالية لتوفير الطاقة في نظام الطاقة (في حدود نسبة مئوية قليلة). وبعبارة أخرى، إن السوق المحتملة للاحتياطات أصغر بكثير من سوق الطاقة بالجملة، ومحدودة أيضاً بسبب المنافسة من التقنيات الأخرى (Denholm and Mai 2019).

علاوة على ذلك، عندما تمثل مصادر الطاقة المتجددة حصة منخفضة من مزيج الطاقة، فحتى التخزين على نطاق المرافق يتمتع حالياً بإمكانيات متواضعة نسبياً لتطبيقات الطاقة، نظراً لقيمتها المنخفضة والسعة الكبيرة اللازمة لها لتكون تنافسية. على سبيل المثال، قام Denholm and Margolis (2018) بتقييم إمكانية استبدال سعة الذروة التقليدية في كاليفورنيا بالتخزين. وعند مستوى تبني للطاقة الكهروضوئية بنسبة 10٪، وجدوا أن التخزين يمكن

مع الأخذ في الاعتبار التمييز بين التكلفة والقيمة، يقدم الجدول (2) العديد من الأفكار المفيدة. ستضع المناقشة أدناه سياق الملاحظات وفقاً لطريقة الخدمة والتقييم، مع التركيز على الصلة بالاقتصاد والسياسة بدلاً من الجوانب الفنية أو الهندسية.

5.1. لا توفر الأرقام العددية دائماً

الملاحظة الأولى المهمة هي أن العديد من الدراسات، على الرغم من محاولتها لتحديد قيمة التخزين في التطبيقات المختلفة، لا تحدد هذا بشكل منفصل. هذا صحيح بشكل أساسي للتطبيقات على مستوى التوزيع، التي تستخدم عادةً التخزين إلى جانب الطاقة الكهربائية. تقارن معظم الدراسات ذات الصلة -باستخدام صافي القيمة الحالية أو التكلفة المعيارية للطاقة- تكلفة الكهرباء من الشبكة وحدها مقابل تكلفتها من نظام هجين لشبكة تخزين الطاقة الشمسية. ومع ذلك فإن نتائجها غالباً لا تحدد بشكل واضح تكلفة / قيمة التخزين في مثل هذه السياقات، التي تختلف عن قيمتها المستقلة وتتطلب تقييماً فعلياً منفصلاً لتحديدها. تشير مراجعة الدراسات السابقة إلى أن العديد من الباحثين الذين يفحصون الأنظمة على مستوى التوزيع قرروا عدم تنفيذ هذه الخطوة الإضافية، التي لن تؤثر على التحليل على مستوى النظام.

من ناحية أخرى، توفر جميع الدراسات السابقة حول الأنظمة على نطاق المرافق قيماً واضحة للتخزين سواء كانت تقنية مستقلة أو جزءاً من مزيج الطاقة. قد يساعد الاختلاف بين الجهات المشاركة النموذجية على مستوى التوزيع وعلى مستوى المرافق في تفسير سبب اعتماد الدراسات المعنية مناهج مختلفة. فعلى مستوى التوزيع، يكون المشترين هم أصحاب المنازل بشكل أساسي، وتركز الشركات الصغيرة على ما إذا كان نظام الطاقة سيكون مفيداً مالياً، مما يجعل القيمة

استخدم تقييم التكلفة المعيارية للتخزين كأساس للتحليل في عشرات الدراسات السابقة المنشورة التي تسعى إلى تحديد تكاليف التخزين. ومع ذلك، يميل المؤلفون إلى الاختلاف في ثلاث طرق مهمة: (1) مستوى التفاصيل المتضمنة للتكاليف والفوائد (على سبيل المثال، الضرائب والقيمة المتبقية في نهاية عمر جهاز التخزين)، (2) الافتراضات المالية الرئيسية / المعاملات (مثل التكاليف الأولية ومعامل الخصم)، (3) دقة مكون الوقت. يعتبر الأخير أمرًا بالغ الأهمية إذا تغير سعر الكهرباء على مدار اليوم - في فترات الساعات الفرعية - بسبب ظروف السوق أو التسعير حسب الاستخدام. ولأن التكلفة المعيارية للتخزين متطابقة جبريًا مع التكلفة المعيارية للطاقة، فإنها تشترك في العيوب ذاتها (Branker, Pathak, and Pearce 2011)، إذ توجد العديد من الدراسات السابقة حول التكلفة المعيارية للطاقة (Aldersey-Williams and Rubert 2019). ومع ذلك سنقوم بتوضيح مدى تأثير النتائج بافتراضات المدخلات باختصار.

التكلفة المعيارية للتخزين لأنظمة تخزين الهواء المضغوط حساسة للغاية لكفاءة الطاقة ذهابًا وإيابًا وعامل السعة. وجد (Obi et al 2017) أن انخفاضًا بنسبة 5% في كفاءة الطاقة ذهابًا وإيابًا يؤدي إلى زيادة بنسبة 15% في التكلفة المعيارية للتخزين. لاحظ أنه نظرًا لظهور هذه المعاملات في المقام لتعبير التكلفة المعيارية للتخزين، فإنها تؤدي إلى تبعية غير خطية. ومن ناحية أخرى، بالنسبة لبطاريات الرصاص الحمضية، فإن النفقات الرأسمالية لها تأثير كبير على التكلفة المعيارية للتخزين نظرًا لقصر عمر البطارية (Jülich 2016). ولأن الطاقة التي يتم توصيلها تظهر في مقام التكلفة المعيارية للتخزين، فكلما زادت الطاقة التي توفرها البطارية، انخفضت التكلفة المعيارية للتخزين. ومن المفارقات أنه مع زيادة التفريغ يقل عمر البطارية مما يستلزم الاستبدال كثيرًا بشكل متكرر. بمعنى آخر، جميع البطاريات تقريبًا حساسة للغاية لعامل السعة - أي ساعات الحمل الكامل لتخزين

أن يوفر حوالي 2.5 جيجاواط، بينما كانت السعة القصوى 54 جيجاواط. وفي دراسة أخرى (Denholm et al. 2019)، بحثت إمكانات التخزين في توفير سعة الذروة في الولايات المتحدة الأمريكية بأكملها. وفي ظل الظروف الفعلية، كانت إمكانات التخزين حوالي 28 جيجاواط. وتعتبر هذه السعة صغيرة مقارنة بقدرة التوليد الأمريكية التي تبلغ حوالي 1200 جيجاواط.

وبالمثل، قدر (Rohit and Rangnekar 2017) أن الهند ستمتلك 35 جيجاواط من إمكانات سوق التخزين لتطبيقات المرافق في عام 2022م، مقابل أكثر من إجمالي سعة 360 جيجاواط. وقام (Bleching et al 2014) بإثبات أنه في أكثر من 2000 جزيرة صغيرة حول العالم، يمكن استخدام حوالي 1 جيجاواط من التخزين اقتصاديًا. هذه النتائج العددية، هي دالة للتكاليف الحالية والمستقبلية المتوقعة للتخزين وجميع التقنيات الأخرى في مزيج الطاقة. وكما هو موضح، تشير معظم الدراسات إلى أن إمكانات السوق للتخزين لا تزال منخفضة دون استخدام كبير لمصادر الطاقة المتجددة. وبالطبع ستؤدي التخفيضات الإضافية في التكلفة في صناعات الطاقة المتجددة والتخزين إلى تغيير هذا. في مثل هذه المناقشات، من المهم التمييز بين الحدود التقنية وإمكانات السوق. على سبيل المثال، في حين أن الشبكة قد تكون جاهزة تقنيًا لاستيعاب نظام تخزين كبير الحجم، فقد يكون من الممكن ماليًا فقط استخدام شبكة بنصف السعة (Rastler 2010).

5.3. حساسية النتائج للافتراضات

كما هو الحال مع أي ممارسة للنمذجة، تعتمد جودة النتائج على الافتراضات الأساسية. تتضمن منهجيات التقييم الثلاث التي نوقشت في القسم (3) عددًا كبيرًا من الافتراضات. وبالنسبة لمشاكل التحسين / المحاكاة، يعد تحقيق التوازن بين الدقة وإمكانية التتبع ممارسة معروفة جيدًا.

كما هو الحال مع التكلفة المعيارية للتخزين، يمكن أن تؤدي دقة الوقت إلى تضليل النتائج في نماذج المحاكاة. وفي حالة المحاكاة على نطاق المرافق، يكون التأثير أكثر وضوحًا ويمكن أن يصل إلى مليارات الدولارات. وعادةً ما يتم تشغيل النماذج على أساس الدقة كل ساعة لأغراض التمديد (Denholm and Mai 2019). ستتأثر قيمة المراجعة للتخزين في السلطات القضائية التي يتغير فيها سعر الكهرباء أقل من ساعة. وفي الماضي، قبلت الدقة النموذجية لمدة ساعة واحدة بشكل عام باعتبارها توازنًا معقولًا بين تعقيد النموذج ودقة النتائج في نماذج التمديد، وقد يؤدي إدخال التخزين في مزيج الطاقة إلى اعتبار هذا النهج غير كافٍ.

في نماذج توسيع السعة طويلة المدى ذات الدقة الزمنية الأقل، يمكن أن تختلف مخرجات النموذج بأكثر من ترتيب من حيث الحجم. على سبيل المثال، وجدت دراسة تقيم قيمة التخزين في نظام الكهرباء في تشيلي (Diaz, Inzunza, and Moreno 2019) أن نموذجًا تفصيليًا بدقة زمنية جيدة يختار بناء 7.8 جيجاواط من سعة التخزين تمثل 42% من ذروة الحمل، بينما يختار الطراز المبسط ذو الدقة الزمنية غير واضحة بناء 240 ميجاواط فقط من التخزين. تشير هذه النتائج إلى عظم أثر الدقة الزمنية على النماذج. علاوة على ذلك، لا تتضمن نماذج توسيع السعة عمومًا جميع الخدمات الإضافية، مما يؤثر على القرارات المتعلقة بكل من التوليد والتخزين التقليدي (Carrion, Dvorkin, and Pandžic 2017).

5.4. تأثير مزيج الطاقة على قيمة التخزين

يوضح الجدول (2) أن معظم الدراسات على نطاق المرافق حول الاحتياطات كانت تتمحور حول الولايات المتحدة. فإن حجم ونضج قطاع الكهرباء في الولايات المتحدة الأمريكية، إلى جانب القدرة البحثية المتاحة لإجراء الدراسات ونشرها، يجعل هذا الأمر

البطارية، التي تعتمد على ساعات التخزين المتاحة- والنسب المئوية للزيادة في التكلفة المعيارية للتخزين بسبب انخفاض بنسبة مئوية معينة في عامل السعة أعلى من النسبة المئوية للانخفاض في التكلفة المعيارية للتخزين بسبب زيادة نسبة عامل السعة ذاتها.

ونظرًا للطبيعة المبسطة للتكلفة المعيارية للتخزين، فإنها تجد معظم الاستخدام والتطبيق على مستوى التوزيع. وعلى مستوى المرافق، تستخدم معظم التقييمات نماذج المحاكاة أو السوق من أجل الحصول على قيمة جميع الروابط بين التقنيات الموجودة في مزيج الطاقة، التي لا يمكن للتكلفة المعيارية للتخزين تضمينها. وكما هو متوقع، يتطلب إنشاء النماذج على نطاق المرافق قدرًا كبيرًا من البيانات؛ لأنها تحتاج أن تأخذ في الحسبان عددًا من الظواهر المعقدة- التي لا تعد مصدر قلق كبير على مستوى التوزيع- مثل الانقطاعات القسرية، والاحتياطات، ومعدلات الحرارة المتغيرة للمحطات، وعدد مرات بدء التشغيل لمحطات الكهرباء. والعديد من هذه الظواهر معقدة وغير خطية بطبيعتها، مما يجعل حل النموذج أكثر صعوبة.

ولنمذجة التخزين على نطاق المرافق، يمكن أن يؤثر عامل التطلع إلى المستقبل بشكل كبير على النتائج؛ لأن تكلفة التوليد الحدية للتخزين قليلة، في بيئة تمدد خالص بترتيب حسب التميز دون التطلع إلى المستقبل، يعطى التخزين أولوية التمديد ذاتها مثل مصادر الطاقة المتجددة نظرًا لتجاهل قيمة تخزين الطاقة. وإذا اعتبر النموذج أن أسعار الطاقة قد تكون أعلى لاحقًا، فقد يقرر تأخير تمديد التخزين حتى ذلك الحين. واعتمادًا على مدة التطلع المضمنة في النموذج (ساعات أو أيام أو أسابيع)، يمكن أن يتغير التمديد بشكل كبير (Khatami, Oikonomou, and Parvania 2019;) ولتعظيم (Wang, Negash, and Kirschen 2017). المراجعة، يسعى النموذج إلى أكبر فرق بين تكلفة الشحن وسعر البيع، وسيختلف هذا الهدف اعتمادًا على المدى الذي يتطلع إليه النموذج، ومعدل التفريغ الذاتي للبطارية، ودقة توقعات الأسعار.

حصّة الطاقة المتجددة تبلغ 55%، فإن زيادة سعة التخزين أو زيادة ساعات التخزين يمكن أن تقلل من خفض الطاقة بنسبة تصل إلى 8%.

استعرض تحليل مفصل أجراه Cebulla et al (2018) ما مجموعه 17 دراسة لزيادة السعة في سياق الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا وألمانيا. كشفت عن ملاحظة مهمة، فمع زيادة مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة في المزيج، تزداد الحاجة إلى سعة كهربائية للتخزين خطياً، ولكن الحاجة إلى سعة الطاقة للتخزين تزداد بشكل كبير. وشملت الدراسات حصصاً للطاقة المتجددة تصل إلى 100% من مزيج الطاقة. واستنتجت الدراسة أيضاً أن الطاقة الشمسية تهيمن على حصّة الطاقة المتجددة، وأن هناك حاجة إلى تخزين إضافي، في حين أن المزيج الذي تهيمن عليه الطاقة من الرياح يتطلب سعة نقل إضافية.

يمكن للغاز الطبيعي أيضاً أن يمكن من استخدام الطاقة المتجددة على نطاق أوسع، وبهذا المعنى يمكن اعتباره منافساً للتخزين (Denholm et al. 2013). تتميز مولدات الغاز بالمرونة، وتلوّثها أقل من محطات توليد الكهرباء التي تستخدم الوقود السائل، ويمكن أن توفر عدداً من خدمات الشبكة بشكل تنافسي. وعلى هذا النحو -اعتماداً على حصّة الغاز في المزيج وسعره- يمكن أن تتأثر بشكل كبير إمكانيات التخزين (بشكل مكافئ، قيمة الخدمة التي سيوفرها التخزين أو أي تقنية أخرى). وفي الواقع، وكما هو موضح في الجدول (2)، من الممكن أن تقدر قيمة الخدمة بـ 0 دولار / كيلواط في الساعة في أوقات معينة اعتماداً على الطلب والتقنيات التي تلبّي هذا الطلب.

لمزيد من التفصيل حول عدم التناسب في قيم الاحتياطات، يتم عرض سيناريوهين لمفاهيم التشغيل الاختياري في الشكلين (1) و (2) لمدة

غير مفاجئ. توفر أسواق الكهرباء التنافسية في الولايات المتحدة الأمريكية على وجه الخصوص ثروة من المعلومات والدروس، بالنظر إلى أن الولايات المتحدة الأمريكية هي موطن لسبع أسواق كهرباء إقليمية تخدم ما يقارب 30 ولاية. بينما يمكن استنتاج النتائج في حدود المعقول لدول أخرى مع التعديلات المناسبة، نلاحظ أن قيمة التخزين تعتمد بشكل كبير على مزيج الطاقة والبيئة التجارية والنظام التنظيمي، التي تختلف حسب السلطة القضائية. هناك عاملان حاسمان يؤثران على قيمة التخزين في مزيج الطاقة، وهما: حصص مصادر الطاقة المتجددة، والغاز الطبيعي.

ومع زيادة حصّة مصادر الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة، فعدم توفرها باستمرار يعد من القيود المتأصلة ويؤدي إلى زيادة القيمة للتخزين، وبشكل عام تزيد قيمة التغييرات في تشغيل الشبكة و / أو استخدام التقنيات التكميلية. وفي الدراسة المذكورة أعلاه التي أجراها Denholm and Margolis (2018) والتي تناقش استبدال سعة الذروة الحالية في كاليفورنيا بالتخزين، تذكر أن إمكانيات التخزين لتوفير الذروة كانت حوالي 2.5 جيجاواط عند مستوى استخدام بنسبة 10% من الطاقة الكهروضوئية. ومع ذلك، إذا وصل استخدام الطاقة الكهروضوئية إلى 30%، فإن إمكانيات التخزين تتضاعف أربع مرات تقريباً إلى حوالي 10 جيجاواط. أجرى Denholm et al (2019) دراسة مماثلة تقيم إمكانيات التخزين لتوفير ذروة للولايات المتحدة الأمريكية بأكملها، ووجد أن هذا يتضاعف تقريباً إذا زاد استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية عن 10%. مع الاستخدام العالي للطاقة المتجددة، يمكن أن يلعب التخزين أيضاً دوراً في تقليل كمية الطاقة المخفضة، اعتماداً على تقنيات الطاقة المتجددة المستخدمة وحصتها من مزيج الطاقة. توصلت دراسة حالة لولاية تكساس (Denholm and Mai 2019) إلى أنه عندما تكون

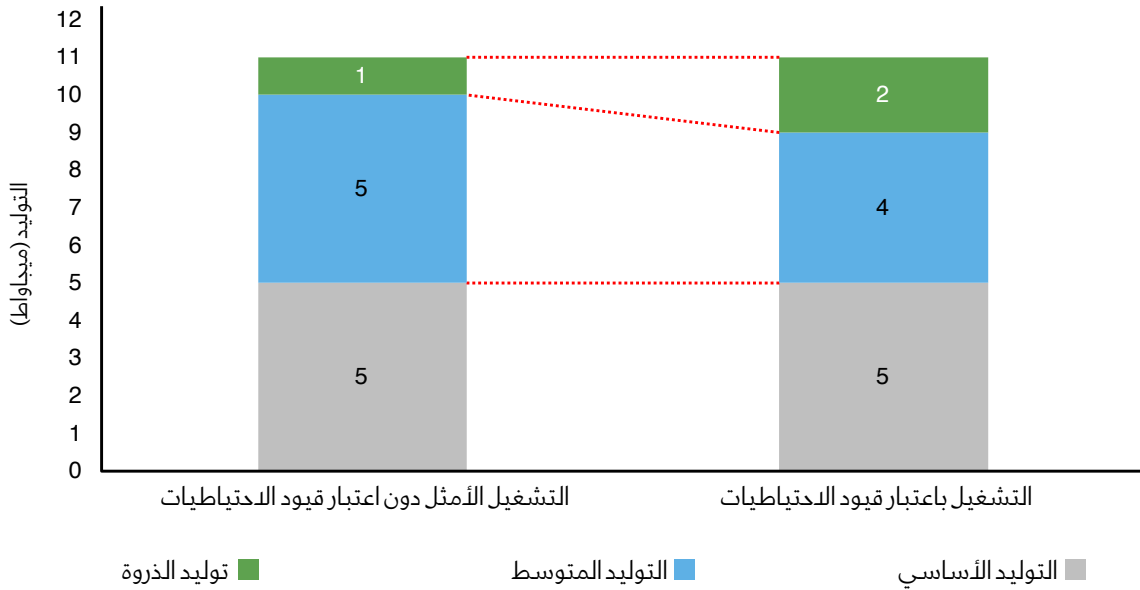
تأثير كبير على قيمة التخزين. على سبيل المثال، في دراسة أجريت في غرب الولايات المتحدة الأمريكية زادت قيمة التخزين في توفير خدمات الطاقة من 35 دولارًا / كيلوواط سنويًا إلى 56 دولارًا / كيلوواط سنويًا عندما تضاعف سعر الغاز الطبيعي، في حين أن قيمة التخزين في توفير الاحتياطات زادت من 65 دولارًا / كيلوواط سنويًا إلى 148 دولارًا / كيلوواط سنويًا عندما تضاعف سعر الغاز الطبيعي (Denholm et al. 2013).

في الشكل (2)، يظهر سيناريو يلبي فيه نظام الكهرباء 7 ميجاواط من الطلب (مقابل 11 ميجاواط في الشكل 1). ومرة أخرى، اليسار هو التشغيل الأمثل؛ إذ يعمل مولد الحمل الأساسي بالحمل الكامل، بينما يلبي المولد الوسيط القدرة المتبقية البالغة 2 ميجاواط. لاحظ أيضًا أن مولد الذروة لا يسهم في تلبية أي طلب خلال هذه الساعة. ويظهر التشغيل المقيد على اليمين. لاحظ أن حالي التشغيل متطابقتان. ويعمل المولد الوسيط بالفعل وهو قادر على تلبية الطلب وتوفير الاحتياطات في نفس الوقت. وهذا يعني وجود تكاليف توليد متطابقة لسيناريوهات التشغيل الأمثل والمقيد، أي أن تكلفة الاحتفاظ بالاحتياطات هذه الساعة تساوي 0 دولارًا / ميجاواط في الساعة. توضح هذه الأمثلة أن قيمة التخزين تعتمد بشكل كبير على مزيج الطاقة ويمكن أن تختلف بشكل ملحوظ على مدار اليوم / الموسم.

ساعة واحدة. تفترض هذه الحالات الافتراضية أن هناك ثلاث مولدات تلبية الطلب، هي: مولد حمل أساسي بسعة 5 ميجاواط وتكلفة توليد تبلغ 5 دولارات / ميجاواط في الساعة، ومولد وسيط بقدرة 5 ميجاواط وتكلفة توليد تبلغ 8 دولارات / ميجاواط في الساعة، ومولد ذروة بسعة 3 ميجاواط وتكلفة توليد تبلغ 15 دولارًا / ميجاواط في الساعة. وفي الشكل (1) تظهر حالة تكون فيها قيمة الاحتياطات غير صفرية، بينما يوضح الشكل (2) حالة تكون فيها قيمة توفير الاحتياطات صفرًا. في الشكل (1)، يعرض سيناريو هين للتمديد لتلبية حمل يبلغ 11 ميجاواط لمدة ساعة واحدة. يعرض الشكل على اليسار التشغيل الأمثل بدون فرض قيود على الاحتياطات. وللحصول على الحد الأدنى من تكلفة التوليد، سيشغل الحمل الأساسي والمولد الوسيط بكامل طاقتهما، وسيقوم مولد الذروة بتلبية آخر ميجاواط. بالنسبة لمثل هذا السيناريو، فإن تكلفة التوليد لتلبية هذا الحمل هي ببساطة مجموع تكاليف التوليد، أي (5 ميجاواط × 5 دولارات / ميجاواط في الساعة) + (5 ميجاواط × 8 دولارات / ميجاواط في الساعة) + (1 ميجاواط × 15 دولارًا / ميجاواط في الساعة) = 80 دولارًا / ميجاواط في الساعة. ومن الناحية الواقعية، سيأخذ في الاعتبار متطلبات الاحتياطي عند التشغيل. في هذه الحالة، سيقبل ناتج المولد الوسيط لأنه الوحدة المرنة، وسيلبي مولد الذروة 2 ميجاواط مقابل 1 ميجاواط في الحالة المثالية. تظهر قيود التشغيل على اليمين في الشكل (1). وتكلفة التوليد لهذه الساعة في ظل قيود الاحتياطي تصبح (5 ميجاواط × 5 دولارات / ميجاواط في الساعة) + (4 ميجاواط × 8 دولارات / ميجاواط في الساعة) + (2 ميجاواط × 15 دولارًا / ميجاواط في الساعة) = 87 دولارًا / ميجاواط في الساعة. بعبارة أخرى، فإن قيمة الاحتفاظ بالاحتياطات -وهي الفرق في التكلفة بين السيناريوهات- هي 7 دولارات / ميجاواط في الساعة. هذه النتيجة متوقعة لأنها الفرق في التكلفة بين مولد الذروة والمولد الوسيط. لاحظ أن المولدات الوسيطة ومولدات الذروة تعمل غالبًا بالغاز، وسيكون لأسعار الغاز

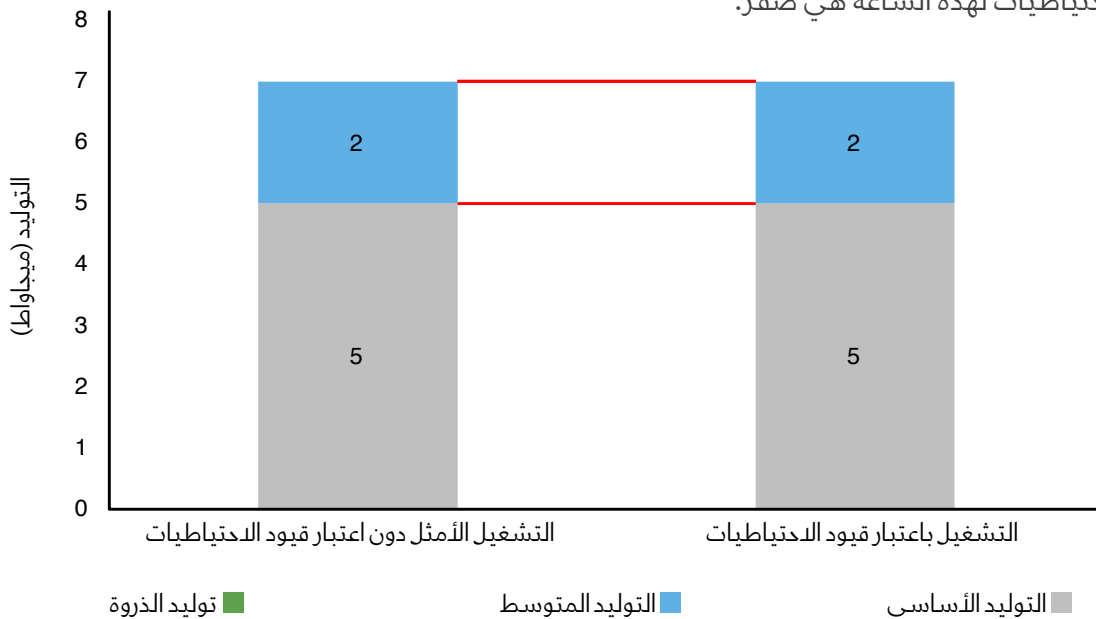
الشكل 1. التشغيل مع الاحتياطات وبدونها (طلب مرتفع).

يعرض أدناه سيناريو تمديد مفاهيمي لنظام كهرباء لمدة ساعة واحدة. على اليسار يعرض التشغيل الأمثل دون مراعاة قيود الاحتياطات. يعمل كل من مولد الحمل الأساسي والمولد الوسيط بسعاتهما الكاملة البالغة 5 ميجاواط. ويلبي مولد الذروة 1 ميجاواط النهائية. على اليمين ينظر في الاحتياطات، وهنا يخفض المولد الوسيط إنتاجه من 5 ميجاواط إلى 4 ميجاواط لتوفير الاحتياطات، بينما زاد مولد الذروة إنتاجه من 1 ميجاواط إلى 2 ميجاواط. يمثل الفرق في تكلفة التوليد بين الحالتين قيمة متطلبات الاحتياطات خلال هذه الساعة.



الشكل 2. التشغيل مع الاحتياطات وبدونها (طلب منخفض).

التشغيل للنظام ذاته في الشكل (1) ولكن بمستوى طلب أقل لمدة ساعة واحدة. لاحظ أن التشغيل لا يتأثر بالاحتفاظ بالاحتياطي. تبلغ قدرة المولد الوسيط 5 ميجاواط، وهناك قدرة كبيرة لتلبية الطلب والاحتياطات. هذا يعني أن تكلفة الاحتفاظ بالاحتياطات لهذه الساعة هي صفر.



المصدر: تحليل الباحث.

5.5. القيمة وإقصاء معوقات الاستخدام

مع نمو الحصة العالمية من مصادر الطاقة المتجددة خلال العشرين عامًا الماضية، اضطرت المرافق إلى تعديل عملياتها. من ناحية أخرى، سعى المنظمون إلى الابتكار في تصميم سوق الكهرباء والحوكمة. وستأتي موجة أخرى من التغييرات مدفوعة بمسار التكلفة التنزالي للتخزين (Jones et al. 2017; Miller and Carriveau 2018). ومع ذلك هناك تحديات كبيرة تعرقل اعتماد التخزين، بما في ذلك العوائق في السوق و العوائق التنظيمية والتقنية.

5.5.1. السوق

يمكن أن يوفر التخزين العديد من الخدمات ولكن بدون وجود أسواق قائمة، ولن تكون هناك حوافز مالية واضحة للقيام بذلك. ومن بين هذه الخدمات إعادة تشغيل وحدة الطاقة ذاتيًا، والاستجابة للقصور الذاتي، وتجنب بدء تشغيل وحدة التوليد الحراري، وزيادة كفاءة النظام (مما يترجم إلى انخفاض استهلاك الوقود)، وتقليل محتمل في الانبعاثات.

أشرفت المرافق والمنظمون على تشغيل التوليد الحراري التقليدي. وهكذا طور تصميم التعويض حول قدرات ومعايير هذه الأنواع من المولدات (Bhatnagar et al. 2013). وكما ذكر سابقًا، فإن سوق الطاقة هي ما يخلق الغالبية العظمى من إيرادات المولدات، مع حصة صغيرة فقط من الإيرادات تأتي من الخدمات الإضافية. تسعّر الخدمات الإضافية بناءً على التكاليف التي يتم تحملها بسبب حجب السعة من سوق الطاقة الخاصة بهم، لتوفر للسوق الإضافية كما هو موضح في الشكل (1). علاوة على ذلك، يمكن توفير الخدمات الإضافية بشكل عام بسهولة بواسطة المولد، إذ إن المولد قيد التشغيل بالفعل ويقوم بتزويد الطاقة. وبالنسبة للتخزين، فإن الوضع مختلف تمامًا. فقد يستخدم جهاز التخزين لغرض وحيد وهو

توفير الخدمات الإضافية (وليس المساهمة في سوق الطاقة). لذلك إذا كان جهاز التخزين كبيرًا بما يكفي لتوفير الخدمة الإضافية المطلوبة بالكامل، فيمكن أن ينخفض سعر تقديم الخدمات الإضافية إلى -قريب من- الصفر، ولن يحصل التخزين على إيرادات لاسترداد تكاليف رأس المال. كما أن خدمات التسعير المبنية على التكلفة الحدية مناسبة للتوليد الحالي، وهي التي تمتلك تكاليف تشغيل وصيانة كبيرة ثابتة ومتغيرة. ومع ذلك -بالنسبة للتخزين- تكون تكاليف رأس المال مرتفعة ولكن التكاليف التشغيلية منخفضة، فإن مخطط تعويض السوق الكلاسيكية هذا يمثل مشكلة. ينطبق هذا الأخير أيضًا على مصادر الطاقة المتجددة، وتجرى حاليًا أبحاث مهمة لتصميم أسواق تمتلك حصة كبيرة من مصادر الطاقة المتجددة (Gerres et al. 2019; Peng and Poudineh 2019).

هذه الملاحظة حول كيف يمكن للتخزين أن يغير أسعار السوق هي ذات أهمية قصوى عند مناقشة قيمة التخزين. في الجدول (2) يوجد عدد من المدخلات تعادل فيها قيمة التخزين بالقيمة السوقية للخدمة التي توفر حاليًا قبل دخول التخزين إلى السوق. بمعنى آخر، تفترض أنه لن يحدث أي تغيير في ديناميكيات المنافسة. ومع ذلك -وكما نوقش في هذا القسم- من الممكن أن يؤدي التخزين إلى انهيار سوق إضافية معينة إذا كان جهاز التخزين كبيرًا بما يكفي (مع الأخذ في الاعتبار أن سوق الخدمات الإضافية صغيرة). وعلى هذا النحو يجب توخي الحذر عند الافتراض بأن تقنية التخزين سيدفع أجرها بأسعار السوق (أي أن تكون متلقية للأسعار).

5.5.2. التنظيم

على المستوى التنظيمي، يعتبر التخزين تقنية يصعب تنظيمها لأنها يمكن أن توفر خدمات عبر سلسلة القيمة الكاملة للكهرباء. يمكن أن يسهم التخزين في أسواق الطاقة، وأسواق السعة،

إلى تخفيضات في التكلفة. ويتمشى هذا أيضًا مع القيم التي عرضت في الجدول (2) والتي توضح أن الخدمة الفردية التي يوفرها التخزين ليست بالضرورة عالية بما يكفي لتبرير الاستثمارات، أي أن القيمة التراكمية تصبح المسار الوحيد القابل للتطبيق ويسهل تحقيقه في بيئة المرافق المتكاملة عموديًا. لا ينطبق الشيء نفسه على بيئة السوق، إذ إنه لن يعوض المستثمر في التخزين عن جميع الخدمات / الفوائد التي يمكن أن يوفرها التخزين، مما يؤثر سلبًا على الجدوى المالية لمشاريع التخزين ومن ثم لا يشجع على الاستثمار في التخزين في بيئات السوق.

5.5.3. النمذجة والتحليل

تعمل المرافق بشكل فعال وموثوق منذ عقود، إذ جمعت ثروة من الخبرات التي ترجمتها إلى قدرات نمذجة متطورة. ومع ذلك فإن هذا يدور بشكل أساسي حول الطرق التقليدية للتوليد. وعلى الرغم من أن المرافق السابقة تتضمن التخزين المائي، فقد تطورت تقنيات التخزين الحديثة مع وظائف إضافية. ونتيجة لذلك لم تعد الأساليب والمعايير السابقة كافية لتحليل السوق وتقييمها، خاصة في ظل زيادة مصادر الطاقة المتجددة. إن التخزين له خصائص فريدة تستدعي الابتعاد عن الأساليب السابقة، مثل عدم القدرة على توفير الطاقة إلى أجل غير مسمى، والحاجة إلى التطلع إلى الأمام، والأثر الناتج على الجدولة / التشغيل (Kazemi and Zareipour 2017)، وحساسية قيمة التخزين لدقة الوقت.

وبينما لا يزال التخزين غير مكافئ مقارنة بالمرافق القديمة، تُظهر الدراسات السابقة أنه يجذب اهتمامًا بحثيًا متزايدًا (Bera et al. 2019, Dubarry et al. 2019). وقد تم تحسين وتحديث العديد من حزم البرامج لتشمل وحدات التخزين المضمنة التي تسهل أعمال مصممي النماذج لأغراض التشغيل والتخطيط على المدى البعيد. بالإضافة إلى ذلك، تتخذ العديد من المرافق خطوات جديرة

والأسواق الفرعية. كما يمكن أن يسهم التخزين على مستويات التوليد والنقل والتوزيع في وقت واحد. على مستوى التوليد، يمكن أن يكون التخزين ذا قيمة خاصة لتتم مشاركته مع محطات الطاقة المتجددة لتقليل الانخفاض أو تقليل سعة النقل اللازمة لتكامل هذه المحطة للطاقة المتجددة. وبالمثل، يمكن بناء التخزين داخل شبكة النقل وتوفير تخفيف الازدحام أو تأجيل استثمارات رأس المال. وعلى مستوى التوزيع والشبكات الصغيرة على الشبكة أيضًا- يمكن أن يساعد التخزين في مشكلات جودة الكهرباء، ويزيد من عمر نظام التوزيع، ويتجنب بناء المحطات الفرعية. بالنظر إلى هذا التنوع، يمكن للتخزين أن يوفر تقنيًا عددًا من الخدمات في قطاعات مختلفة من سلسلة قيمة الكهرباء، لكنه لن يحصل بالضرورة على تعويض عن كل هذه الخدمات بسبب القيود التنظيمية (Sioshansi, Denholm, and Jenkin 2012). حتى عندما يعتزم المنظمون تعديل الأنظمة الحالية للسماح للتخزين بالمشاركة في سوق واحدة أو أكثر، تكون الموافقات والتنفيذ بطيئة بشكل عام. بالإضافة إلى قيود المشاركة، لا تقوم أسواق الكهرباء / المنظمون في كثير من الأحيان بربط قيمة إذا كان هناك من هو أكثر مرونة في تقديم الخدمة. على سبيل المثال، يمكن أن توفر أجهزة التخزين بعض الخدمات الإضافية بشكل أسرع من موارد الوقود الأحفوري النموذجية، ولكن هذه الميزة الإضافية لا تقدر بالضرورة. ولقد أدركت الأنظمة الجديدة في الولايات المتحدة الأمريكية هذا العيب وربطت بالفعل القيمة بجودة الخدمة المقدمة في صلاحياتها.

بالنظر إلى هذه التحديات على مستوى السوق والمستوى التنظيمي، يمكن القول بأن التخزين يمكن أن يكون أكثر قيمة في بيئة المرافق المتكاملة عموديًا بدلًا من بيئة السوق. وفي حالة المرافق المتكاملة عموديًا، ستحقق المرافق جميع الفوائد التي يجلبها التخزين أينما استخدم وبغض النظر عن الدافع الرئيسي لاستخدامه. في النهاية، ستتحقق فوائد جميع القيم وترجمتها

التخزين في المزيج. ولكن هذا النهج يوفر مقياس فحص أولي؛ فكلما زادت التكلفة المعيارية للتخزين لخدمة معينة، تكون أسعار السوق مرتفعة لتحقيق التعادل.

بالثناء نحو فهم التخزين بشكل أفضل من خلال تبني المشاريع التجريبية. ومرة أخرى، تشبه هذه التطورات مسار مصادر الطاقة المتجددة على مدى العقدين الماضيين.

5.5.4. التقنية

تتشترك تكلفة الإنتاج ونماذج السوق في سمات مهمة. وعلى وجه الخصوص، صمم كلا النهجين لتقليل تكلفة توفير الطاقة. علاوة على ذلك، سيتم تشغيل كلا النموذجين بشكل عام لمدة عام واحد مع استبعاد التكاليف الرأسمالية للتقنيات الجديدة. ومع ذلك فإن نموذج السوق يستخدم عطاءات المشاركين في السوق كمدخلات (Goebel et al. 2016). ونظرًا لتمييز التخزين، فهم يستحقون اهتمامًا خاصًا عند تصميم استراتيجياتهم الخاصة بالعروض والعطاءات (Tian et al. 2020). وبمساعدة التكلفة المعيارية للتخزين يمكن استخدام عمليات حسابية إضافية بعد المحاكاة لتقدير العوائد أو فترات الاسترداد. وبالنسبة للمرافق المتكاملة عموديًا، يمكن لنموذج المحاكاة اشتقاق التكلفة الحدية للخدمة. ومع ذلك -في بيئة السوق- قد لا تعكس القيم الفعلية لخدمة معينة بالضرورة التكلفة الحدية فقط. بل ربما لعبت العوامل الأخرى الخاصة بالسوق دورًا في زيادة (أو خفض) السعر، مثل تأثيرات أسعار الندرة أو عقوبات الكربون. وعلى هذا النحو، إذا كان نموذج السوق لا يأخذ في الاعتبار هذه العوامل الإضافية، فلن يصل إلى أسعار مماثلة لتلك التي لوحظت فعليًا. لاحظ أن بناء نموذج ليس مطلوبًا لنهج السوق إذا كان من المتوقع أن إدخال تقنية جديدة لن يؤثر على السوق بشكل كبير. ومع ذلك، فإن إضافة التخزين تؤثر على تشغيل وتمديد أنظمة الكهرباء. نتيجة لذلك تميل الدراسات ذات الصلة إلى تضمين نماذج السوق، كما هو موضح في النتائج الملخصة في الجدول (2).

الحوافز المتعلقة بالتقنية المرتبطة بتقنيات التخزين تعيق التبني أيضًا. والأهم هو التكلفة؛ ففي حين أن أسعار البطاريات تتناقص ومن المتوقع أن تستمر في الانخفاض (Cole and Frazier 2019)، لا يمكن اعتبار التخزين منافسًا من حيث التكلفة لجميع الخدمات وفي جميع الدول. وعلى الرغم من التطورات الكبيرة، يواجه التخزين تحديات صعبة لأن التوليد التقليدي يستمر أيضًا في أن يصبح أكثر كفاءة، إذ تستثمر الجهات الصناعية بكثافة في أنشطة البحث والتطوير. يواجه التخزين أيضًا ندرة في المواد، خاصةً لتقنية بطاريات أيون الليثيوم (Gil-Alana and Monge 2019). ويؤدي قطاع السيارات الكهربائية المتنامي -الذي يستخدم أيضًا بطاريات أيون الليثيوم- إلى تفاقم هذا التحدي.

5.6. تلخيص طرق التقييم

يقدم هذا القسم ملخصًا لأساليب التقييم الرئيسية الثلاثة المعتمدة في الدراسات السابقة، ويقدم مراجعة نوعية موجزة لإيجابيات وسلبيات كل منها.

التكلفة المعيارية للتخزين هي أسهل طريقة للاستخدام وليست معقدة من الناحية الحسابية. ومع ذلك فإنها توفر أقل قدر من الرؤى، خاصةً عندما يكون التخزين جزءًا من نظام كهرباء معقد. وتعد التكلفة المعيارية للتخزين أكثر ملاءمة لمقارنة تقنيات التوليد بشكل فردي بدلًا من تقييم

(3) النماذج المبنية على السوق تمثل تعويضًا محتملاً. ونتيجة لذلك، يجب وضع مفهوم التنافسية في سياقه ليكون ذا مغزى. يلخص الجدول (3) خصائص المناهج الثلاثة.

بالإضافة إلى الفوارق المذكورة أعلاه، تمثل الطرق الثلاث للتقييم كميات مختلفة: (1) ينتج عن التكلفة المعيارية للتخزين التكلفة التعادلية. (2) تقدر نماذج تكلفة الإنتاج وفورات التكلفة.

الجدول 3. تلخيص وتقدير طرق التقييم.

طريقة التقييم	الوصف الأساسي	ما تمثله القيمة العددية	كيفية تفسير التقييم	المميزات	العيوب
التكلفة المعيارية للتخزين (LCOS)	يربط تكاليف العمر لاعتماد جهاز التخزين وإدارته بإجمالي الطاقة التي يوفرها.	تمثل التكلفة المعيارية للتخزين التكلفة (بالدولار / كيلواط في الساعة) التي تعكس متوسط سعر بيع الطاقة المطلوبة لتحقيق التعادل مع إجمالي الإنفاق على التخزين.	كلما انخفضت التكلفة المعيارية للتخزين، زادت جاذبية تقنية التخزين.	- سهل الحساب نسبيًا. - يتطلب بيانات إدخال محدودة. - تمكن من إجراء مقارنات عملية بين مختلف التقنيات. - فعال على نطاق صغير / توزيع.	- يتجاهل بعض التفاصيل التشغيلية. - لا تستطيع وصف التفاعلات بين التقنيات المختلفة. - حساس للافتراضات. - يقدم رؤى قليلة على نطاق المرافق.
نمذجة الإنتاج - التكلفة (أي المحاكاة)	تم بناء نموذج لتقييم تكاليف التوليد مع وبدون تخزين في مزيج الطاقة. يمثل الفرق بين هذه السيناريوهات قيمة التخزين.	تمثل القيمة وفورات في التكلفة: الفرق بين تكاليف التوليد مع التخزين وبدونه. (إذا كانت التكلفة الأخيرة أعلى، فسيكون للتخزين قيمة "سلبية").	كلما ارتفعت القيمة (أي توفير التكلفة)، زادت جاذبية تقنية التخزين.	- تقييم التخزين كجزء من مزيج الطاقة. - تقييم الخدمات المختلفة التي يقدمها التخزين. - يمكن تقييم سيناريوهات متعددة وتأثيرات التغييرات في مزيج الطاقة على قيمة التخزين. - قابل للتطبيق في البيئات المتكاملة عمودياً والأسواق.	- كثيف البيانات. - قد يتطلب وقتاً وموارد حسابية كبيرة، اعتماداً على حجم النموذج. - يتطلب خبرات تقنية ونمذجة قوية. - حساس للافتراضات.
النمذجة و / أو التقييم المبني على السوق	يتم اشتقاق قيمة الخدمة التي يوفرها التخزين من أسعار السوق الحالية للخدمة ذاتها. توفر البيانات الفعلية إرشادات مفيدة. في شكلها الأساسي، تفترض هذه الطريقة أن دخول التخزين إلى السوق لا يغير في البداية سعر الخدمة ذات الصلة.	تمثل القيمة المقابل النقدي لخدمة معينة يقدمها التخزين. يمكن أن يعتمد هذا بشكل مباشر على أسعار السوق، أو على نموذج مبني لتقدير كيفية تغير القيمة السوقية عندما يدخل التخزين في مزيج الطاقة.	كلما ارتفعت القيمة (أي المقابل النقدي)، زادت جاذبية تقنية التخزين.	- يمكن تقدير قيمة التخزين (أو أي تقنية) دون أي حساب في حالة وجود سوق. - يرصد قيمة الخدمات المختلفة التي يقدمها التخزين. - إذا تم بناء نموذج، فيمكنه تقييم سيناريوهات متعددة وتأثيرات التغييرات في مزيج الطاقة على قيمة التخزين.	- قابل للتطبيق فقط في حالة وجود سوق للخدمة المعنية. - يفترض أن التخزين لا يؤثر على التشغيل. - إذا تم استخدام نموذج ما، فإنه يشارك أيضًا عيوب نمذجة الإنتاج - التكلفة أعلاه.

6. ملاحظات ورؤى ختامية

للتخزين. ومع ذلك، حتى في هذه الحالة، قد تكون العوائد منخفضة جدًا لجذب الاستثمارات. وفي حين أن التخزين يمكن أن ينتج قيمة إضافية من خلال توفير خدمات أخرى في سلسلة القيمة الكهربائية، فإن اللوائح التنظيمية تمنع ذلك في كثير من الأحيان. ومن ثم فإننا نرى أن التخزين يوفر على المدى القريب قيمة أكبر للمرافق المتكاملة عموديًا، التي يمكن أن تستوعب بشكل كامل فوائد التخزين لتحقيق تكاليف توليد أقل على مستوى النظام، مقارنة بالمستثمرين في بيئات السوق. وحتى تنخفض تكلفة التخزين بدرجة كافية و/أو تصبح اللوائح التنظيمية أكثر مرونة بشكل ملحوظ، من المرجح أن يظل اعتماد التخزين على نطاق واسع بطيئًا. ومع ذلك فقد اتخذت بعض الأسواق خطوات مادية لتمكين التخزين من التنافس مع الخدمات الحالية.

وعلى مدى العقدین الماضيين، تطلب ظهور تقنيات الطاقة المتجددة من المرافق تعديل ممارساتها التجارية وإدخال أساليب تشغيل جديدة. احتاج المنظّمون أيضًا إلى أن يصبحوا أكثر إبداعًا في كيفية إدارتهم لسلسلة قيمة الكهرباء وكيفية تعويض المشاركين بشكل عادل. ومن نواحٍ عديدة، تشبه الاتجاهات الحالية في اعتماد التخزين المراحل الأولية لاستخدام مصادر الطاقة المتجددة. ومن المفيد لصناع السياسات والجهات الفاعلة في الصناعة الاطلاع على التجارب التي قدمها ظهور التقنيات السابقة المسببة للاضطراب في قطاع الكهرباء.

استعرضت هذه الدراسة بشكل شامل الدراسات السابقة حول كيفية تحديد القيمة النقدية لتخزين الكهرباء على نطاق المرافق والتوزيع. وتحدد ثلاث منهجيات تقييم أولية - التكلفة المعيارية للتخزين، وتكلفة الإنتاج، والنماذج المبنيّة على السوق - لكل منها مزايا وعيوب. من السهل استخدام التكلفة المعيارية للتخزين ولكن لا يمكنها رصد قيمة التخزين عند استخدامه في نظام الكهرباء. وتوفر نماذج تكلفة الإنتاج والسوق دقة أكبر على حساب تجميع البيانات الأكثر تطلبًا والصياغة الرياضية.

وتمثل طرق التقييم الثلاث كميات نقدية مختلفة. تحدد التكلفة المعيارية للتخزين متوسط التكلفة التعاقدية، ويتم حسابها بالدولار / كيلوواط في الساعة. ويقدر نموذج تكلفة الإنتاج وفورات التكلفة التي تحققت من خلال اعتماد التخزين، يتم حسابها بالدولار / كيلوواط - سنويًا. ويمثل نموذج السوق التعويض عن خدمة معينة يقدمها التخزين في قطاع سوق الكهرباء ذي الصلة. من المهم ملاحظة أنه يمكن تطبيق جميع المناهج الثلاثة على تقنيات التوليد الأخرى أيضًا. إن التخزين يستحق بحثًا مخصصًا باعتباره تقنية ناشئة رئيسة ذات ميزات وقدرات مميزة تختلف اختلافًا كبيرًا عن تلك الخاصة بالتوليد التقليدي الحراري وبالطاقة المتجددة.

يشير البحث في الدراسات السابقة إلى أن خدمات الاحتياطيّات هي حاليًا أكثر التطبيقات قيمة

Abrell, Jan, Sebastian Rausch, and Clemens Streitberger. 2019. "Buffering volatility: Storage investments and technology-specific renewable energy support." Supplement, *Energy Economics* 84, no. S1 (October): 104463.

Alabdullatif, Abdullah M., Enrico H. Gerding, and Alvaro Perez-Diaz. 2020. "Market Design and Trading Strategies for Community Energy Markets with Storage and Renewable Supply." *Energies* 13, no. 4 (February): 972.

Aldersey-Williams, John, and Tim Rubert. 2019. "Levelised cost of energy—A theoretical justification and critical assessment." *Energy Policy* 124 (January): 169-179.

Arteaga, Juan, and Hamidreza Zareipour. 2019. "A Price-Maker/Price-Taker Model for the Operation of Battery Storage Systems in Electricity Markets." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 6 (November): 6912-6920.

Baek, Youngsun, Jessica Collingsworth, Steve Clemmer, James Gignac, Mike Jacobs, Paula Garcia, and Sandra Sattler. 2020. "The economic feasibility of solar and storage system in Illinois." *The Electricity Journal* 33, no. 1 (January): 106689.

Baldinelli, Arianna, Linda Barelli, Gianni Bidini, and Gabriele Discepoli. 2020. "Economics of innovative high capacity-to-power energy storage technologies pointing at 100% renewable Micro-grids." *Journal of Energy Storage* 28 (April): 101198.

Belderbos, Andreas, Erik Delarue, Kris Kessels, and William D'haeseleer. 2017. "Levelized cost of storage—Introducing novel metrics." *Energy Economics* 67 (September): 287-299.

Belderbos, Andreas, Ana Virag, William D'haeseleer, and Erik Delarue. 2017. "Considerations on the need for electricity storage requirements: Power versus energy." *Energy Conversion and Management* 143:137-149.

Bera, Atri, Yuting Tian, Saleh Almasabi, Joydeep Mitra, and Carmen Borges. 2019. "Modeling of Battery Energy Storage Systems for System Reliability Studies." Paper presented at 2019 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Power & Energy Society General Meeting, Atlanta, Georgia, United States, August 4-8.

Berrada, Asmae, Khalid Loudiyi, and Izeddine Zorkani. 2016. "Valuation of energy storage in energy and regulation markets." *Energy* 115, Part 1 (November): 1109-1118.

Bhatnagar, Dhruv, Aileen Currier, Jacquelynne Hernandez, Ookie Ma, and Brendan Kirby. 2013. "Market and Policy Barriers to Energy Storage Deployment." United States: Sandia National Laboratories.

Bignucolo, Fabio, Roberto Caldon, Massimiliano Coppo, Fabio Pasut, and Martino Pettinà. 2017. "Integration of Lithium-Ion Battery Storage Systems in Hydroelectric Plants for Supplying Primary Control Reserve." *Energies* 10, no. 1 (January): 98.

Blechinger, P., R. Seguin, C. Cader, P. Bertheau, and Ch. Breyer. 2014. "Assessment of the Global Potential for Renewable Energy Storage Systems on Small Islands." *Energy Procedia* 46:325-331.

Braeuer, Fritz, Julian Rominger, Russell McKenna, and Wolf Fichtner. 2019. "Battery storage systems: An economic model-based analysis of parallel revenue streams and general implications for industry." *Applied Energy* 239 (April): 1424-1440.

- Braff, William A., Joshua M. Mueller, and Jessika E. Trancik. 2016. "Value of storage technologies for wind and solar energy." *Nature Climate Change* 6 (10): 964-969.
- Branker, Kadra, M. J. M. Pathak, and Joshua M. Pearce. 2011. "A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, no. 9 (December): 4470-4482.
- Byrne, Raymond H., and Cesar Augusto Silva-Monroy. 2012. "Estimating the Maximum Potential Revenue for Grid Connected Electricity Storage: Arbitrage and Regulation." United States: Sandia National Laboratories.
- Carrión, Miguel, Yury Dvorkin, and Hrvoje Pandžić. 2018. "Primary Frequency Response in Capacity Expansion with Energy Storage." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 2 (March): 1824-1835.
- Cebulla, Felix, Jannik Haas, Josh Eichman, Wolfgang Nowak, and Pierluigi Mancarella. 2018. "How much electrical energy storage do we need? A synthesis for the US, Europe, and Germany." *Journal of Cleaner Production* 181 (April): 449-459.
- Cole, Wesley J., and A. Will Frazier. 2019. "Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage." United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Comello, Stephen, and Stefan Reichelstein. 2019. "The emergence of cost effective battery storage." *Nature Communications* 10:2038.
- Das, Trishna, Venkat Krishnan, and James D McCalley. 2015. "Assessing the benefits and economics of bulk energy storage technologies in the Power Grid." *Applied Energy* 139 (February): 104-118.
- Debia, Sébastien, Pierre-Olivier Pineau, and Afzal S. Siddiqui. 2019. "Strategic use of storage: The impact of carbon policy, resource availability, and technology efficiency on a renewable-thermal power system." *Energy Economics* 80 (May): 100-122.
- Deboever, Jeremiah, and Santiago Grijalva. 2016. "Optimal scheduling of large-scale price-maker energy storage." Paper presented at 2016 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Power and Energy Conference at Illinois, Urbana, Illinois, United States, February 19-20.
- Denholm, Paul, Jennie Jorgenson, Marissa Hummon, Thomas Jenkin, David Palchak, Brendan Kirby, Ookie Ma, and Mark O'Malley. 2013. "The Value of Energy Storage for Grid Applications." United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Denholm, Paul, and Robert M. Margolis. 2018. "The Potential for Energy Storage to Provide Peaking Capacity in California under Increased Penetration of Solar Photovoltaics." United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Denholm, Paul, and S. Letendre. 2007. "Grid Services from Plug-in Hybrid Electric Vehicles: A Key to Economic Viability." Paper presented at Electrical Energy Storage—Applications and Technology Conference, San Francisco, California, United States.
- Denholm, Paul, and Trieu Mai. 2019. "Timescales of energy storage needed for reducing renewable energy curtailment." *Renewable Energy* 130 (January): 388-399.
- Denholm, Paul, Jacob Nunemaker, Pieter Gagnon, and Wesley Cole. 2020. "The potential for battery energy storage to provide peaking capacity in the United States." *Renewable Energy* 151 (May): 1269-1277.

- Diab, Ahmed A. Zaki, Hamdy M. Sultan, Ihab S. Mohamed, Oleg N. Kuznetsov, and Ton Duc Do. 2019. "Application of Different Optimization Algorithms for Optimal Sizing of PV/Wind/Diesel/Battery Storage Stand-alone Hybrid Microgrid." *IEEE Access* 7:119223-119245.
- Diaz, Gabriel, Andrés Inzunza, and Rodrigo Moreno. 2019. "The importance of time resolution, operational flexibility and risk aversion in quantifying the value of energy storage in long-term energy planning studies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112 (September): 797-812.
- Dietrich, Andreas, and Christoph Weber. 2018. "What drives profitability of grid-connected residential PV storage systems? A closer look with focus on Germany." *Energy Economics* 74 (August): 399-416.
- Drury, Easan, Paul Denholm, and Ramteen Sioshansi. 2011. "The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets." *Energy* 36, no. 8 (August): 4959-4973.
- Dubarry, Matthieu, George Baure, Carlos Pastor-Fernández, Tung Fai Yu, W. Dhammika Widanage, and James Marco. 2019. "Battery Energy Storage system modeling: A combined comprehensive approach." *Journal of Energy Storage* 21 (February): 172-185.
- Dufo-López, Rodolfo, and José L. Bernal-Agustín. 2015. "Techno-economic analysis of grid-connected battery storage." *Energy Conversion and Management* 91 (February): 394-404.
- Ela, Erik, Michael Milligan, and Brendan Kirby. 2011. "Operating Reserves and Variable Generation." United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Ellison, James, Dhruv Bhatnagar, and Benjamin Karlson. 2012. "Maui Energy Storage Study." United States: Sandia National Laboratories.
- Elshurafa, Amro M. 2017. "Reporting LCOE for Solar PV: Apples to Apples Comparisons." KAPSARC Discussion Paper KS-2017-DP05. Saudi Arabia: KAPSARC.
- Elshurafa, Amro M., and Mohammad H. Aldubyan. 2019. "State-of-Charge Effects on Standalone Solar-Storage Systems in Hot Climates: A Case Study in Saudi Arabia." *Sustainability* 11 (12): 3471.
- Eyer, James M., Garth P. Corey, and Joseph J. Iannucci Jr. 2004. *Energy Storage Benefits and Market Analysis Handbook: A Study for the DOE Energy Storage Systems Program*. United States: Sandia National Laboratories.
- Fan, Jing-Li, Shijie Wei, Lin Yang, Hang Wang, Ping Zhong, and Xian Zhang. 2019. "Comparison of the LCOE between coal-fired power plants with CCS and main low-carbon generation technologies: Evidence from China." *Energy* 176 (June): 143-155.
- Figueiredo, F. Cristina, Peter C. Flynn, and Edgar A. Cabral. 2006. "The Economics of Energy Storage in 14 Deregulated Power Markets." *Energy Studies Review* 14 (2): 131-152.
- Fisher, Michael, Jay Apt, and Jay F. Whitacre. 2019. "Can flow batteries scale in the behind-the-meter commercial and industrial market? A techno-economic comparison of storage technologies in California." *Journal of Power Sources* 420 (April): 1-8.
- Gailani, Ahmed, Tracey Crosbie, Maher Al-Greer, Michael Short, and Nashwan Dawood. 2020. "On the Role of Regulatory Policy on the Business Case for Energy Storage in both EU and UK Energy Systems: Barriers and Enablers." *Energies* 13 (5): 1080.

- Gerres, Timo, José Pablo Chaves Ávila, Francisco Martín Martínez, Michel Rivier Abbad, Rafael Cossent Arín, and Álvaro Sánchez Miralles. 2019. "Rethinking the electricity market design: remuneration mechanisms to reach high RES shares. Results from a Spanish case study." *Energy Policy* 129 (June): 1320-1330.
- Gil-Alana, Luis A., and Manuel Monge. 2019. "Lithium: Production and estimated consumption. Evidence of persistence." *Resources Policy* 60 (March): 198-202.
- Gissey, Giorgio Castagneto, Dina Subkhankulova, Paul E. Dodds, and Mark Barrett. 2019. "Value of energy storage aggregation to the electricity system." *Energy Policy* 128 (May): 685-696.
- Gitizadeh, Mohsen, and Hamid Fakharzadegan. 2014. "Battery capacity determination with respect to optimized energy dispatch schedule in grid-connected photovoltaic (PV) systems." *Energy* 65 (February): 665-674.
- Goebel, Christoph, Holger Hesse, Michael Schimpe, Andreas Jossen, and Hans-Arno Jacobsen. 2017. "Model-based Dispatch Strategies for Lithium-Ion Battery Energy Storage Applied to Pay-as-Bid Markets for Secondary Reserve." *IEEE Transactions on Power Systems* 32, no. 4 (July): 2724-2734.
- Günter, Niklas, and Antonios Marinopoulos. 2016. "Energy storage for grid services and applications: Classification, market review, metrics, and methodology for evaluation of deployment cases." *Journal of Energy Storage* 8 (November): 226-234.
- Gupta, Ruchi, Martin Christoph Soini, Martin Kumar Patel, and David Parra. 2020. "Levelized cost of solar photovoltaics and wind supported by storage technologies to supply firm electricity." *J. Energy Storage* 27 (February): 101027.
- Haas, J., F. Cebulla, W. Nowak, C. Rahmann, and R. Palma-Behnke. 2018. "A multi-service approach for planning the optimal mix of energy storage technologies in a fully-renewable power supply." *Energy Conversion and Management* 178 (December): 355-368.
- Hu, Jiahua, Mushfiqur R. Sarker, Jianhui Wang, Fushuan Wen, and Weijia Liu. 2018. "Provision of flexible ramping product by battery energy storage in day-ahead energy and reserve markets." *IET Generation, Transmission, and Distribution* 12 (10): 2256-2264.
- Hu, Yang, Changcheng Zhou, Zuanhong Yan, Peng Li, Xiyuan Ma, Jinyong Lei, and Zhiyong Yuan. 2019. "Economic Feasibility Analysis of Using Battery Energy Storage to Reduce Renewable Generation Curtailment in CSG." Paper presented at 8th Renewable Power Generation Conference, Shanghai, China, October 24-25.
- Hummon, Marissa, Paul Denholm, Jennie Jorgenson, David Palchak, Brendan Kirby, and Ookie Ma. 2013. "Fundamental Drivers of the Cost and Price of Operating Reserves." United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- Jones, Christopher, Vladimir Peshev, Paul Gilbert, and Sarah Mander. 2017. "Battery storage for post-incentive PV uptake? A financial and life cycle carbon assessment of a non-domestic building." *Journal of Cleaner Production* 167 (November): 447-458.
- Jülch, Verena. 2016. "Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method." *Applied Energy* 183 (December): 1594-1606.

- Jülch, Verena, Thomas Telsnig, Maximilian Schulz, Niklas Hartmann, Jessica Thomsen, Ludger Eltrop, and Thomas Schlegl. 2015. "A Holistic Comparative Analysis of Different Storage Systems Using Levelized Cost of Storage and Life Cycle Indicators." *Energy Procedia* 73 (June): 18-28.
- Kadri, Abdeslem, and Kaamran Raahemifar. 2019. "Optimal Sizing and Scheduling of Battery Storage System Incorporated with PV for Energy Arbitrage in Three Different Electricity Markets." Paper presented at 2019 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, May 5-8.
- Kazemi, Mostafa, and Hamidreza Zareipour. 2018. "Long-term Scheduling of Battery Storage Systems in Energy and Regulation Markets Considering Battery's Lifespan." *IEEE Transactions on Smart Grid* 9, no. 6 (November): 6840-6849.
- Keck, Felix, Manfred Lenzen, Anthony Vassallo, and Mengyu Li. 2019. "The impact of battery energy storage for renewable energy power grids in Australia." *Energy* 173 (April): 647-657.
- Khatami, Roohallah, Konstantinos Oikonomou, and Masood Parvania. 2020. "Look-Ahead Optimal Participation of Compressed Air Energy Storage in Day-ahead and Real-time Markets." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 11, no. 2 (April): 682-692.
- Kim, Jip, and Yury Dvorkin. 2019. "Enhancing Distribution System Resilience with Mobile Energy Storage and Microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 5 (September): 4996-5006.
- Kintner-Meyer, Michael C. W., Patrick J. Balducci, Whitney G. Colella, Marcelo A. Elizondo, Chunlian Jin, Tony B. Nguyen, Vilayanur V. Viswanathan, and Yu Zhang. 2012. *National Assessment of Energy Storage for Grid Balancing and Arbitrage: Phase 1, WECC*. United States: Pacific Northwest National Lab (PNNL).
- Kirby, Brendan. 2012. "Co-optimizing Energy and Ancillary Services from Energy Limited Hydro and Pumped Storage Plants." In *Proc. of HydroVision International*. Palo Alto, United States.
- Krishan, Om, and Sathans Suhag. 2019. "Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for an energy poor rural community." *Journal of Energy Storage* 23 (June): 305-319.
- Kyriakopoulos, Grigorios L., and Garyfallos Arabatzis. 2016. "Electrical energy storage systems in electricity generation: energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (April): 1044-1067.
- Lai, Chun Sing, and Malcolm D McCulloch. 2017. "Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage." *Applied Energy* 190 (March): 191-203.
- Lazard. 2019. *Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis - Version 5.0*. United States: Lazard.
- Li, Cuiping, Hengyu Zhou, Junhui Li, and Zhemin Dong. 2020. "Economic dispatching strategy of distributed energy storage for deferring substation expansion in the distribution network with distributed generation and electric vehicle." *Journal of Cleaner Production* 253 (April): 119862.
- Li, Junhui, Hongfei You, Jun Qi, Ming Kong, Shining Zhang, and Hongguang Zhang. 2019. "Stratified Optimization Strategy Used for Restoration With Photovoltaic-Battery Energy Storage Systems as Black-Start Resources." *IEEE Access* 7:127339-127352.

- Li, Xin, Konstantinos J. Chalvatzis, Phedeas Stephanides, Christiana Papapostolou, Emilia Kondyli, Kleanthis Kaldellis, and Dimitrios Zafirakis. 2019. "Bringing innovation to market: business models for battery storage." *Energy Procedia* 159 (February): 327-332.
- Mahani, Khashayar, Seyyed Danial Nazemi, Maryam Arabzadeh Jamali, and Mohsen A Jafari. 2020. "Evaluation of the behind-the-meter benefits of energy storage systems with consideration of ancillary market opportunities." *The Electricity Journal* 33, no. 2 (March): 106707.
- Mararakanye, Ndamulelo, and Bernard Bekker. 2019. "Renewable energy integration impacts within the context of generator type, penetration level and grid characteristics." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 108 (July): 441-451.
- Mehrjerdi, Hasan, and Reza Hemmati. 2019. "Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks." *Journal of Cleaner Production* 234 (October): 810-821.
- Merei, Ghada, Janina Moshövel, Dirk Magnor, and Dirk Uwe Sauer. 2016. "Optimization of self-consumption and techno-economic analysis of PV-battery systems in commercial applications." *Applied Energy* 168 (April): 171-178.
- Miller, Lindsay, and Rupp Carriveau. 2018. "A review of energy storage financing — Learning from and partnering with the renewable energy industry." *Journal of Energy Storage* 19 (October): 311-319.
- Mundada, Aishwarya S., Kunal K. Shah, and Joshua M. Pearce. 2016. "Levelized cost of electricity for solar photovoltaic, battery and cogen hybrid systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (May): 692-703.
- Nguyen, Tu A., David A. Copp, and Raymond H. Byrne. 2019. "Stacking Revenue from Energy Storage Providing Resilience, T&D Deferral and Arbitrage." Paper presented at 2019 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Power & Energy Society General Meeting, Atlanta, Georgia, United States, August 4-8.
- Nissen, Ulrich, and Nathanael Harfst. 2019. "Shortcomings of the traditional 'levelized cost of energy' (LCOE) for the determination of grid parity." *Energy* 171 (March): 1009-1016.
- O'Shaughnessy, Eric, Dylan Cutler, Kristen Ardani, and Robert Margolis. 2018. "Solar plus: Optimization of distributed solar PV through battery storage and dispatchable load in residential buildings." *Applied Energy* 213 (March): 11-21.
- Obi, Manasseh, Shauna M. Jensen, Jennifer B. Ferris, and Robert B. Bass. 2017. "Calculation of levelized costs of electricity for various electrical energy storage systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (January): 908-920.
- Parra, David, and Martin K. Patel. 2019. "The nature of combining energy storage applications for residential battery technology." *Applied Energy* 239 (April): 1343-1355.
- Pawel, Ilja. 2014. "The Cost of Storage — How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation." *Energy Procedia* 46:68-77.
- Peng, Donna, and Rahmatallah Poudineh. 2019. "Electricity market design under increasing renewable energy penetration: Misalignments observed in the European Union." *Utilities Policy* 61 (December): 100970.

- Pérez-Arriaga, Ignacio J. 2014. *Regulation of the Power Sector*. London: Springer-Verlag.
- Pettinau, Alberto, Francesca Ferrara, Vittorio Tola, and Giorgio Cau. 2017. "Techno-economic comparison between different technologies for CO₂-free power generation from coal." *Applied Energy* 193 (May): 426-439.
- Queiroz, Humberto, Rui Amaral Lopes, and João Martins. 2020. "Automated energy storage and curtailment system to mitigate distribution transformer aging due to high renewable energy penetration." *Electric Power Systems Research* 182 (May): 106199.
- Rahimiyan, Morteza, and Luis Baringo. 2016. "Strategic Bidding for a Virtual Power Plant in the Day-ahead and Real-time Markets: A Price-Taker Robust Optimization Approach." *IEEE Transactions on Power Systems* 31, no. 4 (July): 2676-2687.
- Rastler, D. 2010. *Electricity Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits*. United States: Electric Power Research Institute.
- . 2011. "MISO Energy Storage Study Phase 1 Report." United States: Electric Power Research Institute.
- Ratnam, Elizabeth L., and Steven R. Weller. 2018. "Receding horizon optimization-based approaches to managing supply voltages and power flows in a distribution grid with battery storage co-located with solar PV." *Applied Energy* 210 (January): 1017-1026.
- Ratnam, Elizabeth L., Steven R. Weller, and Christopher M. Kellett. 2015. "An optimization-based approach to scheduling residential battery storage with solar PV: Assessing customer benefit." *Renewable Energy* 75 (March): 123-134.
- Rohit, Amit Kumar, and Saroj Rangnekar. 2017. "An overview of energy storage and Its importance in Indian renewable energy sector: Part II — energy storage applications, benefits and market potential." *Journal of Energy Storage* 13 (October): 447-456.
- Schmidt, Oliver, Sylvain Melchior, Adam Hawkes, and Iain Staffell. 2019. "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies." *Joule* 3, no. 1 (January): 81-100.
- Sigrist, Lukas, Enrique Lobato, and Luis Rouco. 2013. "Energy storage systems providing primary reserve and peak shaving in small isolated power systems: An economic assessment." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 53 (December): 675-683.
- Sioshansi, Ramteen, Paul Denholm, and Thomas Jenkin. 2011. "A comparative analysis of the value of pure and hybrid electricity storage." *Energy Economics*. 33, no. 1 (January): 56-66.
- . 2012. "Market and Policy Barriers to Deployment of Energy Storage." *Economics of Energy & Environmental Policy* 1, no. 2 (March): 47-64.
- Sioshansi, Ramteen, Paul Denholm, Thomas Jenkin, and Jurgen Weiss. 2009. "Estimating the value of electricity storage in PJM: Arbitrage and some welfare effects." *Energy Economics* 31, no. 2. (March): 269-277.
- Sioshansi, Ramteen, Seyed Hossein Madaeni, and Paul Denholm. 2014. "A Dynamic Programming Approach to Estimate the Capacity Value of Energy Storage." *IEEE Transactions on Power Systems* 29, no. 1 (January): 395-403.

- Smallbone, Andrew, Verena Jülch, Robin Wardle, and Anthony Paul Roskilly. 2017. "Levelised Cost of Storage for Pumped Heat Energy Storage in comparison with other energy storage technologies." *Energy Conversion and Management* 152 (November): 221-228.
- Sumper, Andreas. 2019. *Micro and Local Power Markets*. Wiley Online Library.
- Tan, Xiaoqi, Yuan Wu, and Danny H. K. Tsang. 2017. "A Stochastic Shortest Path Framework for Quantifying the Value and Lifetime of Battery Energy Storage under Dynamic Pricing." *IEEE Transactions on Smart Grid* 8, no. 2 (March): 769-778.
- Tang, Zhi Xuan, Yun Seng Lim, Stella Morris, Jia Liang Yi, Pdraig F. Lyons, and Phil C. Taylor. 2019. "A comprehensive work package for energy storage systems as a means of frequency regulation with increased penetration of photovoltaic systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 110 (September): 197-207.
- Tervo, Eric, Kenechi Agbim, Freddy DeAngelis, Jeffrey Hernandez, Hye Kyung Kim, and Adewale Odukomaiya. 2018. "An economic analysis of residential photovoltaic systems with lithium ion battery storage in the United States." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (October): 1057-1066.
- Tian, Man-Wen, Shu-Rong Yan, Xiao-Xiao Tian, Sayyad Nojavan, and Kittisak Jermsittiparsert. 2020. "Risk and profit-based bidding and offering strategies for pumped hydro storage in the energy market." *Journal of Cleaner Production* 256 (May): 120715.
- Tiemann, Paul Hendrik, Astrid Bensmann, Volker Stuke, and Richard Hanke-Rauschenbach. 2020. "Electrical energy storage for industrial grid fee reduction — A large scale analysis." *Energy Conversion and Management* 208 (March): 112539.
- Tómasson, Egill, Mohammad Reza Hesamzadeh, and Frank A. Wolak. 2020. "Optimal offer-bid strategy of an energy storage portfolio: A linear quasi-relaxation approach." *Applied Energy* 260 (February): 114251.
- Walawalkar, Rahul, Jay Apt, and Rick Mancini. 2007. "Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York." *Energy Policy* 35, no. 4 (April): 2558-2568.
- Wang, Zeyu, Ahlmahz Negash, and Daniel S. Kirschen. 2017. "Optimal scheduling of energy storage under forecast uncertainties." *IET Generation, Transmission & Distribution* 11, no. 17: 4220-4226.
- Wogrin, Sonja, and Dennice F. Gayme. 2015. "Optimizing Storage Siting, Sizing, and Technology Portfolios in Transmission-Constrained Networks." *IEEE Transactions on Power Systems* 30, no. 6 (November): 3304-3313.
- Zafirakis, Dimitrios, Konstantinos J. Chalvatzis, Giovanni Baiocchi, and Georgios Daskalakis. 2016. "The value of arbitrage for energy storage: Evidence from European electricity markets." *Applied Energy* 184 (December): 971-986.
- Zakeri, Behnam, and Sanna Syri. 2015. "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (February): 569-596.

سعة الكهرباء: أقصى معدل تفريغ ممكن يمكن استخلافه من البطارية ويقاس بوحدة الواط في الساعة.

كفاءة دورة الشحن والتفريغ: بسبب فقدان الشحن، لن تحافظ البطارية على الكهرباء التي توصل إليها. على سبيل المثال، الوحدة ذات كفاءة الشحن بنسبة 90% ستحتفظ بـ 90 كيلوواط في الساعة من 100 كيلوواط في الساعة. وبالمثل، توفر البطارية طاقة أقل مما تم تخزينه. إذا كانت نفس البطارية ذات كفاءة تفريغ تبلغ 90%، فإنها ستوفر 81 كيلو واط في الساعة من 90 كيلو واط في الساعة. يُعرف ناتج كفاءات الشحن والتفريغ (هنا 81%) باسم "كفاءة دورة الشحن والتفريغ".

التفريغ الذاتي: فقدان الطاقة المخزنة في البطارية بسبب الطبيعة الجوهرية للتقنية. يحدث هذا دون توصيل البطارية بالحمل.

حالة الشحن: المستوى الحالي لشحن البطارية. إذا تم تفريغ وحدة حجمها 200 كيلوواط في الساعة إلى 150 كيلوواط في الساعة، فإن حالة الشحن تكون 75%. (ملاحظة: هذا هو معكوس عمق التفريغ الذي سيكون 25%).

يلخص ما يلي المعاملات والخصائص التقنية المتعلقة بالتخزين، مرتبة أبجديًا.

التدهور السنوي: الانخفاض السنوي في كمية الطاقة التي يمكن للبطارية تخزينها.

معدل C: معدل تفريغ البطارية لسعتها القصوى. يعكس التصنيف الأساسي C1 التفريغ الكامل في ساعة واحدة. على سبيل المثال، بطارية 100 أمبير في الساعة (Ah)، بمعدل C1، ستفرغ 100 أمبير في ساعة واحدة. بمعدل C2، سيتم تفريغ 200 أمبير في 30 دقيقة، وهكذا.

العمر الدوري: عدد المرات التي يتم فيها شحن البطارية وتفريغها - أي الدورات - قبل أن تفسد أو لم تعد قادرة على تلبية المعايير المحددة.

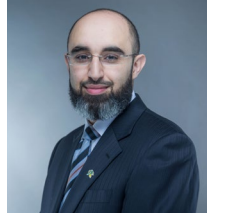
عمق التفريغ: النسبة المئوية للسعة المقدرة للبطارية التي تم تفريغها. على سبيل المثال، بطارية بسعة 100 كيلوواط في الساعة (kWh) تم تفريغها حتى 30 كيلو واط في الساعة قد تصل إلى عمق تفريغ يبلغ 70%.

سعة الطاقة: مقدار الطاقة المخزنة في البطارية، وتُقاس عمومًا بوحدة (أمبير في الساعة) أو (واط في الساعة).

حالة الشحن الأدنى المسموح بها: يمكن أن تتلف البطاريات إذا وصلت إلى حالة شحن منخفضة بدرجة كافية (عادةً أقل من 20%). لذلك يوصي المصنعون عمومًا بعدم تفريغ البطاريات أبدًا لأقل من حد معين يُعرف بحالة الشحن الأدنى المسموح بها (MSOC). يؤدي الالتزام بتوصيات حالة الشحن الأدنى المسموح بها إلى إطالة عمر البطارية.

نبذة عن الباحث

د. عمرو الشرفاء



زميل باحث في مركز الملك عبد الله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). يمتلك خبرة لأكثر من 15 عامًا في مجالات الطاقة والتكنولوجيا في ثلاث قارات. تكمن اهتماماته البحثية في سياسات الطاقة المتجددة، ونمذجة أنظمة الطاقة، وتصميم وتحسين الشبكات الصغيرة الهجينة. قام بقيادة وتنفيذ العديد من المبادرات الوطنية لنمذجة الطاقة على نطاق التوزيع والمرافق. كما قام بتأليف أكثر من 40 بحثًا، واخترع العديد من التقنيات الحاصلة على براءات اختراع. وهو حاصل على الدكتوراه في الهندسة الكهربائية بالإضافة إلى الماجستير في إدارة الأعمال في المالية.

نبذة عن المشروع

توفر هذه الدراسة مراجعة شاملة لكيفية حساب قيمة التخزين في الدراسات السابقة؛ لأن التقييم المناسب لأي تقنية أمر بالغ الأهمية لتنظيمها المناسب (الذي يضمن لاحقًا الربحية). فالقدرة على ربط القيمة النقدية بتقنيات التخزين تساعد المرافق ومشغلي النظام على التخطيط بشكل أفضل لمستقبل مزيج الطاقة الخاص بهم، وتساعد المستثمرين على حساب عوائد استثماراتهم بدقة أكبر. وفي ضوء ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى الإجابة عن سؤالين، هما: كيف تقوم الدراسات السابقة بربط القيمة النقدية بالخدمات المختلفة التي يوفرها التخزين؟ وما نقاط القوة والضعف في هذه الأساليب؟



www.kapsarc.org