

تحقيق أهداف الطاقة المتجددة دون المساومة على موثوقية قطاع الطاقة

نزار الحيدري، عمرو الشرفاء، فرانك فيلدر

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 2021 محفوظة لمركز الملك عبدالله للدراسات والبحوث البترولية (كابسارك). لا يجوز استخدام هذا المستند أو أي معلومات أو بيانات أو محتوى يتضمنه دون نسبته 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 معدّي الدراسة. ولا تعكس بالضرورة موقف المركز ووجهة نظره.

النقاط الرئيسية

بدون التدابير والتعديلات المناسبة، يمكن أن يؤدي استبدال نسبة قليلة تبلغ 5% من التوليد التقليدي بمصادر طاقة متجددة إلى تدهور كبير في موثوقية نظام الطاقة.

لتجنب أي اضطرابات، هناك حاجة إلى الاحتياطات التقليدية حتى في أنظمة الكهرباء التي تحتوي على ساعات كبيرة من الطاقة المتجددة. ولا يمكن أن يحقق التوليد بالطاقة المتجددة وحده أهداف الموثوقية اقتصادياً.

تعد حالات فشل التوليد التقليدية حساسة لدرجة الحرارة. وبالتالي، فإن النماذج التي تربط بين فشل التوليد ودرجة الحرارة توفر تقديرات أكثر واقعية لموثوقية النظام.

ترتبط درجة الحرارة ارتباطاً وثيقاً بكل من انخفاض التوليد من مصادر الطاقة المتجددة وزيادة الطلب. ويجب أخذ ذلك في الاعتبار في حالة المملكة العربية السعودية بسبب جوها الحار.

يعد فهم الارتباطات بين الطلب والتوليد بالطاقة المتجددة ودرجة الحرارة أمراً ضرورياً لتشغيل نظام الكهرباء بشكل موثوق والانتقال إلى مصادر الطاقة المتجددة. العلاقة المحددة بين هذه العوامل تختلف بشكل خاص لكل نظام كهرباء ويجب تحديدها كمياً لدراسة موثوقية نظام الكهرباء بدقة.

وجدنا أن هذه التحسينات في النموذج يمكن أن تؤثر بشكل كبير على مقاييس الموثوقية لنظام الكهرباء مع حصة عالية من الطاقة المتجددة. وبالتحديد، انتهينا إلى النتائج التالية:

تعمل محاكاة أعطال توربينات الرياح على زيادة احتمالية خسارة الحمل بنسبة 7.5%، مع تأثير ضئيل على الطاقة المتوقعة غير المخدومة.

يؤدي ضبط معدلات الانقطاع القسري بناءً على درجة الحرارة إلى زيادة احتمالية خسارة الحمل بنسبة 36% وتزيد الطاقة المتوقعة غير المخدومة بنسبة 5%.

عندما نجمع السيناريوهين، تزيد احتمالية خسارة الحمل بنسبة 60% وتزيد الطاقة المتوقعة غير المخدومة بنسبة 14%.

على وجه الخصوص، تؤثر درجات الحرارة المرتفعة على معدلات انقطاع التيار الكهربائي. ترتبط درجة الحرارة ارتباطًا وثيقًا بالطلب، كما أن الطاقة المولدة من مصادر الطاقة المتجددة متغيرة. تسلط هذه النتائج الضوء على الحاجة إلى الحفاظ على احتياطات تقليدية كافية بغض النظر عن أهداف الطاقة. وسيؤدي عدم القيام بذلك إلى التأثير بشدة على موثوقية نظام الكهرباء.

وضعت وزارة الطاقة في المملكة العربية السعودية أهدافًا طموحة للطاقة المتجددة. وعلى الرغم من أن مزيج الطاقة الحالي في المملكة تهيمن عليه الطاقة التقليدية (>95%)، إلا أنها تهدف إلى إنتاج 50% من الطاقة من مصادر متجددة بحلول عام 2030. تتمتع حاليًا المملكة بإمكانات عالية جدًا من الطاقة الشمسية الكهروضوئية، كما أنها في وضع جيد لتوليد الطاقة من الرياح. وبالتالي، فإن دراسة موثوقية أنظمة الطاقة المتجددة وتأثير تحويل التوليد التقليدي إلى طاقة متجددة تعد ذات أهمية كبيرة. ويعد هذا الأمر مهمًا لأن درجات الحرارة في المملكة غالبًا ما تكون مرتفعة أغلب العام.

في ضوء هذا السياق، نقترح تحسينات على النمذجة الاحتمالية لأنظمة الكهرباء ذات الحصة العالية من مصادر الطاقة المتجددة. على وجه التحديد، نقوم بنمذجة حالات توافر توربينات الرياح لتوقع توليد الكهرباء من مزارع الرياح وتعديل معدلات الانقطاع القسري (FORs) للمولدات بناءً على درجة الحرارة. نستخدم أيضًا نموذج كفاية الموارد لتقديم تحليل مفصل لتدفق الحمل. نقوم بتنفيذ هذه التحسينات باستخدام طريقة مونتي كارلو لحساب احتمالية خسارة الحمل (LOLP) ومقاييس الطاقة المتوقعة غير المخدومة (EUE). ونُبلغ عن تأثيرات هذه التحسينات على هذه المقاييس. يمكن استخدام طرقنا المقترحة لتوجيه مشغلي النظام بشكل أفضل للحفاظ على موثوقية النظام أثناء انتقالهم إلى مصادر الطاقة المتجددة.

الشمسية. فهي تحتل المرتبة السادسة عالمياً من حيث إمكانات الطاقة الشمسية، بمتوسط يبلغ 8.9 ساعة من أشعة الشمس في اليوم. ويبلغ متوسط إشعاعها الأفقي اليومي 5600 واط في الساعة لكل متر مربع. ومن حيث موارد الرياح، تحتل المرتبة 13 عالمياً، بمتوسط سرعة رياح ساحلية من 6 إلى 8 أمتار في الثانية (Saudi Arabia General Investment Authority 2018). وعلى الرغم من هذه الثروة من إمكانات الطاقة المتجددة، إلا أن مزيج الطاقة الحالي في المملكة يعد تقريباً تقليدياً بالكامل (أي أكثر من 99%). يعتمد على الغاز الطبيعي والسوائل لإنتاج الطاقة.

حددت المملكة مؤخرًا أهدافًا طموحة لتقليص استخدام الوقود السائل وتحقيق نظام كهرباء نصفه من الطاقة المتجددة بحلول عام 2030 (Saudi Press Agency 2021). ونظرًا لإمكانية تأثير مصادر الطاقة المتجددة على الموثوقية، يجب دراسة هذه الخطط بعناية لضمان عدم المساس بالموثوقية بنظام الكهرباء. من خلال تحليل نظام يشبه إلى حد كبير أهداف المملكة المقترحة، يمكننا توقع نقاط التحدي وتصميم أدوات متنسقة ودقيقة لتقييم موثوقيتها.

بالإضافة إلى ذلك، وفي السياق السعودي، من المهم الأخذ في الاعتبار دور درجة الحرارة في نظام الكهرباء. تستخدم المملكة معظم احتياجاتها من الكهرباء لتلبية الطلب على التكييف الذي يعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة. وتتأثر مصادر طاقة الرياح والطاقة الشمسية سلبًا بارتفاع درجات الحرارة، ويميل معدل فشل التوليد التقليدي إلى الزيادة مع ارتفاع درجة الحرارة أيضًا. لذلك فإن درجة الحرارة لها تأثير مركب على الموثوقية، لأنها تزيد من الطلب وتقلل من التوليد. وبالتالي، فإننا ندرج أيضًا درجة الحرارة وتأثيرها على الانقطاعات في تحليلنا. نهدف إلى تحديد تأثيرها على موثوقية أنظمة الكهرباء ذات حصص مصادر الطاقة المتجددة العالية.

تتزايد حصة مصادر الطاقة المتجددة (RES) في أنظمة الكهرباء بسرعة (Staffell and Pfenninger 2018). ومع ذلك، فإن بعض أنواع مصادر الطاقة المتجددة، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية الكهروضوئية، متقطعة وغير قادرة على توفير بعض الخدمات المساعدة الإضافية. وبالتالي، تتزايد أيضًا مخاوف الموثوقية (Bremen 2017; Engeland et al. 2017; Kroposki 2010). من المقبول على نطاق واسع أن أنظمة الكهرباء يمكن أن تستوعب عمومًا حصصًا صغيرة من مصادر الطاقة المتجددة مع تأثيرات ضئيلة على العمليات. نظرًا لأن حصة مصادر الطاقة المتجددة تصبح كبيرة (على سبيل المثال، أعلى من 50%)، فإن مرونة نظام الكهرباء واستقراره وموثوقيته تصبح مصدر قلق حقيقي (IEA 2017). لذلك تركز هذه الدراسة على موثوقية نظام الكهرباء، مع التركيز على الأنظمة التي يكون لها حصة كبيرة في مصادر الطاقة المتجددة.

لقياس موثوقية نظام الكهرباء، نأخذ في الاعتبار احتمالية خسارة الحمل (LOLP) والطاقة المتوقعة غير المخدومة (EUE). تعد هذه المقاييس من بين المؤشرات الأكثر استخدامًا لتقييم موثوقية نظام الكهرباء (Al-Shaalan 2019; Fazio and Hua 2019). نقوم بدمج تأثيرات عطل توربينات الرياح ودرجة الحرارة في حساباتنا لمؤشرات الموثوقية. يتيح لنا القيام بذلك تقييم موثوقية أنظمة الكهرباء ذات الحصص العالية جدًا من مصادر الطاقة المتجددة (أي أعلى من 50%) بشكل أفضل. ثم نقوم بتعزيز هذه النتائج بتحليل تدفق الحمل لتقييم مدى تأثير هذه التحسينات على مؤشرات الموثوقية. وبناءً على هذه التحسينات في النموذج، وجدنا أن مؤشرات الموثوقية قد تختلف بنسبة تصل إلى 35%.

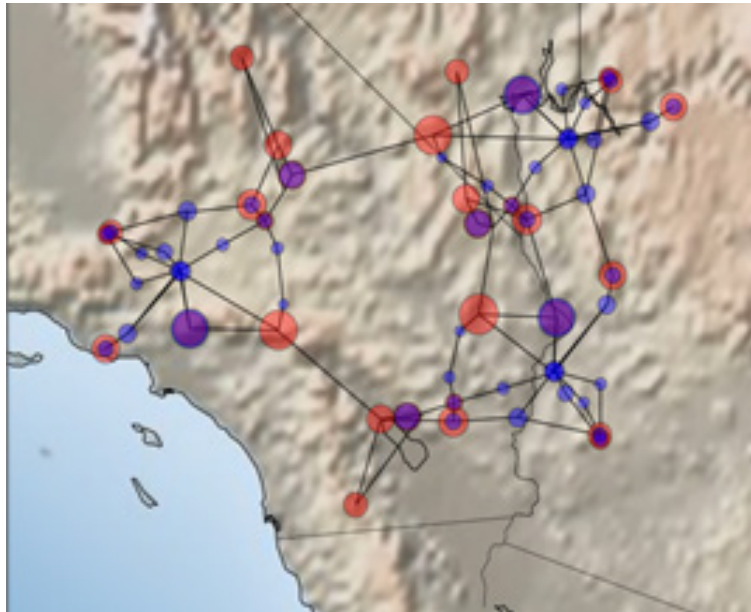
أ. السياق السعودي

تعد المملكة العربية السعودية في وضع جيد للغاية للاستفادة من مواردها من طاقة الرياح والطاقة

لفهم تأثيرات تحسينات النموذج بشكل أفضل على الموثوقية الأساسية للنظام، نأخذ في الاعتبار العديد من المقاييس في تحليلنا. نحدد احتمالية خسارة الحمل على أنها احتمال حدوث عجز واحد على الأقل في أي سنة معينة. يحدث العجز عندما يكون الطلب أعلى من التوليد لأي ساعة واحدة. لا تعكس احتمالية خسارة الحمل حجم أو مدة فقدان الحمل. وبالتالي، فإننا نستخدم أيضًا مقياسين آخرين : خسارة توقع الحمل (LOLE) وخسارة ساعات الحمل (LOLH). يتم تقديم هذه المقاييس بوحدات الأيام في السنة والساعات في السنة، على التوالي (North American Reliability Corporation 2018). أخيرًا، لقياس شدة خسارة الحمل، نستخدم الطاقة المتوقعة غير المخدومة، التي تعرف على أنها متوسط الطاقة غير المخدومة لكل عجز.

نستخدم اتحاد مختبرات تحديث شبكة نظام اختبار الموثوقية (RTS-GMLC) كنظام كهرباء نموذجي لتحليلنا (Barrows et al. 2020). يتميز هذا النظام بأسطول من التوليد الحديث مع العديد من مولدات الغاز الطبيعي وتوليد الطاقة المتجددة، والذي يشكل أكثر من 50% من التوليد التقليدي في النظام. يشتمل RTS-GMLC على 157 مولدًا موزعة على ثلاث مناطق بمزيج من التوليد التقليدي ومصادر الطاقة المتجددة. إذ إن سعة التوليد الإجمالية لـ RTS-GMLC تبلغ 14.5 جيجاواط (GW). ومن هذه السعة، تأتي 5.2 جيجاواط من مصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك 2.5 جيجاواط من الرياح و 2.7 جيجاواط من الموارد الشمسية.

الشكل 1. خريطة النقاط الخاصة بـ RTS-GMLC، تعرض موقعها في جنوب غرب الولايات المتحدة وعناصر النظام.



المصدر: (Barrows et al. (2020).

د. كفاية الموارد تساعد في التحليل التفصيلي لتدفق الحمل

يعد إجراء تحليل تدفق الحمل لنظام كهرباء كبير على مدار عام كامل أمرًا مكلفًا من الناحية الحسابية. سيؤدي تضمين هذا التحليل في محاكاة مونت كارلو (MC) التي نستخدمها إلى استنفاد الموارد الحسابية بشكل أكبر. على العكس من ذلك، يمكن تقييم نموذج كفاية الموارد في جزء صغير من الوقت المطلوب لتحليل تدفق الحمل الكامل. من خلال نموذجنا، يمكننا تحديد المعاملات التي تؤدي إلى أعلى المخاطر لفشل إمداد الحمل. بعد ذلك، نقوم بإجراء تحليلات تفصيلية لتدفق الحمل باستخدام حالات توفر التوليد من نموذج كفاية الموارد. نحفظ بهذه التحليلات التفصيلية للحالات التي تكون قريبة من العجز، والتي نطلق عليها أحداث "الارتباط الوثيق".

هـ. تأثير زيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة على الموثوقية

ندرس تأثير زيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة على موثوقية النظام. نقوم بنمذجة هذه الزيادة من خلال تقليل ساعات التوليد لجميع المولدات التقليدية في النظام بما يتناسب مع حصتها من التوليد. ونزيد في المقابل من ساعات التوليد لمصادر الطاقة المتجددة باستخدام طريقة مماثلة. وبالتالي، يمكننا دراسة تأثير استبدال التوليد التقليدي بمصادر الطاقة المتجددة. يمكننا أيضًا تقدير المستوى اللازم من مصادر الطاقة المتجددة لاستبدال كمية معينة من التوليد التقليدي للحفاظ على احتمالية خسارة الحمل ذاتها.

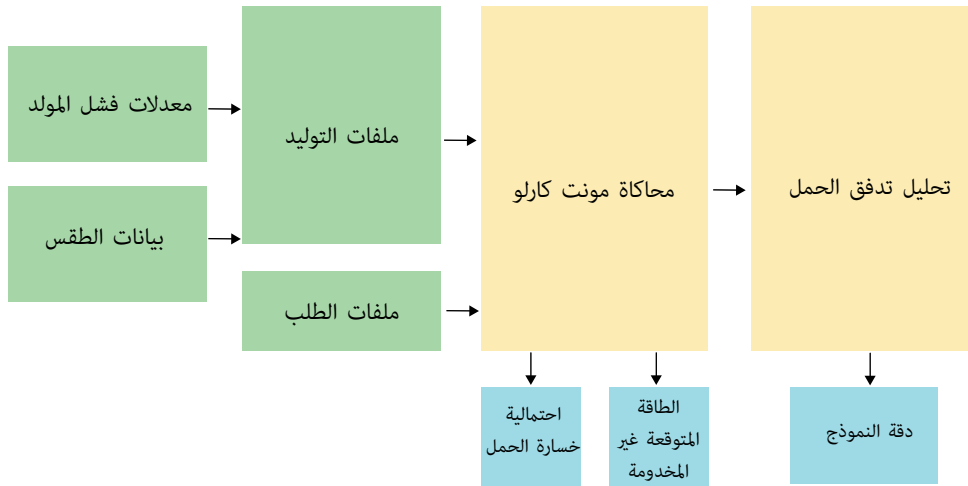
ب. التحسين 1: محاكاة حالات عطل توربينات الرياح

تتكون كل مزرعة رياح من العديد من توربينات الرياح، ولكل توربين معدل عطل لا يستهان به (Spinato et al. 2009). قمنا بنمذجة مزارع الرياح الأربع في RTS-GMLC كمجموعات من التوربينات الفردية، لكل منها معدل انقطاع قسري مستقل (FOR). نختار نموذج توربيني من المختبر الوطني للطاقة المتجددة (2020) ونأخذ بيانات سرعة الرياح من Draxl وآخرين (2015). وباستخدام هذه المدخلات، نقوم بإنشاء ملف توليد للرياح لعام 2020. ثم نقوم بمحاكاة حالات التوفر لكل توربين في مزارع الرياح الأربعة. يوفر تلخيص توليد التوربينات في كل مزرعة رياح إجمالي توليد مزرعة الرياح بالساعة.

ج. التحسين 2: معدل الانقطاع القسري المعدل بدرجة الحرارة

يرتبط فشل المولد بدرجة الحرارة (Murphy, Sowell, and Apt 2019). بالإضافة إلى ذلك، يعتمد كل من الطلب والتوليد بمصادر الطاقة المتجددة على درجة الحرارة (Felder 2004; Lledó; Staffell and Pfenninger 2018; et al. 2019). وبالتالي، يجب قياس تأثير درجة الحرارة على توفر المولد التقليدي لقياس تأثيرها الكلي على موثوقية النظام بشكل أفضل. والممارسة الشائعة في الصناعة هي استخدام تعديلات الشتاء والصيف (North American Reliability Corporation 2012). وفي المقابل، يستخدم Murphy و Sowell و Apt (2019) البيانات السابقة لانقطاع المولد لحساب معاملات ارتباط درجة الحرارة لأنواع مختلفة من المولدات. نقترح استخدام معاملات درجة الحرارة المحسوبة بشكل مماثل لتعديل معدلات الانقطاع القسري لوحدات المولد خلال المحاكاة.

الشكل 2. رسم تخطيطي لمنهجية النمذجة.



المصدر: المؤلفون.

أ. إعداد النمذجة

بالنسبة لملف الطلب الأساسي، فإن احتمالية خسارة الحمل وخسارة توقع الحمل وخسارة ساعات الحمل متساوية. في هذا الملف، يحدث فقدان الحمل في ساعة واحدة على الأكثر في كل سنة في المحاكاة. ومع زيادة الطلب، قد تحدث أحداث متعددة الساعات في غضون يوم واحد، وقد تحدث أحداث لمدة ساعة واحدة في أيام متعددة في سنة في المحاكاة. هدف الموثوقية القياسي لأي نظام هو خسارة واحدة للحمل كل 10 سنوات، أو خسارة توقع الحمل عددها 0.1 يوم في السنة. وبالتالي، تشير هذه النتائج إلى أن النظام كما تم تقييمه مجهز جيدًا في ملف الطلب الأساسي وفي جميع السيناريوهات. ومع ذلك، تظهر نتائج ملفات الطلب الأعلى حساسية النظام لتقلبات الطلب. يُظهر التحليل التفصيلي للنتائج أن الساعات التي يكون فيها الحد الأدنى من توليد الطاقة المتجددة أو عدم وجودها تؤدي في المقام الأول إلى حدوث هذا النقص الكبير في الأحداث.

يوضح الشكل 3 مصفوفة الارتباط لمزارع الرياح والطلب في مجموعة بيانات RTS-GMLC كخريطة حرارية. كما يتضمن الشكل بيانات درجة الحرارة السنوية النموذجية للأرصاد الجوية للموقع، تم الحصول عليها من Sengupta وآخرين (2018). تتماشى ساعات النقص مع زيادة الطلب في مجموعة البيانات، أي الساعات التي يكون فيها إنتاج الرياح منخفضًا ودرجات حرارة أعلى. ولهذا السبب، نجد تأثيرًا ضئيلًا على الطاقة المتوقعة غير المزدومة عند محاكاة حالات عطل توربينات الرياح.

في نموذجنا، نأخذ في الاعتبار أربعة سيناريوهات: السيناريو 1: الأساس، لا يمكن إجراء تحسينات. السيناريو 2: تمكين حالات عطل التوربينات. السيناريو 3: تمكين معدلات الانقطاع القسري المعدلة لدرجة الحرارة.

السيناريو 4: تمكين حالات عطل التوربينات ومعدلات الانقطاع القسري المعدلة لدرجة الحرارة.

نقوم بتشغيل جميع السيناريوهات لخمسة ملفات طلب منفصلة. يتم الحصول على ملف الطلب الأساسي من مجموعة بيانات السلسلة الزمنية RTS-GMLC. ونقوم أيضًا بإنشاء أربع ملفات تعريف أخرى للطلب لدراسة آثار زيادة أو انخفاض الأحمال على النظام. يتم إنشاء الملفات هذه عن طريق قياس الملف الأساسي بزيادات تبلغ 15%. حيث يوجد ملفان للطلب أقل من الأساسي، واثنان أعلى. ونستخدم ملفات الطلب ذاتها في كل سيناريو. نحسب مقاييس الموثوقية لكل سيناريو بعد العملية الموضحة مسبقًا.

ب. النتائج

يوضح الجدول 1 مقاييس الموثوقية للسيناريوهات الأربعة للملفات الأساسية و +15% من ملفات الطلب. لا يواجه النظام أي خسارة في أحداث الحمل في أي سيناريو إذا كان الطلب أقل من المستوى الأساسي. ترجع هذه النتيجة إلى التوفير العام المفرط لـ RTS-GMLC، كما ذكر Barrows وآخرون (2020). وجدنا أن محاكاة حالات عطل التوربينات تزيد من احتمالية خسارة الحمل بنسبة 7.5%. يؤدي تعديل درجة الحرارة إلى زيادة احتمالية خسارة الحمل بنسبة 36%، كما تعمل محاكاة عطل التوربينات وتعديل درجة الحرارة معًا على زيادة احتمالية خسارة الحمل بنسبة 62%.

الجدول 1. نتائج مقاييس الموثوقية

الطلب	السيناريو	احتمالية خسارة الحمل	خسارة توقع الحمل أيام/دسنة	خسارة ساعات الحمل ساعات/دسنة	الطاقة المتوقعة غير المخدمة ميجاواط في الساعة/ساعة
أساسي	أساسي	0.0017±0.0001	0.0017±0.0001	0.0017±0.0001	118.5392±5.3982
	توربين	0.0019±0.0001	0.0019±0.0001	0.0019±0.0001	119.6778±6.5306
	درجة الحرارة	0.0024±0.0001	0.0024±0.0001	0.0024±0.0001	124.468±4.5754
	توربين + درجة الحرارة	0.0027±0.0001	0.0027±0.0001	0.0027±0.0001	134.8118±6.3649
+15%	أساسي	0.8171±0.001	1.5799±0.0029	1.6637±0.0035	179.2337±0.3657
	توربين	0.8468±0.0011	1.7424±0.003	1.8382±0.0033	179.6649±0.2464
	درجة الحرارة	0.8618±0.001	1.8218±0.0037	1.9289±0.0044	183.6544±0.6048
	توربين + درجة الحرارة	0.886±0.0008	1.9994±0.0032	2.124±0.0035	183.788±0.3332

المصدر: المؤلفون

الشكل 3. خريطة الارتباط الحراري للطلب وموارد الرياح إلى جانب درجة الحرارة.

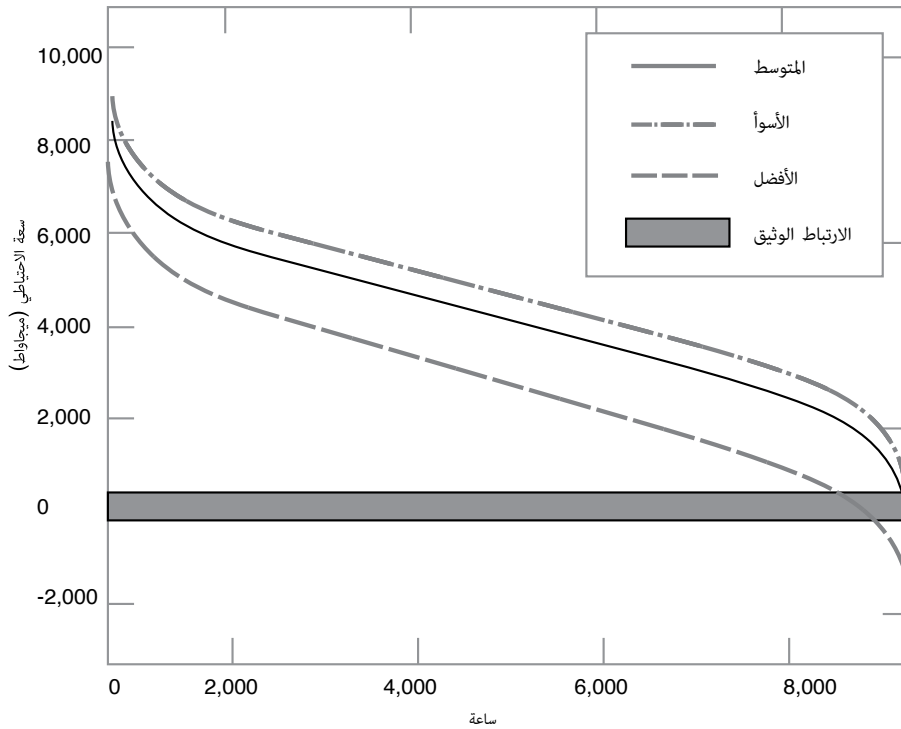
	309_WIND_1	317_WIND_1	303_WIND_1	122_WIND_1	Total Wind	Total Load	Temperature
309_WIND_1	1.00	0.72	0.75	0.64	0.82	-0.31	-0.25
317_WIND_1	0.72	1.00	0.61	0.87	0.93	-0.34	-0.31
303_WIND_1	0.753	0.61	1.00	0.59	0.83	-0.28	-0.22
122_WIND_1	0.64	0.87	0.59	1.00	0.91	-0.33	-0.31
Total Wind	0.82	0.93	0.83	0.91	1.0	-0.36	-0.31
Total Load	-0.31	-0.34	-0.28	-0.33	-0.36	1.00	0.50
Temperature	-0.25	-0.31	-0.22	-0.31	-0.31	0.50	1.00

المصدر: المؤلفون.

لمزيد من التحليل إلى تقليل وقت الحساب مع الاحتفاظ بمستوى عالٍ من الدقة. يمكن تعديل هامش الارتباط الوثيق ديناميكياً إما لتقليل وقت التشغيل أو زيادة دقة النتائج.

يوضح الشكل 4 توزيع الساعات حسب السعة الاحتياطية وكذلك الانقطاع لدينا للأحداث " الارتباط الوثيق ". تقع هذه الأحداث بين ما نعتبرها أحداث عجز وتلك التي نجدها أحداثاً آمنة بثقة عالية. يمكن أن يؤدي استخدام طريقة كفاية الموارد الأقل تقييداً لتحديد الظروف الإشكالية

الشكل 4. رسم بياني للسعة الاحتياطية بمتوسط ساعات احتياطية والسعات الاحتياطية في أسوأ وأفضل الحالات في كل ساعة في جميع عمليات محاكاة مونت كارلو والارتباط الوثيق.

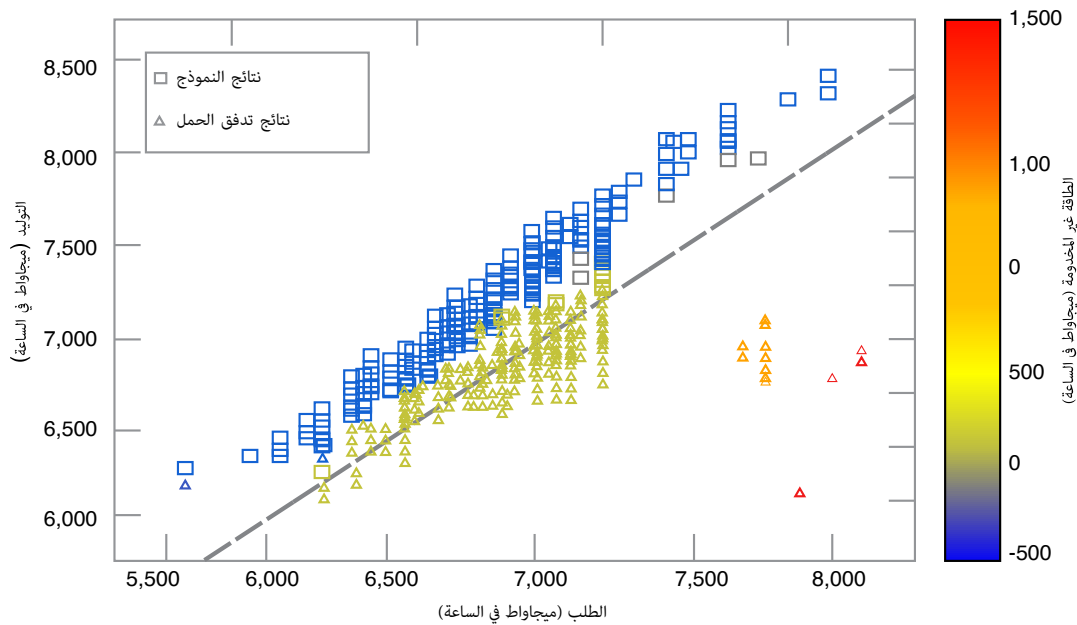


المصدر: المؤلفون.

توضح النتائج في الشكل 5. بالإضافة إلى ذلك، يقارن الجدول 2 الدقة عند هوامش الارتباط الوثيق للسيناريو الأساسي.

نجري تحليل تدفق الحمل لساعات الارتباط الوثيق هذه باستخدام أداة (Thurner et al. 2018) (pandapower).

الشكل 5. نتائج تحليل الارتباط الوثيق.



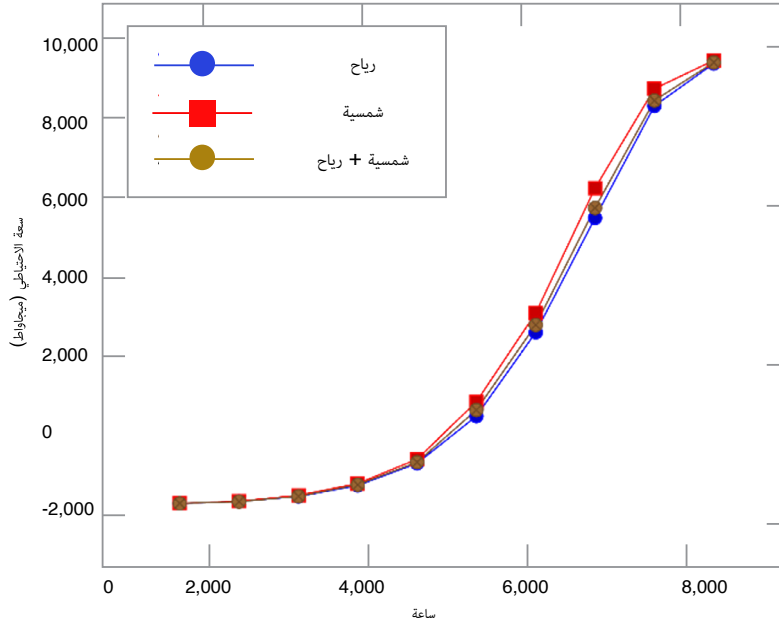
المصدر: المؤلفون.

الجدول 2. نتائج تحليل الارتباط الوثيق.

Margin (MWh)	Close Calls (Hours)	Load Flow Shortfalls (Hours)	Marginal Model Accuracy (%)	Cumulative Model Accuracy (%)
100	24	20	17.77	17.77
200	60	40	44.44	33.33
300	130	62	68.57	52.31
400	282	93	79.61	67
500	574	144	82.53	74.91

المصدر: المؤلفون.

الشكل 6. احتمالية خسارة الحمل لبيانات RTS-GMLC عندما يتم استبدال السعة التقليدية بشكل متزايد بالسعة المتجددة، مع بقاء السعة الإجمالية ثابتة.



المصدر: المؤلفون.

يوضح الشكل 6 تأثير زيادة نسبة مصادر الطاقة المتجددة مع الحفاظ على ثبات السعة الإجمالية المثبتة على احتمالية خسارة الحمل في بيانات RTS-GMLC. نقوم بزيادة سعة مصادر الطاقة المتجددة من مستواها الأولي بزيادات قدرها 1% من إجمالي السعة المثبتة. عندما نستبدل التوليد التقليدي بموارد الرياح، تتدهور موثوقية النظام بسرعة. تعد هذه النتيجة متوقعة بالنظر إلى عامل السعة الأقل لتوليد الرياح مقارنة بالمولدات التقليدية التي يحل محلها (Lledó et al. 2019).

يمكن استخدام هذه الطريقة أيضًا لنمذجة الأعطال عند درجات حرارة عالية للغاية في المملكة. إن تطبيق هذه الأساليب على المملكة يتطلب معرفة معاملات ارتباط درجة حرارة العطل. وتعد بيانات الانقطاع السابقة وبيانات درجة الحرارة السابقة المتاحة بسهولة ضرورية لحساب هذه المعاملات.

هناك مشكلة أخرى ظهرت أثناء هذه الدراسة وهي احتمال تسبب شبكات الإرسال في أحداث العجز. عند إدخال مصادر الطاقة المتجددة اللامركزية أو الموزعة، سيزداد الحمل على شبكات النقل المصممة حصريًا للتوليد التقليدي. ولذلك، تعد دراسات شبكة النقل والتحديات ضرورية أيضًا لفهم تأثيرات التحول إلى الطاقة المتجددة.

وأخيرًا، ستتضمن الدراسات المستقبلية تقييم الأسباب الشائعة لحالات العطل في موارد الرياح والعلاقة بين الرياح ومصادر الطاقة المتجددة الأخرى.

في هذه الدراسة، اقترحنا عدة تحسينات على نماذج موثوقية أنظمة الكهرباء لرصد تأثير مصادر الطاقة المتجددة. نجد أن محاكاة حالات عطل توربينات الرياح هي تحسين مفيد. يعد هذا الامتداد للنموذج ذا قيمة خاصة عندما تتدهور موثوقية التوربينات وتجميعاتها الفرعية، وهو ما يمكن أن يحدث مع مرور الوقت. في السيناريوهات الأساسية، تؤدي محاكاة حالات عطل التوربينات إلى زيادة احتمالية خسارة الحمل بنسبة 7.5%. يعد التأثير على الطاقة المتوقعة غير المخدومة أقل أهمية بسبب العوامل المتعلقة بالحرارة. يؤدي تعديل معدلات الانقطاع القسري للمولدات التقليدية إلى زيادة احتمالية خسارة الحمل بنسبة 36% والطاقة المتوقعة غير المخدومة بنسبة 5%.

يمكن استخدام طريقتنا لمحاكاة نطاقات درجات الحرارة التشغيلية. وبالتالي، يمكنها رصد سيناريوهات العطل الحالية، مثل انقطاع التيار الكهربائي في تكساس عام 2021 (Busby et al. 2021). يمكن زيادة معدلات الانقطاع القسري عندما تتجاوز درجات الحرارة الحدود الآمنة في حالة التوربينات غير المحمية من الطقس البارد. وبالتالي، يمكن تحديد معدلات العطل لنطاقات درجة حرارة معينة. يمكن أيضًا استخدام هذه الطريقة لمحاكاة معدلات العطل المختلفة الخاصة بالتوربينات إذا كان التباين في معدلات عطل المكونات معروفًا مسبقًا. يمكن التعامل مع حالات أخرى بالمثل، مثل تقنيات التوربينات المحدثة والنماذج الأحدث.

- Al-Shaalan, Abdullah. 2019. "Reliability Evaluation of Power Systems." In *Reliability and Maintenance: An Overview of Cases*, edited by Leo Kounis, 143–68. London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85571>.
- Barrows, Clayton, Aaron Bloom, Ali Ehlen, Jussi Ikäheimo, Jennie Jorgenson, Dheepak Krishnamurthy, Jessica Lau, Brendan McBennett, Matthew O'Connell, Eugene Preston, Andrea Staid, Gord Stephen, and Jean-Paul Watson. 2020. "The IEEE Reliability Test System: A Proposed 2019 Update." *IEEE Transactions on Power Systems* 35(1):119–27. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2925557>.
- Busby, Joshua W., Kyri Baker, Morgan D. Bazilian, Alex Q. Gilbert, Emily Grubert, Varun Rai, Joshua D. Rhodes, Sarang Shidore, Caitlin A. Smith, and Michael E. Webber. 2021. "Cascading Risks: Understanding the 2021 Winter Blackout in Texas." *Energy Research & Social Science* 77(July):102106. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102106>.
- Dao, Cuong, Behzad Kazemtabrizi, and Christopher Crabtree. 2019. "Wind Turbine Reliability Data Review and Impacts on Levelised Cost of Energy." *Wind Energy* 22(12):1848–71. <https://doi.org/10.1002/we.2404>.
- Draxl, Caroline, Andrew Clifton, Bri-Mathias Hodge, and Jim McCaa. 2015. "The Wind Integration National Dataset (WIND) Toolkit." *Applied Energy* 151(August):355–66. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.121>.
- Engeland, Kolbjørn, Marco Borga, Jean-Dominique Creutin, Baptiste François, Maria-Helena Ramos, and Jean-Philippe Vidal. 2017. "Space-Time Variability of Climate Variables and Intermittent Renewable Electricity Production – A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (November):600–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.046>.
- Fazio, John, and Daniel Hua. 2019. "Three Probabilistic Metrics for Adequacy Assessment of the Pacific Northwest Power System." *Electric Power Systems Research* 174 (September):105858. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.036>.
- Felder, Frank A. 2004. "Incorporating Resource Dynamics to Determine Generation Adequacy Levels in Restructured Bulk Power Systems." *KIEE International Transactions on Power Engineering* 4A(2):100–05. <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200411922336700.page>
- Grigg, Cliff, Peter Wong, Paul Albrecht, Ron Allan, Murty Bhavaraju, Roy Billinton, Quan Chen, Clement Fong, Suheil Haddad, Sastry Kuruganty, Wenyuan Li, Rana Mukerji, D. Patton, N. Rau, D. Reppen, Axel Schneider, Mohammad Shahidehpour, and Chanan Singh. 1999. "The IEEE Reliability Test System-1996. A Report Prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee." *IEEE Transactions on Power Systems* 14(3):1010–20. <https://doi.org/10.1109/59.780914>.
- Hahn, Berthold, Michael Durstewitz, and Kurt Rohrig. 2006. "Reliability of Wind Turbines: Experiences of 15 Years with 1,500 WTs." Fraunhofer IWES, January. https://www.researchgate.net/publication/46383070_Reliability_of_wind_turbines_Experiences_of_15_years_with_1500_WTs

- Harris, Charles R., K. Jarrod Millman, Stéfan J. van der Walt, Ralf Gommers, Pauli Virtanen, David Cournapeau, Eric Wieser, Julian Taylor, Sebastian Berg, Nathaniel J. Smith, Robert Kern, Matti Picus, Stephan Hoyer, Marten H. van Kerkwijk, Matthew Brett, Allan Haldane, Jaime Fernández del Río, Mark Wiebe, Pearu Peterson, Pierre Gérard-Marchant, Kevin Sheppard, Tyler Reddy, Warren Weckesser, Hameer Abbasi, Christoph Gohlke, and Travis E. Oliphant 2020. "Array Programming with NumPy." *Nature* 585(7825):357–62. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- International Energy Agency (IEA). 2017. *Getting Wind and Sun onto the Grid: A Manual for Policy Makers*. Paris: International Energy Agency. <https://apo.org.au/node/75535>.
- Jurasz, Jakub, F. A. Canales, Alexander Kies, Mohammed Guezgouz, and Alexandre Beluco. 2020. "A Review on the Complementarity of Renewable Energy Sources: Concept, Metrics, Application and Future Research Directions." *Solar Energy* 195 (January):703–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>.
- Kroposki, Benjamin. 2017. "Integrating High Levels of Variable Renewable Energy into Electric Power Systems." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 5(6):831–37. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0339-3>.
- Lledó, Llorenç, Verónica Torralba, Albert Soret, Jaume Ramon, and Francisco J. Doblas-Reyes. 2019. "Seasonal Forecasts of Wind Power Generation." *Renewable Energy* 143 (December):91–100. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.135>.
- Murphy, Sinnott, Fallaw Sowell, and Jay Apt. 2019. "A Time-Dependent Model of Generator Failures and Recoveries Captures Correlated Events and Quantifies Temperature Dependence." *Applied Energy* 253 (November):113513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113513>.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2020. "2020 Annual Technology Baseline: Land-Based Wind." <https://atb.nrel.gov/electricity/2021/index>
- North American Electric Reliability Corporation. 2013. "2012 Probabilistic Assessment: Methods and Assumptions." <https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/2012%20Probabilistic%20Assessment%20Methods%20and%20Assumptions%20-%20June%202013.pdf>.
- North American Electric Reliability Corporation. 2018. "Probabilistic Adequacy and Measures: Technical Reference Report." <https://www.nerc.com/comm/PC/Probabilistic%20Assessment%20Working%20Group%20PAWG%20%20Relat/Probabilistic%20Adequacy%20and%20Measures%20Report.pdf>.
- Preston, Eugene, and Clayton Barrows. 2018. "Evaluation Of Year 2020 IEEE RTS Generation Reliability Indices." In *2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PMAPS.2018.8440394>.
- Rondla, Preethi. 2012. "MonteCarlo and Analytical Methods for Forced Outage Rate Calculations of Peaking Units." Master's thesis, Texas A&M University. <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/148370>.

- Saudi Arabia General Investment Authority. 2018. "Invest Saudi: Renewable Energy." <https://investsaudi.sa/en/mediaCenter/downloadResource/resource-spring-2019>
- Saudi Press Agency (SPA). 2021. "Under the Patronage of HRH Crown Prince, HRH Minister of Energy Inaugurates the Sakaka IPP PV Project and Witnesses the Signing of PPA's for Seven New Projects." *Saudi Press Agency*, April 8. <https://www.spa.gov.sa/2212832>.
- Sengupta, Manajit, Yu Xie, Anthony Lopez, Aron Habte, Galen Maclaurin, and James Shelby. 2018. "The National Solar Radiation Data Base (NSRDB)." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89 (June):51–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>.
- Spinato, Fabio, Peter J. Tavner, Gerard van Bussel, and Emmanouil Koutoulakos. 2009. "Reliability of Wind Turbine Subassemblies" *IET Renewable Power Generation* 3 (December):387 – 401. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2008.0060>.
- Staffell, Iain, and Stefan Pfenninger. 2018. "The Increasing Impact of Weather on Electricity Supply and Demand." *Energy* 145 (February):65–78. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.051>.
- Thurner, Leon, Alexander Scheidler, Florian Schäfer, Jan-Hendrik Menke, Julian Dollichon, Friederike Meier, Steffen Meinecke, and Martin Braun. 2018. "Pandapower — An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems." *IEEE Transactions on Power Systems* 33(6):6510–21. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2829021>.
- Von Bremen, Lueder. 2010. "Large-Scale Variability of Weather Dependent Renewable Energy Sources." In *Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry*, edited by Alberto Troccoli, 189–206. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3692-6_13.
- Zhu, Caichao, and Yao Li. 2018. "Reliability Analysis of Wind Turbines." In *Stability Control and Reliability Performance of Wind Turbines*, edited by Kenneth Eloghene Okedu, 169–84. London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74859>.



نبذة عن المؤلفين

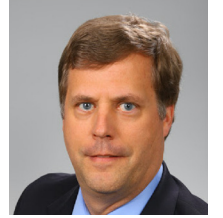
نزار الحيدري

مهندس حاصل على درجة البكالوريوس في الهندسة الكهربائية من جامعة الملك سعود. تدرب مع فريق تحويلات الطاقة والطاقة الكهربائية في كابسارك، حيث عمل على نمذجة نظام الكهرباء وتحليل الموثوقية الاحتمالية. تشمل خبرته السابقة نمذجة النظام الشمسي واستخدامه وبرمجة التحكم الدقيق.



فرانك فيلدر

مهندس ومحلل سياسات الطاقة ومدير برنامج تحويلات الطاقة والطاقة الكهربائية. عمل قبل انضمامه إلى كابسارك أستاذًا باحثًا في كلية التخطيط والسياسة العامة في جامعة روتجرز، ومديرًا لمعهد روتجرز للطاقة ومديرًا لمركز سياسة الطاقة والاقتصاد والبيئة. وخلال عمله في مختلف الأدوار، أجرى بحوثًا فريدة وتطبيقية. كانت مجالات بحثه في نمذجة أنظمة الطاقة الكهربائية، سياسات الطاقة النظيفة، تغير المناخ للمؤسسات الأكاديمية والهيئات الحكومية ومرافق الطاقة. كما عمل مستشارًا اقتصاديًا ومهندسًا نوويًا.



عمرو الدثرفاء

زميل باحث في كابسارك، مع ما يقارب 20 عامًا من الخبرة في مجالات الطاقة والتكنولوجيا في ثلاث قارات. ويهتم في أبحاثه بسياسات الطاقة المتجددة، ونمذجة نظم الطاقة، وتصميم وتحسين الشبكات الهجينة. وقد قاد ونفذ العديد من مبادرات النمذجة الوطنية على نطاق التوزيع والمولدات. ونشر أكثر من 40 ورقة وبحث علمي وسجل العديد من براءات الاختراع. وهو حاصل على درجة الدكتوراه في الهندسة الكهربائية، وعلى ماجستير إدارة الأعمال في التمويل.



نبذة عن المشروع

يحلل هذا المشروع تداعيات موثوقية نظام الكهرباء لتحويل جزء كبير من التوليد التقليدي إلى طاقة متجددة في قطاع الكهرباء السعودي. يأتي بحثنا هذا من تصريحات الحكومة السعودية الأخيرة بأن المملكة ستعتمد بشكل كامل على الغاز والطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء في المستقبل.



www.kapsarc.org