تقرير المبادئ التوجيهية بشأن قدرة شبكات الكهرباء الاستيعابية لإدراج إنتاج الطاقة المتجددة في الشبكات

الخدمات الاستشارية لتنفيذ الأطر التنظيمية/الفنية المنسَّقة والاستراتيجيات المجمَّعة بشأن الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي - والمحيط الهندي

مُعد لمشروع:

تعزيز السوق الإقليمية المستدامة للطاقة في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي - والمحيط الهندي (ESREM: EA-SA-IO)

مشروع ممول من الاتحاد الأوروبي

أعدته:

بالاشتراك مع

الرقم المرجعي لسي بي سي إس: CPCS Ref: 19479
June 15, 2022
20 مايو 2022
www.cpcs.ca

الخدمات الاستشارية لتنفيذ الأطر التنظيمية/الفنية المنسقة والاستراتيجيات المجمعة للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في منطقة شرق إفريقيا وجنوبي إفريقيا والمحيط الهندي

ستدعم هذه المهمة السوق المشتركة للشرق والجنوب الإفريقي (الكوميسا)، والجماعة الإنمائية شرق إفريقيا (الإياك)، والهيئة الحكومية الدولية المعنية بالتنمية (الإيقاد)، ومفوضية المحيط الهندي، والجماعة الإنمائية للجنوب الأفريقي (السادك)، في إطار الجهود الجماعية لتعزيز تطوير سوق إقليمي للطاقة المستدامة في منطقة شرق إفريقيا وجنوبي إفريقيا والمحيط الهندي.

تقرير المبادئ التوجيهية

يناقش هذا التقرير المعني بالمبادئ التوجيهية التحديات التي تواجه ازدياد عمليات إدراج الطاقات المتجددة المتغيرة في شبكات نقل الكهرباء في المنطقة، كما يلقي الضوء على الاستراتيجيات التي يمكن استخدامها لمجابهة هذه التحديات. ويطرح التقرير في النهاية توصيات مبنية على هذه الاستراتيجيات لصياغة سياسات ترمي لتعزيز قدرات شبكات الكهرباء في المنطقة على استيعاب الطاقات المتجددة منخفضة التكلفة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية.

الشكر والتقدير

يشكر فريق سي بي سي إيس (CPCS) العديد من أصحاب المصلحة الذين تمت استشارتهم، ولا سيما فريق مشروع تعزيز سوق الطاقة المستدامة الإقليمية.

الآراء والقيود

ما لم يذكر خلاف ذلك، فإن الآراء الواردة هنا هي آراء المؤلفين، ولا تعكس بالضرورة وجهات نظر الكوميسا، أو مجموعة دول شرق إفريقيا، أو الإيقاد، أو مفوضية المحيط الهندي، أو السادك.

تبذل سي بي سي إيس **جهودا مقصودة للتحقق من صحة البيانات التي تم الحصول عليها من جهات خارجية، ولكن لا تضمن سي بي سي إيس دقة جميع البيانات.**

تصريح الخصوصية

يحتوي هذا التقرير على مواد تعتبر حساسة أو سرية من الناحية التجارية. فلا يجوز مشاركة هذه الوثيقة مع أطراف ثالثة دون موافقة كتابية مسبقة من **مشروع تعزيز سوق الطاقة المستدامة الإقليمية.**

معلومات الاتصال

يمكن توجيه الأسئلة والتعليقات على هذا التقرير إلى:

مدير المشروع
Anirudh (Rudy) Gautama
Project Manager
E: agautama@cpcs.ca

صورة الغلاف وأدناه أقسام من لوحة جدارية بطول 40 قدما في مقر سي بي سي إيس في أوتاوا (كندا) رسمها فنان تورنتو مايك بارسونز. *Mike Parsons*

المحتويات

المصطلحات / الاختصارات **iv**

الملخص التنفيذي **v**

1 مقدمة **1-1**

2 إدراج الطاقة المتجددة المتغيرة في شبكات الكهرباء **2-1**

2.1 الهيكل الأساسي لشبكات الكهرباء 2-1

2.2 **جانب الطلب** 2-2

2.2.1 تصنيف الطلب 2-3

2.2.2 استجابة جانب الطلب 2-5

2.3 **جانب الإمداد** 2-6

2.4 **التخزين** 2-9

2.5 **النقل والتوزيع** 2-10

2.5.1 مغذيات الربط عبر الحدود 2-12

3 إدارة سعة شبكات الكهرباء بزيادة إدراج الطاقة المتجددة المتغيرة **3-14**

3.1 **تقييدات سعة الشبكات الفنية** 3-15

3.2 **موثوقية شبكات الكهرباء** 3-19

3.2.1 الكفاية 3-19

3.2.1 الأمان 3-21

3.3 **معايير التخطيط والتشغيل لسعات الشبكة** 3-22

4 الاعتبارات الخاصة بالدولة **3-3**

4.1 **تصنيف الدول في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي** 3-3

4.2 **أ: دول جزر المحيط الهندي** 3-5

4.3 **ب: استهلاك عالي للكهرباء المنتجة من الوقود الأحفوري** 3-7

4.4 **ج: الأنظمة متوسطة الحجم المستندة جزئياً إلى الطاقة المتجددة** 3-8

4.5 **د: النظم ذات الأحجام والاستهلاك المحدود، والمساهمة المحدودة للطاقة المتجددة** 3-9

5 المبادئ التوجيهية المنسقة **3-11**

5.1 **العنصر الرئيسي الأول: تنفيذ المتطلبات الوظيفية في أكواد شبكات النقل** 3-12

5.2 **العنصر الرئيسي الثاني: تنسيق جهود التخطيط** 3-13

5.3 **العنصر الرئيسي الثالث: تفعيل المرونة في جميع أجزاء النظام** 3-13

5.4 **العنصر الرئيسي الرابع: رقمنة ووضع نظام قرارات لقطاع الطاقة قائم على البيانات** 3-14

6 المراجع **3-16**

Appendix A البيانات التي تم استخدامها في تصنيف الدول **1**

جدول الأشكال التوضيحية

Figure 2-1: Schematic lay-out of traditional power system 2-1
Figure 2-2: Renewables-based, distributed power system 2-2
Figure 2-3: Electricity – final energy consumption in the EA-SA-IO Region 2-3
Figure 2-4: Schematic presentation of typical weekly profile of industrial demand 2-3
Figure 2-5: Schematic presentation of typical weekly profile of commercial & public demand 2-4
Figure 2-6: Schematic presentation of typical weekly profile of residential demand 2-4
Figure 2-7: Schematic presentation of typical weekly profile of agricultural demand 2-4
Figure 2-8 Schematic presentation of typical weekly profile of aggregated demand 2-5
Figure 2-9: Typical demand side response strategies 2-6
Figure 2-10: Gross production of electricity (TWh) per country in the EA-SA-IO Region 2015-2018 2-8
Figure 2-11: Installed generation capacity in EA-SA-IO-Region (2018) 2-9
Figure 2-12: The concept of virtual power lines - example for VRE implementation 2-10
Figure 2-13: Electricity Grid in the EA-SA-IO-Region (2019). 2-11
Figure 2-14: Existing, committed and proposed interconnectors in the EA-SA-IO region 2-13
Figure 3-1: Classification of Power System Reliability ..... **Error! Bookmark not defined.**
Figure 3-2: Power System Operations and Planning Concerns 3-22
Figure 4-1 Categorisation of EA-SA-IO Power Systems ..... **Error! Bookmark not defined.**

جدول الجداول

Table 2-1: Characterisation of power plants 2-7
Table 4-1: Sorting criteria for categorisation of power systems in the EA-IO-SA Region ... **Error! Bookmark not defined.**
Table 4-3: Issues for consideration in category A systems ..... **Error! Bookmark not defined.**
Table 4-4: Issues for consideration in category B systems ..... **Error! Bookmark not defined.**
Table 4-5: Issues for consideration in category C systems ..... **Error! Bookmark not defined.**
Table 4-6: Issues for consideration in category D systems ..... **Error! Bookmark not defined.**

المصطلحات / الاختصارات

AC	Alternating Current	التيار المتردد
ACEC	African clean energy corridor	الممر الإفريقي للطاقة النظيفة
AfDB	African Development Bank	البنك الإفريقي للتنمية
EAPP	Eastern African Power Pool	مجمع الطاقة للشرق الإفريقي
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program	برنامج دعم إدارة قطاع الطاقة
ESREM	Enhancement of a Sustainable Regional Energy Market	تعزيز السوق الإقليمية المستدامة للطاقة
GDP	Gross domestic product	الناتج المحلي الإجمالي
GW	Gigawatt (one billion watts)	جيجاوات(جيجا واط واحد = بليون واط)
HV	High Voltage	جهد أو توتر عالٍ
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	جمعية مهندسي الكهرباء والإلكترونيات
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	ترانزستور ثنائي القطب معزول البوابة
IRENA	International Renewable Energy Agency	الوكالة الدولية للطاقة المتجددة
kV	Kilovolt (one thousand volts)	كيلو فولط (يساوي ألف فولط)
kW	Kilowatt (one thousand watts)	كيلو واط (يساوي ألف واط)
LV	Low-voltage	جهد أو توتر منخفض
MV	Medium-voltage	جهد أو توتر متوسط
MW	Megawatt (one million watts)	ميجا واط (يساوي مليون واط)
PV	Photovoltaic	فوتوفولطي/ضوئي
RoCoF	Rate of Change of Frequency	معدل تغير التردد
SAPP	Southern African Power Pool	مجمع الطاقة للجنوب الإفريقي
TWh	Terrawatthour (one trillion watts for one hour)	تيراواط ساعة (تيراواط واحد = تريليون واط)
VRE	Variable Renewable Energy	الطاقة المتجددة المتغيرة

الملخص التنفيذي

تذخر منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي بقدر هائل من مصادر الطاقة المتجددة، إلا أن معظم بلدان المنطقة تعاني من تحديات مصادر الطاقة التي تتجلى في عدم كفاية البنى التحتية المشيدة وصغر نطاق تغطيتها. ويتوقع أن تستمر هذه التحديات في النمو نظراً لزيادة الطلب على الطاقة الناتج عن النمو الاقتصادي والسكاني. وعليه، هناك ضرورة ملحة لمعالجة الفقر الكهربائي المتمثل في صعوبة الحصول على إمداد الكهرباء والاعتماد على الوقود التقليدي مثل الفحم. إلى جانب ذلك، تؤدي تحديات الإمداد الكهربائي إلى رفع تكلفة أداء الأعمال ما يضعف قدرة المنطقة التنافسية في الأسواق الداخلية والخارجية.

ويجري العمل تحت مظلة مشروع تعزيز السوق الإقليمية للطاقة في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي - والمحيط الهندي في المنطقة على إقامة برامج تعنى بصياغة الأطر التنظيمية/الفنية المنسَّقة والبرامج المجمَّعة بشأن الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في المنطقة. ويتوقع أن تؤدي نتائج هذا المشروع بعد اعتماده، إلى حفز التكامل الإقليمي وتجارة الطاقة والاستثمار في أسواق الطاقة على امتداد المنطقة.

هذا التقرير الذي يضم مبادئ توجيهية يتناول مكوناً مهماً من مكونات المشروع وهو *مراجعة أوجه القصور الفنية التي تحد من تحقيق درجة عالية من اندراج الطاقات المتجددة في منظومة الطاقة وطرح استراتيجيات ذات صلة لمعالجة أوجه القصور وتقييم القدرات الاستيعابية للشبكات*. يعمد هذا التقرير لتزويد القارئ بنبذة تعريفية عن الجوانب المختلفة المتعلقة بمصادر توليد الكهرباء وأنواع الطلب على الكهرباء بالإضافة إلى أوجه القصور الفنية التي تمثل تحديات لنقل الطاقة عبر شبكات النقل والظواهر المادية التي تشكل تحديات تعيق قدرات شبكات النقل من الناحية الفنية. وتهدف هذه الورقة كذلك للنظر في المسائل المذكورة في سياق منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي وذلك بعرض أمثلة واقعية للمتطلبات القدرات ذات الصلة في نظم كهرباء مختارة تمثل المنطقة. تعتبر القدرة الاستيعابية لشبكات نقل الكهرباء عنصراً أساسياً هاماً من حيث الاستفادة من إمكانات الطاقة المتجددة والتحول نحو الطاقة الخضراء وتطوير نظم الكهرباء في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي.

يمكن تعريف القدر الاستيعابية لشبكة نقل الكهرباء بأنها قدر الشبكة على استيعاب ونقل الكهرباء وتوفير إمدادها بصورة مستمرة دون انقطاع. وهذه القدرة الاستيعابية تتأثر بالعديد من صفات وخصائص شبكة نقل الكهرباء كما أنها لا تقتصر على قدرة نقل وتوزيع الكهرباء في الشبكة، بل تشمل المتطلبات التشغيلية لجانب العرض (والطلب) كذلك.

تؤدي زيادة إدراج مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة إلى جعل نظم الكهرباء أكثر تعقيداً وتضعف قابلية التنبؤ بشأنها كما تضفي عليها الميل نحو التوزيعية، ويعم تأثير ذلك كل أجزاء ومكونات نظم الكهرباء من ألواح الطاقة الشمسية على أسطح المباني في مناطق الجهد المنخفض، إلى محطات توليد الكهرباء من طاقة الرياح ذات السعة العالية الموصلة مع خطوط الجهد العالي في شبكات النقل. ومع استمرار انخفاض تكلفة إدراج طاقة الرياح والطاقة الشمسية في مزيج مصادر الكهرباء، يتوقع أن يكون لمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة نصيباً متزايداً في منظومة الطاقة المتجددة في المنطقة ما يعني أن تدابير المرونة والقدرة على التحكم في نظم الكهرباء تصبح أكثر أهمية من حيث ضمان التشغيل الآمن الموثوق لشبكات الكهرباء في المستقبل.

يعرض هذا التقرير تحليلات للآثار المترتبة على ازدياد حصة مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة ويطرح مقترحات مناسبة لمعالجتها. وقد اختار التقرير لهذه التحليلات أربعة نظم عامة للكهرباء تمثل أربع فئات يمكن أن تندرج تحتها دول منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي وذلك كما يلي:

1. الدول الجزرية
2. نظم الكهرباء المتطورة المعتمدة على الوقود الأحفوري.
3. نظم الكهرباء المتطورة نوعاً ما وتعتمد جزئياً على الطاقة المتجددة.
4. النظم محدودة الحجم

تتباين هذه الفئات الأربعة في مستويات الاستهلاك ونسبة استخدام مصادر الطاقة المتجددة والتدابير المنظورة، ولكنها بالرغم من ذلك تشترك جميعها في حاجتها للمرونة والتخطيط الاستباقي لضمان قدراتها على النقل. وبناءً عليه، فالمبادئ التوجيهية المنسقة الواردة في الباب الخامس تطرح الاقتراحات التالية:

- ينبغي أن يخضع التوليد الجديد للمتطلبات الوظيفية بدلاً عن المواصفات الفنية
- يجب أن تكون جهود التخطيط منسقة – وذلك في قطاع الطاقة ولكل القطاعات ذات الصلة التي تستخدم الطاقة الكهربائية
- يجب إدراج الحلول المرنة في أجزاء النظام
  - يمكن لمغذيات الربط البني وممرات النقل الهامة الداخلية أن تفسح المجال للاستفادة القصوى من إمكانات الطاقة المتجددة في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي وينبغي السعي في ذلك.
- ينبغي السعي نحو رقمنة القرارات وبناءها على البيانات.

1 مقدمة

تضطلع كل من الكوميسا والإياك والسادك والايقاد ولجنة المحيط الهندي بدور قيادي مشترك لتنفيذ مشروع تعزيز السوق الإقليمية المستدامة للطاقة في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي وهو مشروع يموله الاتحاد الأوروبي.

ويتمثل الهدف الرئيسي للمشروع في الإسهام في استدامة سوق الطاقة الإقليمي لمنطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي[1]، سعياً لتعزيز مناخ ملائم للاستثمار وتشجيع التنمية المستدامة وهو ما يجعل المشروع متسقاً مع الأجندة 2063 للاتحاد الإفريقي والأجندة 2030 للأمم المتحدة ويسهم بصفة رئيسية في تحقيق هدف التنمية المستدامة رقم 7 بقوة متصاعدة حيث الهدف 7 يرمي لضمان قدرة الجميع الحصول على مصدرٍ حديثٍ للطاقة مستدامٍ وموثوق بتكلفة معقولة. كذلك، يعزز المشروع التقدم في تحقيق كل من أهداف الألفية الإنمائية التالية، الهدف 5 (تحقيق المساواة بين النوعين وتمكين كل النساء والبنات) والهدف 9 (بناء بنى تحتية متينة وتشجيع التصنيع المستدام العميم ودعم الابتكار) والهدف 12 (السعي لضمان نماذج الانتاج والاستهلاك المستدامة)

تذخر منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي بقدر هائل من مصادر الطاقة المتجددة، إلا أن معظم بلدان المنطقة تعاني من تحديات مصادر الطاقة التي تتجلى في عدم كفاية البنى التحتية المشيدة وصغر نطاق تغطيتها. ويتوقع أن تستمر هذه التحديات في النمو نظراً لزيادة الطلب على الطاقة الناتج عن النمو الاقتصادي والسكاني. وعليه، هناك ضرورة ملحة لمعالجة الفقر الكهربائي المتمثل في صعوبة الحصول على إمداد الكهرباء والاعتماد على الوقود التقليدي مثل الفحم. إلى جانب ذلك، تؤدي تحديات الإمداد الكهربائي إلى رفع تكلفة أداء الأعمال ما يضعف قدرة المنطقة التنافسية في الأسواق الداخلية والخارجية

ويجري العمل تحت مظلة مشروع تعزيز السوق الإقليمية للطاقة في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي - والمحيط الهندي في المنطقة على إقامة برامج تعنى بصياغة الأطر التنظيمية/الفنية المنسَّقة والبرامج المجمَّعة بشأن الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في المنطقة. ويتوقع أن تؤدي نتائج هذا المشروع بعد اعتماده، إلى حفز التكامل الإقليمي وتجارة الطاقة والاستثمار في أسواق الطاقة على امتداد المنطقة.

انخفضت أسعار الطاقة المتجددة المتغير بدرجة كبيرة في السنوات العشرة الماضية ما جعل تطوير هذه التكنولوجيات على نطاق واسع هو الخيار الأكثر استدامة وليس ذلك فحسب، بل هو أيضاً أفضل الخيارات اقتصادياً لتوفير الطاقة اللازمة للتنمية في إفريقيا. ويجدر بالذكر أن أهم مفاتيح هذا التطور هو قيام شبكات كهرباء حديثة جيدة التصميم قادرة على نقل الكهرباء بصورة موثوقة وفعالة من مواقع توليدها إلى مناطق استهلاكها.

وعلى ضوء ما سبق ينشر مشروع تعزيز السوق الإقليمية المستدامة للطاقة هذا التقرير ويهدف من نشره إلى ما يلي:

1) يتيح التقرير للقارئ فرصة فهم الخصائص المختلفة للمصادر المختلفة لتوليد الطاقة الكهربائية وأنواع الطلب عليها بالإضافة للظواهر الطبيعية الخصائص الفنية التي تضع قيوداً على قدرات شبكات الكهرباء.
2) مد القارئ بنبذة عن هياكل شبكات الكهرباء في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي مع أمثلة واقعية لمتطلبات القدرات ذات الصلة بمختلف أنواع الشبكات.

[1] يغطي نطاق المشروع 29 دولة هي: أنجولا وبتسوانا وبوروندي وجزر القمر وجمهورية الكونغو الديمقراطية ومصر وإرتريا وإسواتيني وإثيوبيا وكينيا وليسوتو وليبيا ومدغشقر وملاوي وموريشيوس وموزمبيق وناميبيا ورواندا وسيشل والصومال وجنوب إفريقيا وجنوب السودان والسودان وتنزانيا وتونس وأوغندا وزامبيا وزيمبابوي.

3) يمد القارئ بنبذة تعريفية عن المبادئ المتعلقة بقدرات الشبكات وتطبيقها على الشبكات المختارة كأمثلة للشبكات القائمة في المنطقة المشار إليها في النقطة (2) أعلاه.
4) طرح اقتراح بمبادئ توجيهية منسقة لمتطلبات القدرات الاستيعابية للشبكات وإدراج التوليد من مصادر الطاقة المتجددة وتكامله مع الشبكة وذلك في سياق المواضيع المطروحة في هذا التقرير.

إخلاء مسؤولية: **كان التصور الأولي أن تضم هذه الورقة تقييماً للقدرات الاستيعابية لشبكات الكهرباء لأربع دول من الدول الأعضاء في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي، نسبة لعدم توفر المعلومات المطلوبة لمثل هذه الدراسات التقييمية فقد تقرر اتخاذ منهجية مختلفة حيث تم اختيار أمثلة عامة لنظم شبكات تشتمل على خصائص ذات صلة بخصائص النظم القائمة في الدول الأعضاء. ورغم أنه ليس بين أمثلة الشبكات العامة المختارة شبكة متطابقة تماماً مع أي من شبكات الدول الأعضاء إلا أن هذا المنهج قد يتضح أنه الأنسب لعدد كبير من الدول الأعضاء مقارنةً بتصميم نموذج مبني على بيانات متينة، ولكنها تمثل عدداً قليلاً من الدول الأعضاء.**

2 إدراج الطاقة المتجددة المتغيرة في شبكات الكهرباء

لمحات رئيسية مختصرة للفصل

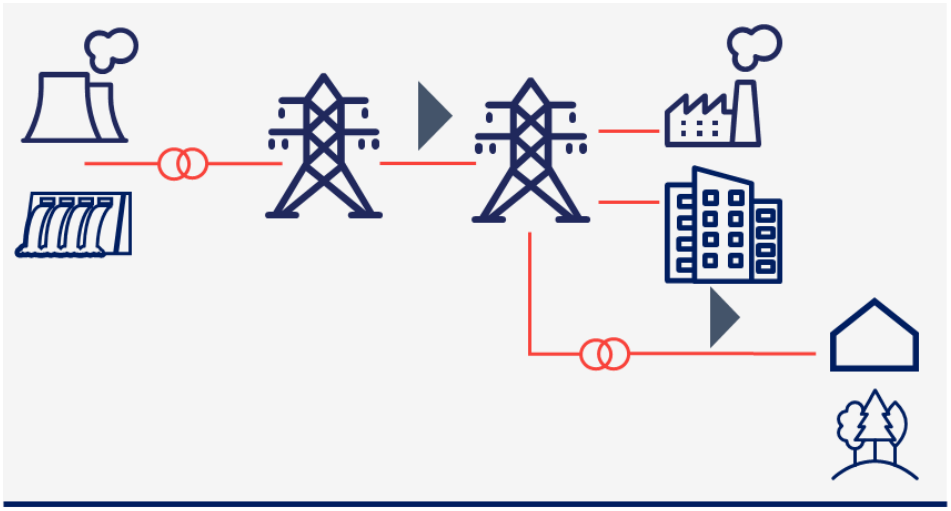
- يؤدي التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة إلى جعل نظم الكهرباء أكثر تعقيداً ويضعف قابلية التنبؤ بشأنها كما يضفي عليها الميل نحو التوزيعية.
- إن السعي لضمان التشغيل الآمن الموثوق لشبكات الكهرباء في ظل هذه التحديات يجعل اتخاذ تدابير لتعزيز المرونة والقدرة على التحكم في نظم الكهرباء أمراً بالغ الأهمية .
- يعم تأثير الطاقة المتجددة المتغيرة كل أجزاء ومكونات نظم الكهرباء من ألواح الطاقة الشمسية على أسطح المباني في مناطق الجهد المنخفض، إلى محطات توليد الكهرباء من طاقة الرياح ذات السعة العالية الموصلة مع خطوط الجهد العالي في شبكات النقل.

تتكون نظم الكهرباء من تكوينات من العناصر الكهربائية الموصلة مع بعضها بغرض توفير إمدادات الطاقة الكهربائية ونقلها وتوزيعها واستخدامها، حيث أنه وراء كل مقبس في منزل أو متجر أو مصنع موصل بشبكة كهرباء توجد شبكة ضخمة من الكوابل والمحولات والمعدات الأخرى التي تقوم بنقل الطاقة الكهربائية المولدة في مختلف محطات توليد الكهرباء ذات الخصائص المتنوعة وتوصلها إلى حيث توجد الحاجة إليها وذلك في أي وقت من الأوقات.

2.1 الهيكل الأساسي لشبكات الكهرباء

كثيراً ما يشار لشبكات الكهرباء المترابطة على أنها أكبر الماكينات على وجه الأرض وأكثرها تعقيداً، إلا أن الهيكل الأساسي لنظم الكهرباء التقليدية يمكن شرحه تصويرياً على المستوى العام كما بالشكل أدناه:

الشكل 2-1: رسم تخطيطي لنظم الكهرباء التقليدية

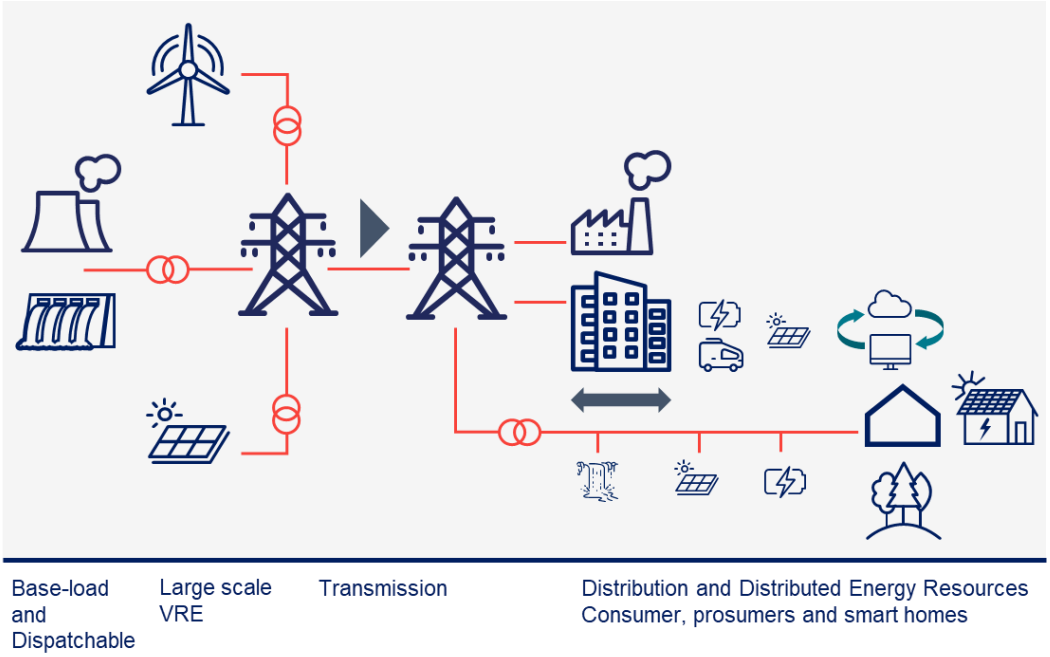


المصدر: الاستشاري

تقليدياً، تشيد محطات التوليد الحرارية ذات السعات العالية قريباً من مراكز الأحمال العالية بينما مواقع المحطات الكهرومائية ذات السعات التخزينية تتقيد جغرافياً ما يجعلها غالباً بعيدة عن مراكز الأحمال العالية. ولكن في كلا الحالتين يكون تدفق الكهرباء عادة في اتجاه واحد (أي من محطة التوليد إلى مراكز الأحمال)

أما التوجهات في نظم الكهرباء الحديثة فتميل نحو المزيد من التعقيد كما يوضح الشكل 2- .

الشكل 2-2: شبكة كهرباء موزعة معتمدة على الطاقة المتجددة



المصدر: الاستشاري

أدى بزوغ عهد التوليد الموزع مثل استخدام ألواح الطاقة الشمسية على أسطح المنازل إلى ابتداع تعبير المنتج-المستهلك (*prosumer*)[2] فاستخدام الكهرباء بصورة متزايدة في النقل والعدادات الذكية والرقمنة كلها تشير إلى أن نظم الطاقة الكهربائية تواجه تفاعلاً غير مسبوق من قبل المستهلك.

تتسم عمليات تشغيل شبكات الكهرباء بأنها عمليات توازن. ويجب من أجل المحافظة على موثوقية واستقرار شبكة الطاقة الكهربائية أن تكون الطاقة الكهربائية التي تغذي الشبكة مساوية للطاقة الكهربائية المستهلكة بواسطة الأحمال (بالإضافة للفاقد) في كل الأوقات. وفي ظل تزايد التوليد الموزع وزيادة التوليد من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح يصبح تكيف جانب الطلب وأنماط التشغيل مع هذه التغييرات ضرورياً.

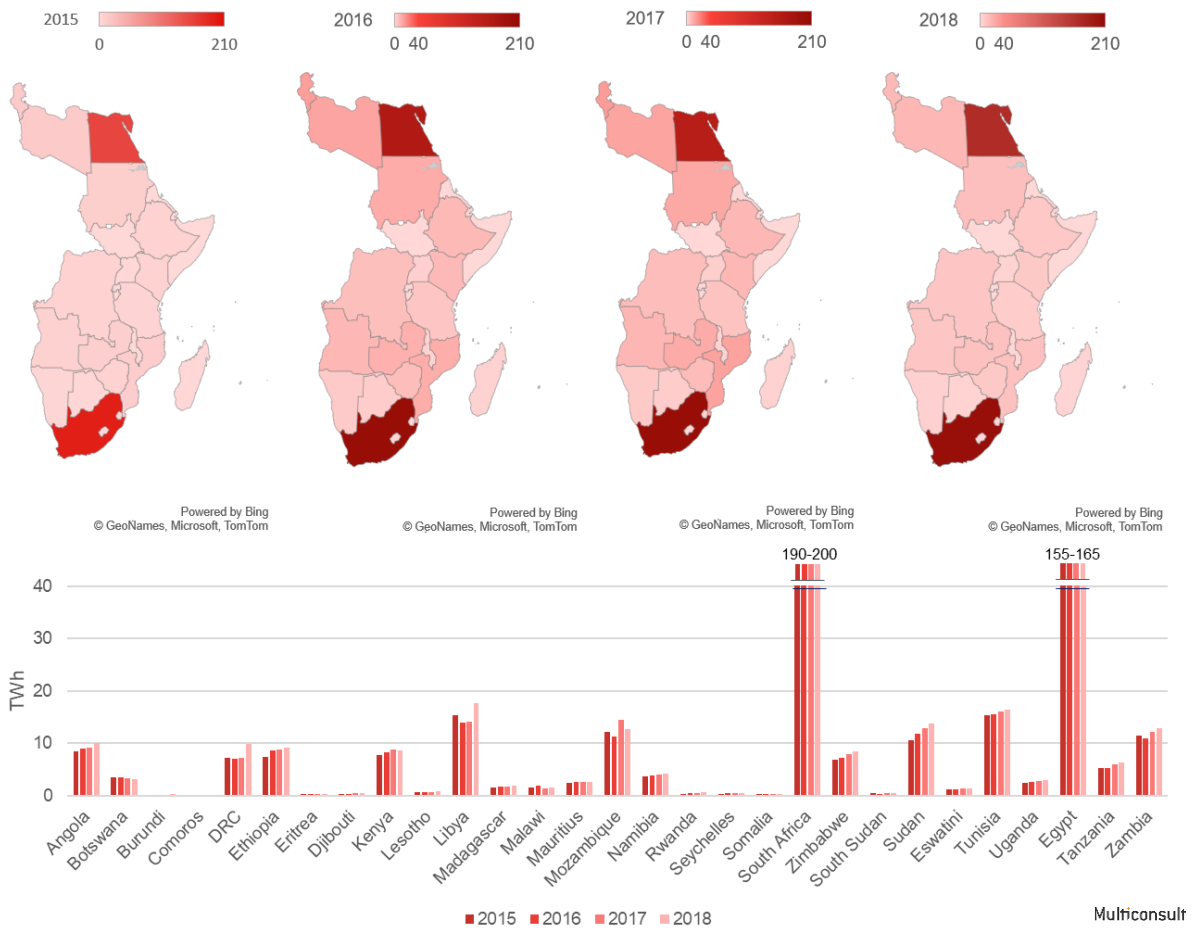
2.2 جانب الطلب

الطلب على الكهرباء الذي يشار إليه عادة بالأحمال يتمثل في كم هائل من المستهلكين ذوي الاحتياجات المختلفة للكهرباء في أي وقت من الزمان.

ارتفع استهلاك الطاقة الكهربائية الكلي في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي بنسبة تسعة بالمائة من 476 تيرا واط ساعة في 2015 إلى 519 تيرا واط ساعة في 2018 (وحدة الإحصاء بالأمم المتحدة، 2021) ويذكر نفس المصدر أن الطلب الإجمالي على الكهرباء (شاملاً الطاقة المفقودة افتراضاً) 612 تيرا واط ساعة (وحدة الإحصاء بالأمم المتحدة، 2021) وقد بلغ إجمالي الطلب على الطاقة الكهربائية في الدول الجزرية (جزر القمر وموريشيوس ومدغشقر وسيشل) 5 تيرا واط ساعة في 2018 بينما استأثرت مصر وجنوب إفريقيا بأكثر من 70 % من الطلب على الكهرباء، أي 371 تيرا واط ساعة.

[2] المنتج المستهلك ينتج ويستهلك – وفي نظم شبكات الكهرباء يشير ذلك لشخص ينتج الطاقة وأيضاً يستهلكها. وهذا المصطلح لا يطلق على مرافق إنتاج الكهرباء التي لها خدمة استهلاك ذاتية لبعض النظم المساعدة، ولكن يشير المصطلح لمستهلكي الكهرباء الاعتياديين الذين ينتجون الكهرباء وقد لا يكون الإنتاج هدفاً رئيسياً.

الشكل 2-3: الكهرباء - استهلاك الكهرباء الكلي في منطقة الشرق الإفريقي – والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي



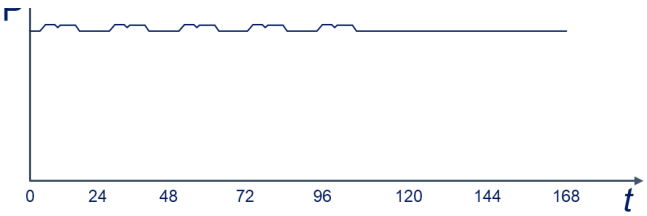
المصدر: وحدة الإحصاء بالأمم المتحدة

ويتضح من التوقعات بحسب الخطتين الرئيسيتين لمجمعي الطاقة للشرق والجنوب الإفريقي على التوالي أن نمو استهلاك الكهرباء سيستمر في الارتفاع وذلك من حيث ذروة الأحمال (ميقا واط) والطلب (تيرا واط ساعة) وتتأثر هذه التوقعات جزئياً بتقلص الطلب نسبة لقصور السعة المركّبة فعلياً وضعف اعتمادية الإمداد.

2.2.1 تصنيف الطلب

تتباين بروفيلات الطلب ومنحنيات الأحمال بحسب مجموعات المستهلكين وفي هذا القسم من التقرير تعرض تصنيفات الطلب على المستوى غير الفني الذي يقسم المستهلكين إلى مجموعة المستهلكين الصناعيين عاليي الاستهلاك، والخدمات التجارية والعامة، والمناطق السكنية، وأعمال الزراعة. كذلك يوصف في هذا القسم باختصار طلب خدمات النقل على الكهرباء.

الشكل 2-4: رسم تخطيطي يوضح البروفيل الأسبوعي المعتاد لطلب المستهلكين الصناعيين على الكهرباء



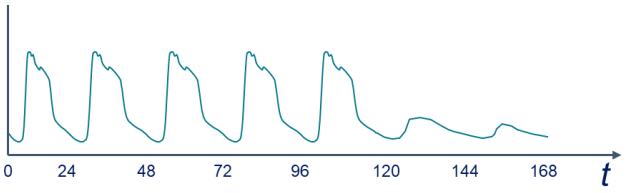
الصناعة

يتصف منحنى الأحمال الطبيعي للمستهلكين الصناعيين في شبكات الكهرباء الكبيرة بالاستهلاك الكثيف للطاقة بعمليات تشغيل تستمر على مدار اليوم، ولكن الصناعات التحويلية وغيرها من الصناعات التي تعمل بدوام نهاري تسبب تباينات بين أحمال النهار وأحمال الليل وفي أيام الأسبوع. وبالرغم من ذلك يكون منحنى الأحمال لمناطق الاستهلاك الصناعي الضخم مسطحاً تقريباً مع تباينات طفيفة خلال اليوم أو الأسبوع أو السنة.

الخدمات التجارية والعامة

تشمل الخدمات العامة والتجارية المرافق الحكومية، والمتاجر والفنادق وغيرها. في هذا القطاع يشتمل استهلاك الكهرباء بصورة رئيسية على الإضاءة والتدفئة، والتهوية وتكييف الهواء، والأجهزة الكهربائية والإلكترونية.

الشكل 2-5: رسم تخطيطي يوضح بروفيل الطلب الأسبوعي المعتاد على الكهرباء من قطاع الخدمات التجارية والعامة

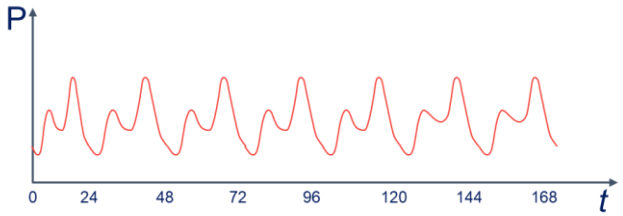


ويتبع منحنى الأحمال لهذا القطاع من المستهلكين ساعات العمل الرسمية حيث يشاهد ارتفاع سريع في الأحمال في الصباح ويظهر تسطح في المنحنى في فترة النهار مع انخفاض سريع لفترة الغداء كما يتسم المنحنى بالانخفاض في ساعات الليل. وفي فترة عطلة نهاية الأسبوع يكون الطلب أقل كثيراً بصورة عامة مما يكون عليه خلال الأسبوع. ولا توجد تأثيرات موسمية كبيرة بصفة عامة، ولكن قد يدفع الطقس الحاجة لتكييف الهواء.

المناطق السكنية

يشكل استهلاك القطاع السكني قسماً كبيراً من الاستهلاك الكلي للكهرباء في معظم شبكات الكهرباء.

الشكل 2-6 :رسم تخطيطي يوضح بروفيل الطلب الأسبوعي المعتاد على الكهرباء من القطاع السكاني

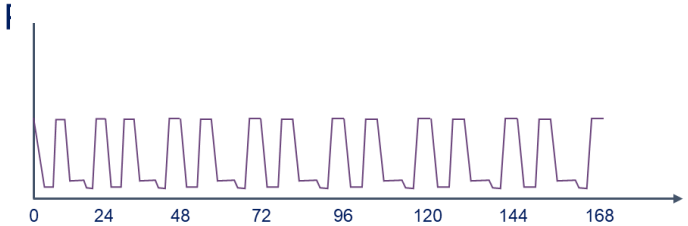


وتتمثل مصادر الطلب الرئيسي في تدفئة المكان وتبريده (مكيفات الهواء) والإضاءة وتسخين المياه والأجهزة الكهربائية والإلكترونية. وبالرغم من أن الاختلافات الموسمية لا تلعب دوراً كبيراً في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي كما يشاهد في باقي مناطق العالم إلا أن المنطقة تميل للاستهلاك الأكبر في موسم ارتفاع درجات الحرارة نتيجة للطلب الزائد على تكييف الهواء. وبالنسبة لفترات اليوم وخلال الأسبوع فمن الواضح أن ذروة الاستهلاك تكون في الصباح عند استيقاظ السكان واستعدادهم ليومهم كما أن هناك ذروة مسائية واضحة عندما يعود الناس لمنازلهم من العمل ويشعلون الأنوار ويستخدمون الأجهزة الكهربائية.

الزراعة

لا تشكل الأنشطة الزراعية قسماً كبيراً من الطلب الكلي على الكهرباء في معظم شبكات الكهرباء في الدول الإفريقية؛ ولكن هناك موضوعاً نشر حديثاً (Giacomo Falchetta, 2021) يشير إلى حقيقة أن أكثر من 90 بالمائة من إجمالي أراضي المحاصيل في دول إفريقيا جنوب الصحراء تروى مطرياً. ويرى المنشور أن نمو الطاقات المتجددة، خاصة في شكل طاقة شمسية لا مركزية قد تتيح العوامل المواتية لزيادة الإنتاجية على امتداد القارة وذلك على سبيل المثال بتوفير الكهرباء لمضخات مياه ري المحاصيل.

الشكل 2-7: رسم تخطيطي يوضح بروفيل الطلب الأسبوعي المعتاد على الكهرباء من قطاع الزراعة



يتباين الطلب الزراعي على الكهرباء بصورة كبيرة باختلاف المواسم وأنماط الحصاد. ولكن أنماط الري اليومية تتبع إشعال مضخات الري في الليل والصباح الباكر، بينما تتم عمليات الحصاد وغيرها من معالجات المحاصيل بالنهار ما يعني أن عمليات الري وعمليات معالجة المحصول لا تتم بالضرورة في أوقات متقاطعة.

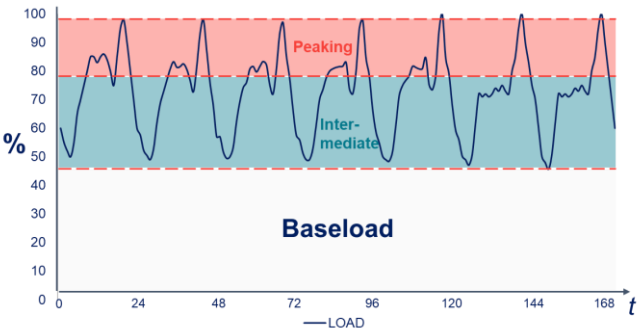
النقل

اقتصر الطلب على الكهرباء من قطاع النقل تاريخياً على القطارات والترام ونظم المترو. ولكن أدت تدابير خفض التكاليف والتقدم التكنولوجي في مجال البطاريات وسياسات الحد من آثار تغير المناخ إلى التوجه نحو كهربة القطاع.

وبالرغم من أن شحن بطاريات المركبات الكهربية يمثل طلباً زائداً على شبكة الكهرباء، إلا أن بطاريات المركبات تمثل فرصاً للتخزين الموزع للكهرباء الذي يمكن الاستفادة منه في أوقات التشغيل الحرجة. وعلى المستوى المحلي قد يؤدي الشحن بالطرق الذكية إلى خفض الحاجة للاستثمار في الشبكات الموزعة. أما بالنسبة لشبكة النقل فإن الاستجابة المجمعة من أسطول كبير من المركبات الكهربية قد تسهم إيجابياً في التغيير المفاجئ في حالة الشبكة التشغيلية ما ييسر زيادة حصة الطاقات المتجددة المتغيرة في الإنتاج.

الطلب الكلي على النظام

الشكل 2-8: رسم تخطيطي يوضح بروفيل الطلب الأسبوعي المجمع الاعتيادي على الكهرباء



إن بروفيل الأحمال الكلية الأسبوعية أو بروفيل الطلب الكلي الأسبوعي هو تجميع كل أحمال النظام المتغيرة مع الزمن. وينبغي لتحديد احتياجات الإمداد الكلي من الكهرباء أن يشتمل بروفيل الأحمال على الفاقد الذي يفقد في شبكتي النقل والتوزيع.

يطلق على مستوى الأحمال الذي يجب تزويده بالكهرباء على مدار الساعة بحمولة النظام الأساسية أو القاعدية، أما ذروة الأحمال أو ذروة الطلب فإنها تصف الساعات التي يكون فيها الاستهلاك في مستوياته العالية. وتسمى مستويات الأحمال التي تقع بين الأحمال القاعدية وأحمال الذروة بالمستويات الوسطى للأحمال.

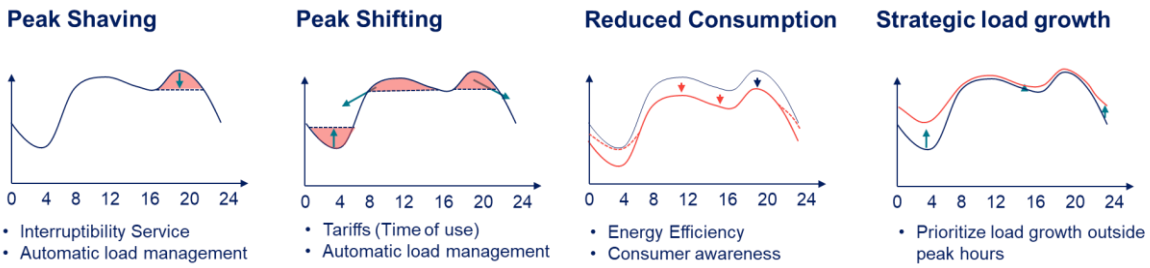
2.2.2 استجابة جانب الطلب

ظلت عمليات التخطيط والتشغيل التقليدية لنظم قوى الكهرباء تتعامل مع الطلب على أنه عامل متغير، ولكن غير قابل للتوزيع. استخدم ترشيد استهلاك الكهرباء عبر السنين كوسيلة احتياطية للحفاظ على توازن شبكة الكهرباء، ولكن هذه الآلية استخدمت بطرق مكلفة وغير مرحب بها وهي عملية إسقاط الحمولات بقطع التيار عنها. وفي السنوات الأخيرة وفي ظل الزيادة التدريجية في التوليد غير المرن والتوسع في عمليات الرقمنة أصبحت إدارة جانب الطلب تزداد أهمية كمصدر للمرونة.

تتمثل إدارة الطلب على الطاقة التي تعرف أيضاً بإدارة جانب الطلب أو استجابة جانب الطلب في إجراء تعديلات على طلب المستهلكين للطاقة. فعلى سبيل المثال، التحول من استهلاك الطاقة في أوقات ارتفاع الأحمال والأسعار إلى الأوقات التي تقل فيها التكلفة يعني أن استخدام موارد الشبكة القائمة قد تحسن. ويشكل هذا التدبير خياراً ذا جدوى اقتصادية مقارنة بالاستثمار في زيادة سعة النقل ما يعود بالنفع على المستهلك والاقتصاد الوطني. هذا التقرير المحتوي على مبادئ توجيهية يركز على المسائل الفنية المتعلقة بسعة شبكة النقل. أما مبادرات السوق المتعلقة بزيادة مرونة جانب الطلب فينظر فيها في تقرير آخر صادر بموجب نفس هذا التكليف (يرجى الرجوع إلى تقرير المبادئ التوجيهية لإدارة جانب الطلب[3]).

[3] التقرير من إصدار شركة CPCS، Econoler ، و Multiconsult لمشروع تعزيز السوق الإقليمية المستدامة للطاقة.

الشكل 2-9: استراتيجيات الاستجابة القياسية لجانب الطلب



2.3 جانب الإمداد

وكما أشير في القسم 2.1 فإن منظومة التوليد تنقسم إلى منظومتين في العادة وهما منظومة مولدات تغطية الأحمال القاعدية التي تصمم تشغيلياً لخرج ثابت والمنظومة الأخرى هي منظومة مولدات تغطية أحمال الذروة وهي تغطي تغيرات الأحمال في النظام.

مولدات تغطية الأحمال القاعدية تصمم بهدف توليد كميات وفيرة من الطاقة بخرج ثابت تقريباً، حيث أن هذه المولدات تفتقر لمرونة الدورات ما يعني أنها وحدات بطيئة التشغيل وغير مرنة من حيث الطاقة المخرجة ومثال ذلك هي المحطات الحرارية والنووية.

أما مولدات تغطية أحمال الذروة فهي تتصف بعكس خصائص محطات الأحمال القاعدية حيث يهدف تصميمها لتتبعها للأحمال المتغيرة مع الزمن. وهذا النوع من المولدات يتميز بسرعة عملية التدوير وبالقدرة على تغيير القدرة المخرجة بسرعة، كما أنها مصممة لتعمل بسلاسة حتى عندما يكون الخرج المطلوب ضعيفاً مقارنة بالخرج الاعتيادي. من أمثلة مولدات تغطية أحمال الذروة التقليدية مولدات الاحتراق الداخلي ومولدات توربينات الغاز ذات الدورة المفتوحة.

يصف تقرير المرونة للوكالة الدولية للطاقة المتجددة الصادر في 2018 (IRENA, November 2018)) نوعاً آخراً من المولدات وهي المولدات الوسطية التي يمكن استخدامها لتغطية كلٍ من الأحمال القاعدية وأحمال الذروة ومن أمثلتها محطات التوليد المائي ذات المستودعات وتوربينات الغاز الحديثة ذات الدورة المركبة.

القاسم المشترك بين كل محطات الكهرباء التقليدية هو أنها أصول يمكن التحكم فيها إلى حد كبير ولها خرج يمكن التنبؤ به/التحكم فيه. وغني عن الذكر أن الطاقات المتجددة المتغيرة لا تقع تحت أي من التصنيفات السابقة لأن القدرة الكهربائية الناتجة عنها متغيرة ولدرجة ما يصعب التنبؤ بها.

كذلك، فإن الطاقات المتجددة المتغيرة بطبيعتها متوزعة أكثر من المحطات التقليدية المركزية التي تتمتع بقدرات توليدية عالية. ويجدر بالذكر أن الكهرباء الناتجة من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة على نطاق صغير، تدخل في منظومة نظام الكهرباء عند نقاط الجهد المنخفضة كما يتضح في الشكل 2-. ومن الأمثلة الجيدة لذلك ألواح الطاقة الشمسية المثبتة في أسطح المباني، حيث تدخل في النظام على مستوى جهد المنازل السكنية وهي عادة أقل نقطة جهد تشغيلية وتقع في نهاية شبكة توزيع شعاعية الهيكل.

ويستنتج أن التطورات السريعة والكبيرة في مجال ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية التي تركب على أسطح المباني قد ينطوي على مخاطر التحميل الزائد على سعة الشبكة المحلية. يمكن أن تكون تقييمات قدرة الشبكة على استيعاب هذه الطاقات أداة مفيدة لتقييم أثر مثل مصادر الطاقة الموزعة هذه. وتمكن هذه المنهجية مرافق الكهرباء من تقييم الكم الذي يمكن استضافته من مصادر الطاقة الشمسية (أو أي مصادر موزعة أخرى) في أجزاء الشبكة المختلفة قبل أن تصبح مخالفات سعة الشبكة مثيرة للقلق ويصبح من الضروري إجراء الدراسات المفصلة للشبكة وتحديد المتطلبات التي تواجه الإنتاج الجديد. ويمكن مثلاً لمقدرات محطات التوليد الموزع على تنظيم الفولطية أثر كبير على القدرة الاستيعابية للشبكة المضيّفة.

وكلما ازداد التباين في صافي الأحمال [4] نتيجة ارتفاع نسبة إدراج مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة في الشبكات كلما زادت الحاجة لمزيد من المرونة في شبكة الكهرباء المحيطة.

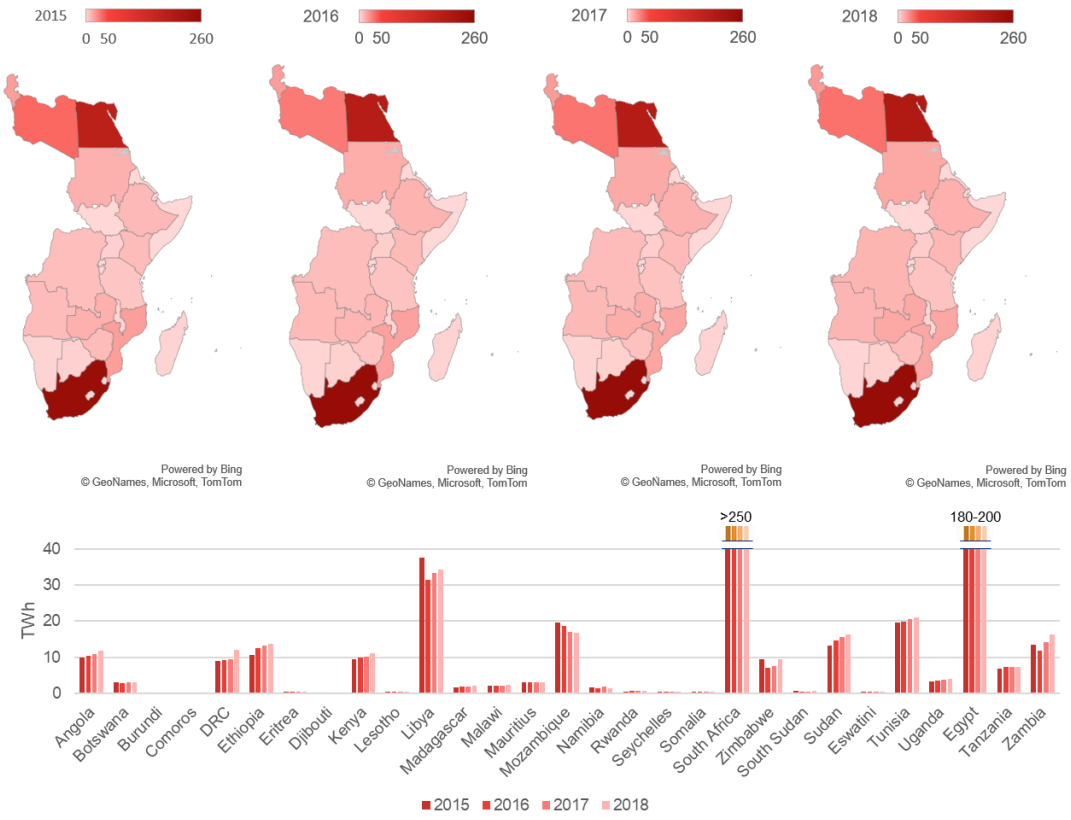
الجدول 2-1: خصائص محطات التوليد

	تغطي الأحمال القاعدية	معدة للإرسال	متغيرة
الطاقة المتجددة	• محطة توليد بالحرارة الجوفية • محطات توليد من الكتلة الحيوية • الطاقة الشمسية المركزة (مع تخزين حراري)	• توليد مائي مع خزان	• طاقة الرياح • الطاقة الشمسية الكهروضوئية • التوليد المائي على مجاري الأنهار • الطاقة الشمسية المركزة (بدون تخزين حراري)
الطاقة غير المتجددة	• الفحم • الطاقة النووية • الغاز • الوقود السائل	• وقود سائل • غاز	

ازداد إجمالي الطاقة الكهربائية المولدة في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي بنسبة 7% وذلك من 607 تيرا واط ساعة في عام 2015 إلى 649 تيرا واط ساعة في عام 2018 (وحدة الإحصاء بالأمم المتحدة، 2021). لا توجد في قاعدة بيانات الأمم المتحدة بيانات أحدث من هذه.

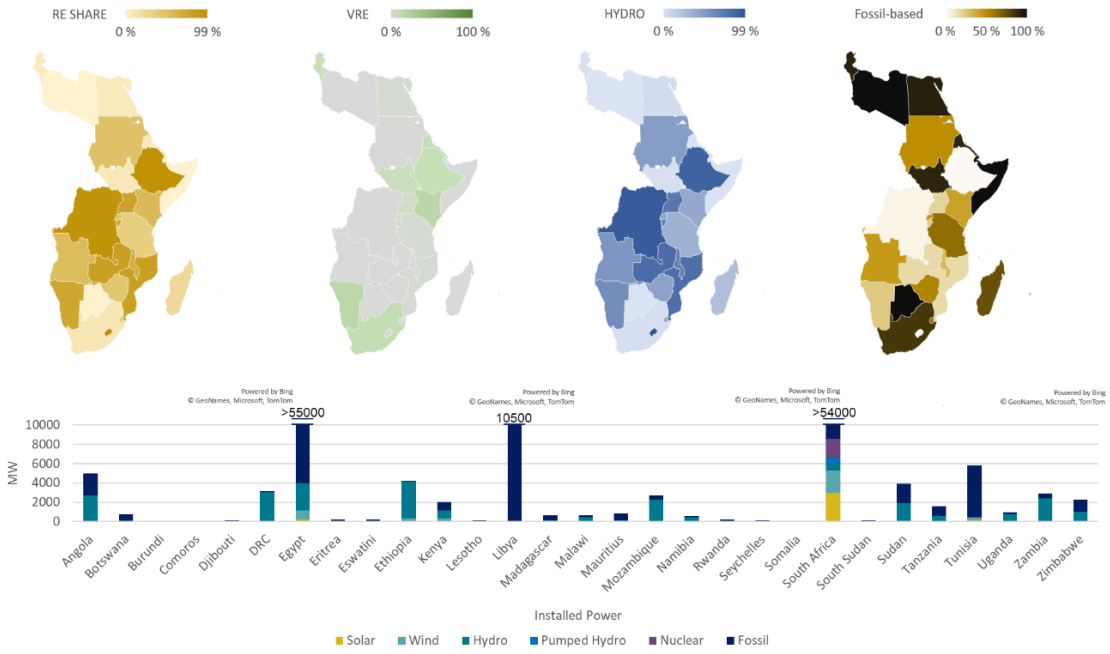
[4] صافي الحمولة يساوي الطلب على الكهرباء مطروحاً منه التوليد من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة، أي هو الطلب على الكهرباء الذي تغطيه المولدات القابلة للتوزيع.

الشكل 2-10: إجمالي توليد الكهرباء (تيرا واط ساعة) بحسب الدولة المنتجة في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي الفترة 2015 - 2018



المصدر: نظام الأمم المتحدة للحصول على البيانات (data.un.org)

الشكل 2-11: سعة توليد الطاقة الكهربائية المشيدة في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي(2018)



Source: UN data retrieval system (data.un.org)

2.4 التخزين

يرتبط قسم هام من تحديات سعة شبكة الكهرباء بالتأرجح قصير الأجل مثل التغيرات المفاجئة في إنتاج الطاقة المتجددة المتغيرة، وأعطال بعض عناصر الشبكة المعينة أو الزيادة الكبيرة التي تحدث في الطلب على الكهرباء لمدة قصيرة. وعندما يكون هناك قصور في سعة الشبكة يكون الحل التقليدي لهذه التحديات هو رفع سعة نقل الكهرباء عن طريق تشييد امتدادات للشبكة أو رفع سعة الإنتاج المحلي عن طريق الاستثمار في أنواع المولدات التي تناسب تغطية أحمال الذروة. ولكن قد يكون التخزين هو الحل البديل الأفضل والأجدى.

انخفض سعر بطاريات ليثيوم أيون الصالحة لأغراض التخزين على مستوى مرافق الكهرباء بنسبة 90 بالمائة [5] تقريباً في السنوات العشرة الممتدة من 2010 إلى 2020. وفي الحقيقة، يرى بلومبيرغ (Bloomberg) أن سعر بطاريات الأيون ليثيوم متعددة الساعات انخفض إلى الحد الذي أصبحت تنافس فيه سعات التوليد الأحفوري مثل محطات أحمال الذروة التي تستعمل الغاز الطبيعي في مجال توفير الطاقة القابلة للتوزيع في العديد من الأسواق حتى بدون دعم.

إن بطاريات تخزين الطاقة الكهربائية المناسبة لمرافق الكهرباء يمكنها أن توفر سعة تخزين احتياطي قصير الأجل وبالتالي تساعد في خفض الحاجة للنقل لمدة قصيرة. وإذا صممت هذه البطاريات بصورة جيدة، فإن الاستجابة السريعة لنظم البطاريات الحديثة المعتمدة على الانفيرترات تعني أنها تستطيع المساعدة في استقرار الشبكة بخفض الحاجة لدعم الفولطية، والاحتياطي الدوار، واستجابة القصور الذاتي للماكينات الدوارة.

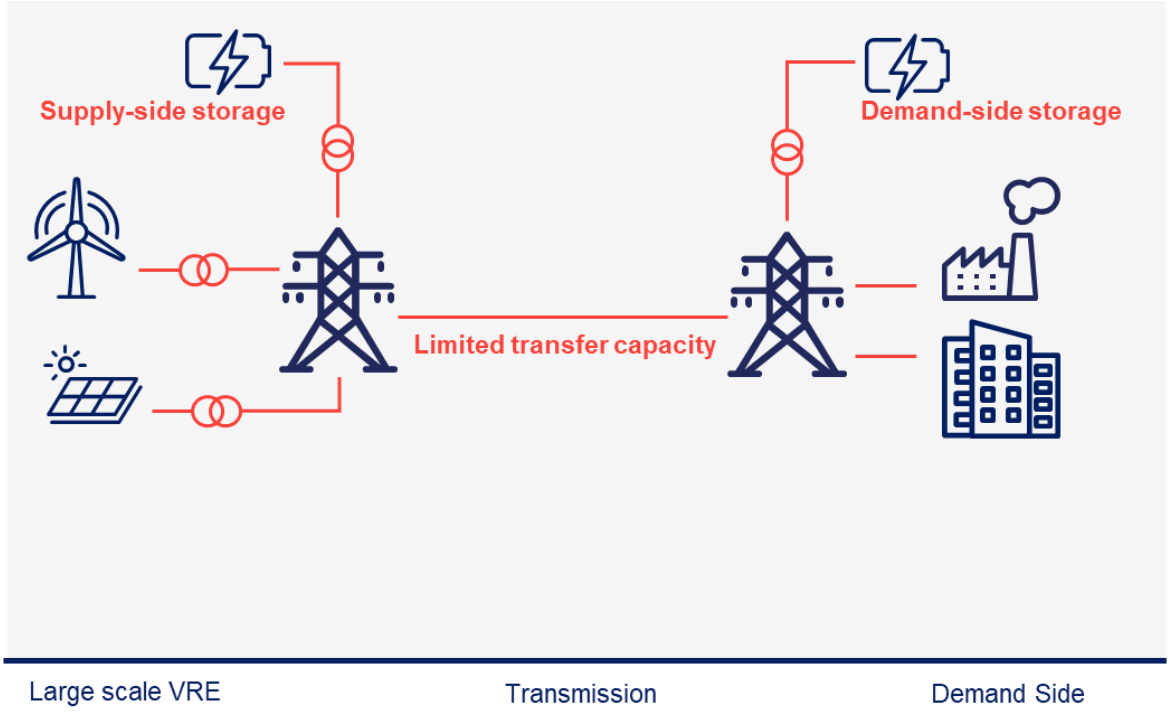
خطوط الكهرباء الافتراضية

يمكن أن تستخدم البطاريات أو غيرها من وسائل التخزين لمعالجة ازدحام خطوط النقل بدون الحاجة للاستثمار في البنية المعززة لشبكة النقل. إذا جهزت خطوط النقل المعاقة بوسيلة تخزين في كل طرف فيمكن للطرف المرسل أن يخزن الطاقة غير القابلة للإرسال بسبب قيود السعة الاستيعابية للخط، كما يمكن شحن نظام التخزين في الطرف المستقبل عندما تكون سعة النقل الاستيعابية كافية ويمكن استخدام الطاقة المخزنة فيه لتلبية الطلب عندما تكون سعة الاستيعاب مقيدة. هذا النوع من

[5] https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-17/this-is-the-dawning-of-the-age-of-the-battery

الحلول عادة ما يطلق عليه اسم خطوط الكهرباء الافتراضية التي يمكن استخدامها لتيسير إدخال مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة ذات القدرة الكبيرة التي تفوق في حدها الأقصى القدرة الاستيعابية القصوى للنقل، وذلك بدون تعزيزات فورية لشبكة النقل كما هو موضح في الشكل أدناه.

الشكل 2-12: مفهوم خطوط الكهرباء الافتراضية – مثال تطبيق إدراج الطاقة المتجددة المتغيرة



المصدر: الاستشاري، بناءً على (IRENA, 2020)

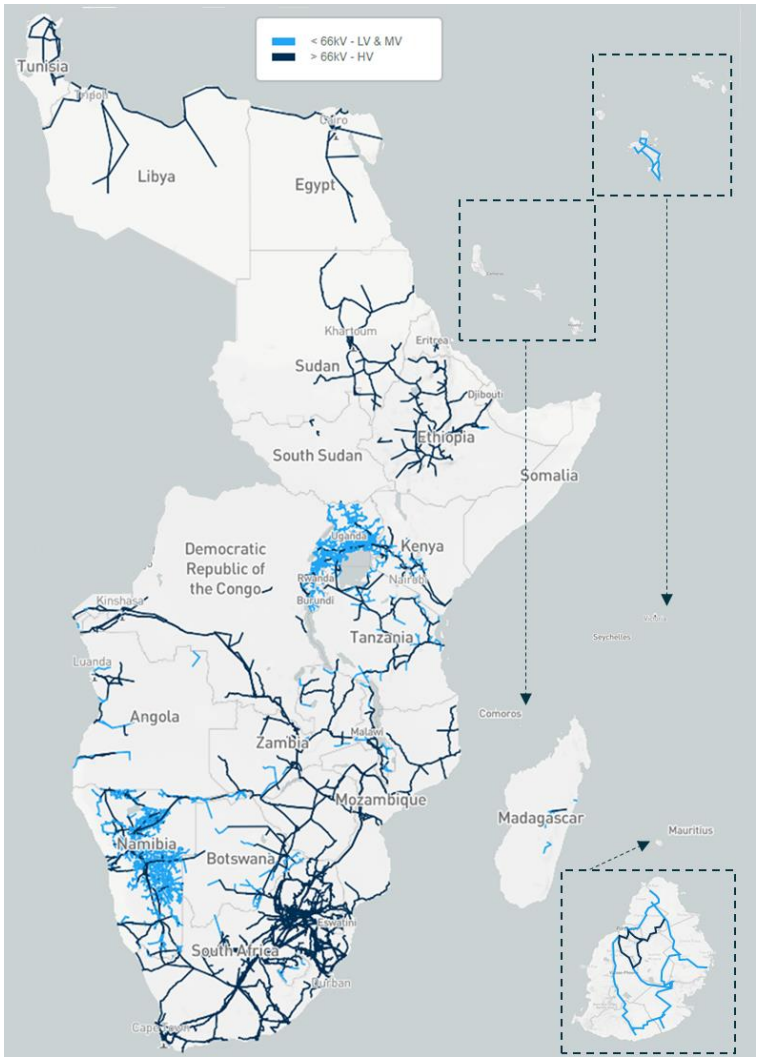
بالإضافة للتخزين في البطاريات هناك وسائل تخزين أخرى طويلة الأجل مثل الهواء المضغوط، وخلايا الوقود الهيدروجيني، وخزانات المياه. وتمثل خزانات المياه الوسيلة المتاحة بدرجة أكبر من ضمن وسائل التخزين المذكورة، ولكن التوسع فيها يعتمد على الموقع المعين.

2.5 النقل والتوزيع

تقوم شبكات النقل والتوزيع بربط جانبي الإمداد والطلب مع بعضهما ولذلك قد يكون لقصور السعة الاستيعابية للشبكات أثر معيق للاقتصاد على كل المستويات، المحلية والوطنية والإقليمية.

الشكل 2 -أدناه يعرض صورة عامة لشبكات الكهرباء في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي كما هي في عام 2019 وذلك بناءً على مجموعة بيانات الباحث في شبكات الكهرباء الإفريقية التابعة للبنك الدولي التي تمثل أفضل تمثيل متاح للهياكل العامة الرئيسية لشبكات نقل الكهرباء في المنطقة، وذلك بالرغم من أن هذه المجموعة من البيانات لا تضم بيانات صحيحة 100% أو مكتملة أو تمثل الشبكات بصورة صحيحة. كما أن التباين في درجة تفصيل البيانات تدل على أن البيانات المدخلة في مجموعة بيانات الباحث تختلف من دولة إلى دولة.

الشكل 2-13: شبكات الكهرباء في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي (2019)



المصدر: مبنية على مجموعة بيانات الباحث لبيانات شبكات الكهرباء في إفريقيا التابعة للبنك الدولي (http://africagrid.energydata.info/). بيانات الشبكة للبلدان الجزرية مبنية على بحوث قام بها الاستشاري شخصياً.

وكما أشير إليه في القسم 2.1 فإن هيكل شبكة الكهرباء التقليدي يضم محطات توليد كهرباء ضخمة موصلة مع شبكة لنقل الكهرباء تحمل الكهرباء على خطوط الضغط العالي لمسافات طويلة في الغالب. وشبكة النقل ذات خطوط الضغط العالي معنية بنقل طاقة الكهرباء المجملة ولا يتصل بها إلا القليل من المستهلكين من أصحاب المصانع الضخمة في الغالب. وبعد ذلك يتم خفض الضغط الكهربائي لاستمرار عمليات النقل وللتوزيع على المستويات المحلية والمناطقية. وتتسم شبكات نقل الكهرباء المتطورة بالتغذية المتداخلة ما يضمن أمن وسلامة التشغيل، حتى لو تعطل أحد مكونات الشبكة. ولكن إقامة شبكة ذات تغذية متداخلة أمر اقتصادي فني في طبيعته، فعلى سبيل المثال، قد يكون إنشاء شبكة متداخلة في مناطق تتسم بقلة الطلب ولا تضم أحمالاً حرجة قراراً غير مثالي من الناحية الاقتصادية.

وكثيراً ما يكون هيكل شبكة التوزيع شعاعياً. ووظيف هذه الشبكة تاريخياً هي ايصال الطاقة الكهربائية للمستهلك الذي عادة ما يكون زبوناً في منطقة سكنية أو محل تجاري. ودرج تدفق الكهرباء على أن يكون في اتجاه واحد وذلك من شبكة الضغط العالي للمستهلكين الموصلين على نظام ضغط منخفض. ومع زيادة توليد الكهرباء الموزع فيتوقع أن تشهد شبكات التوزيع تحولاً سريعاً من تدفق التيار الكهربائي في اتجاه واحد إلى تدفقه في اتجاهين. وبتعبير آخر، فإن توليد الكهرباء من ألواح الطاقة الشمسية على أسطح المباني ومحطات التوليد المائية الصغيرة والتخزين الموزع للطاقة تعمل على تغيير النمط التقليدي لاستخدام شبكات توزيع الكهرباء الموصوف أعلاه. إن تحول وظيفة شبكات التوزيع من القيام بخدمة واحدة إلى القيام بخدمات

متعددة قد يربك هذه الشبكات من حيث قدرتها الاستيعابية على المستويات المحلية وقد أصبحت دراسة تقييم شبكات التوزويع معقدة إلى حد بعيد وعلى القائمين على أمر مرافق الكهرباء اتخاذ منهجية فاعلة لتناول هذا التحول.

وتستخدم شبكة إقليمية للكهرباء للربط بين شبكتي النقل والتوزيع وذلك في حالة محطات التوليد الضخمة المتباعدة جغرافياً بدرجة كبيرة.

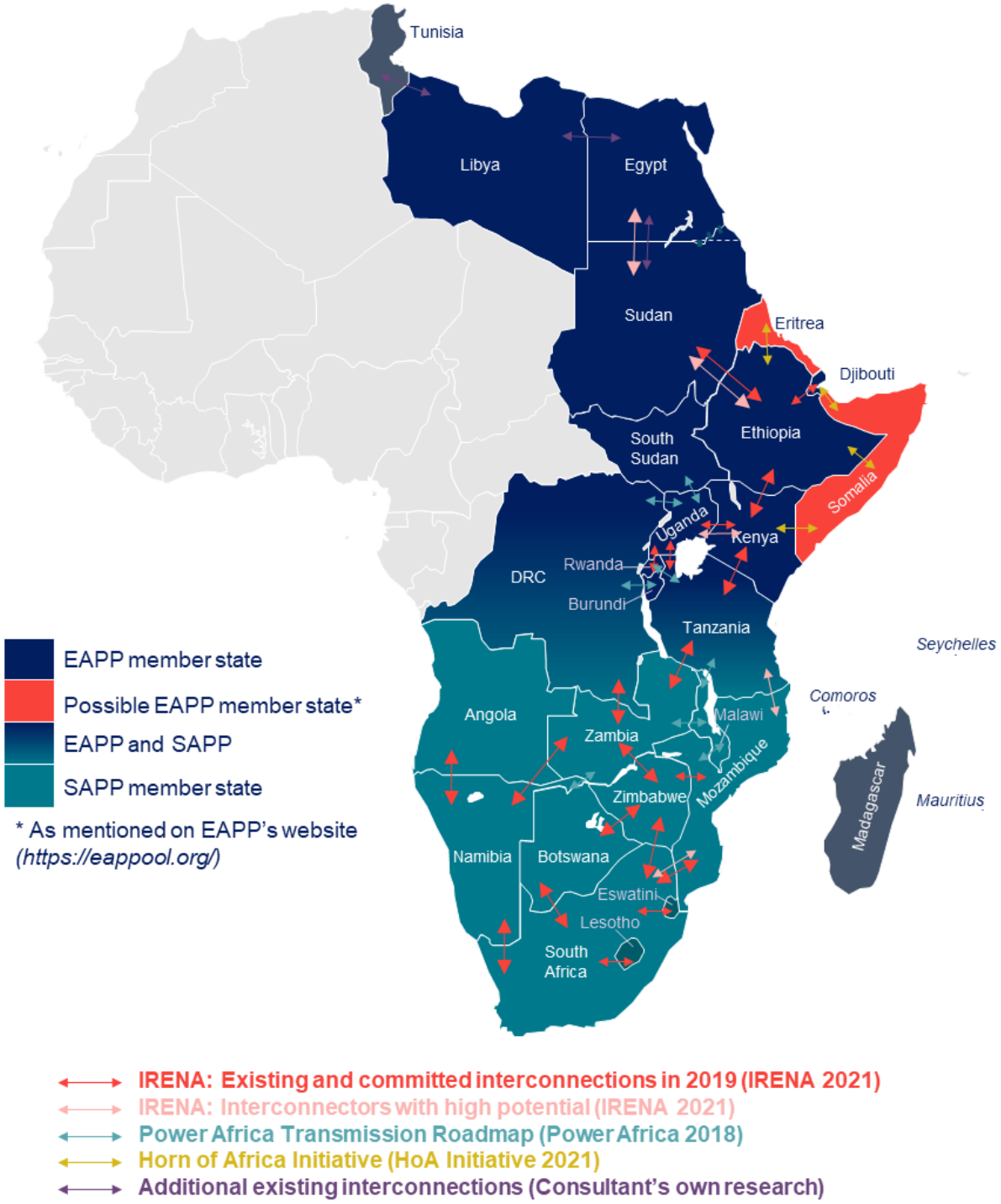
2.5.1 مغذيات الربط عبر الحدود

يمكن لمغذيات الربط عبر الحدود أن تيسر تبادل الطاقة بين مختلف الشبكات الوطنية ومن خلال ذلك تطلق إمكانات تجارية كانت الاستفادة منها ضعيفة.

إن خارطة الطريق إلى 2030 لنقل الكهرباء لمبادرة توفير الطاقة لإفريقيا (Power Africa, 2018) تنص على أن بعض البلدان الإفريقية تتمتع بفائض في الطاقة الوطنية ولديها أصول معطلة بينما تعاني بلداناً أخرى من عجز حاد في إمداد الكهرباء. إن قصور سعة الربط عبر الحدود تعني أن تدفق الطاقة من البلدان ذات إنتاجية الطاقة الوفيرة إلى البلدان ذات العجز في إمدادات الكهرباء مقيد جداً. ويقول المصدر كذلك إن بعض الدول زادت استثماراتها في مشاريع البنى التحتية للنقل عبر الحدود. وينبغي أن يؤدي ذلك لتوازن أفضل من حيث تحديات إمدادات الكهرباء القائمة وقد تكون عاملاً مساعداً في إطلاق سريع للطاقات المتجددة. وتتحدث خارطة الطريق عن 5,000 كيلومتر من خطوط النقل ذات الأولوية وذات الإمكانات لإطلاق التجارة في الشرق الإفريقي (2,000 كلم) والجنوب الإفريقي (3,000 كلم)، كذلك تدرك خارطة الطريق أن هناك مشاريع أخرى عابرة للحدود لها أهميتها في اقتصادات هذه البلدان وتنميتها واستدامة قطاعات الطاقة فيها. تضم القائمة الكاملة للمشاريع الموصوفة في خارطة الطريق أكثر من 3,600 كلم في الشرق الإفريقي وأكثر من 5,600 كلم في الجنوب الإفريقي.

الشكل أدناه عبارة عن بيانات مجمعة من آرينا (IRENA, 2021) ومبادرة توفير الطاقة لإفريقيا (Power Africa, 2018) ومبادرة القرن الإفريقي (HoA Initiative, February 2021) بالإضافة لبحوث الاستشاري الخاصة حول الوضع الراهن والتخطيط للربط البيني الكهربائي في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي. يشار لعضوية دولة في مجمع للطاقة باللون المعين كما هو موضح في الشكل. وواضح من الشكل أيضاً أن هناك مشاريع متعددة مقترحة. ويجدر بالذكر أن التنسيق على المستوى الإقليمي هو مفتاح السعي لتطوير شبكات مستديمة وذات جدوى اقتصادية وإعطاء ذلك الأولوية.

الشكل 2-14: مغذيات الربط القائمة حالياً والملتزم بها والمقترحة في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي-والمحيط الهندي



المصدر: مبني على (IRENA 2021)، و (Power Africa 2018)، ومبادرة القرن الإفريقي 2021، وأبحاث الاستشاري

3 إدارة سعة شبكات الكهرباء بزيادة إدراج الطاقة المتجددة المتغيرة

لمحات رئيسية مختصرة للفصل

- **كفاية سعة شبكات الكهرباء عامل في غاية الأهمية لتمكين التحول للطاقات المتجددة**
- **سعة شبكة الكهرباء لا تشير فقط لسعة شبكتي النقل والتوزيع، بل تشمل كذلك متطلبات التشغيل في جانب الإمداد (والطلب) .**
- **تزداد أهمية مرونة شبكات الكهرباء مع زيادة انتشار مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة**
- **انتشار مصادر الطاقة المتجددة الموزعة مثل ألواح الطاقة الشمسية على أسطح المباني تعني ازدياد أهمية السعة الاستيعابية على المستويين المحلي والإقليمي.**
- **يمكن لمحطات التوليد من مصادر الطاقة المتجددة إذا كانت جيدة التصميم أن تكون أداة مناسبة لإزالة قيود السعات الاستيعابية للشبكات**

يمكن تعريف **السعة الاستيعابية لشبكة الكهرباء** بأنها قدرة الشبكة الكهربائية على استقبال ونقل وتوزيع وتوفير إمداد الكهرباء بصفة مستمرة طول الوقت. وتتعدد خصائص وصفات شبكات الكهرباء التي تتأثر بها سعتها الاستيعابية، ومن الضرورة بمكان إدراك أن سعة الشبكة الاستيعابية ليست بارامتراً مركزياً واحداً. ورغم أن قيود السعة المحلية قد تمنع توصيل الإمداد لزبون واحد أو توصيل محطة توليد واحدة ولا تؤثر كثيراً على الشبكة العريضة، إلا أن القيود المركزية أو الإقليمية قد تؤدي إلى الحد من فرص التنمية لإقليم كامل أو عدد من الدول. ومن هنا يمكن القول بأن السعة الاستيعابية لشبكة الكهرباء تشير إلى قدرتها على استقبال محطة توليد جديدة أو تزويد حمل جديد في نقطة ما في النظام، أو تشير إلى قدرة الشبكة على نقل الكهرباء المجمعة بين المناطق أو عبر حدود الدول.

قد تعتمد محدودية السعة الاستيعابية لأي من عناصر الشبكة (خطوط الكهرباء مثلاً) على الظروف المحيطة، ما يعني أن تغير سعة الشبكة بتغير المواسم ليس أمراً نادراً. كذلك متطلبات التشغيل لها أثر على كيفية النظر للسعة. من الوسائل المعتادة لوصف سعة الشبكة أن يشار لسعة الشبكة من خلال تأثرها بفصل أهم عناصرها، كما يشار إلى سعة الشبكة كذلك بتأثرها بوجود كل عناصرها موصلة وغير معطلة.

سعة الإمداد تشير إلى قدرة السعة التوليدية القائمة على تلبية الطلب في جميع الأوقات ومع تباينه ما بين قيمة أحمال عليا وقيمة أحمال دنيا إذ يجب أن تكون وحدات التوليد المتاحة قادرة على مقابلة الطلب في كل الأوقات لتجنب فصل الأحمال. كما يجب أن يكون النظام قادراً على تحمل التغيرات المفاجئة على التوازن بين الطلب والإمداد ما يعني ضرورة توفر احتياطي للإمداد. تاريخياً كان تناول مسألة التوازن بين الطلب والإمداد يتم في جانب الإمداد.

هناك الكثير من المصطلحات التي ترمز لقدرة شبكة الكهرباء على إيجاد فسحة لسعة توليد جديدة، فعند تقييم توصيل محطات توليد جديدة مع الشبكة تستخدم مصطلحات معتادة مثل *سعة تفريغ الطاقة*، و*قدرة الشبكة على الاستضافة* و*السعة القصوى للتصدير* للإشارة لقدرة شبكة النقل وشبكة التوزيع على استقبال وتفريغ الطاقة بصورة مأمونة.

تشير السعات المقدرة من قبل المصنع للعناصر المكونة لنظام شبكة النقل ونظام شبكة التوزيع إلى مقدار الطاقة التي يمكن للنظام نقلها بصورة مؤمنة وموثوقة. أما القدرة لنقل الطاقة من منطقة إلى منطقة عبر مغذي واحد أو أكثر فيطلق عليها سعة النقل "الصافية" كما يطلق على قدرة شبكة الكهرباء على ايصال الكهرباء لكل المستهلكين القدرة على التزويد .

ولكي تقيم سعة شبكة الكهرباء الاستيعابية بصورة سليمة يجب دراسة موثوقية الشبكة. إن زيادة إدخال مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة من الرياح والطاقة الشمسية الموزعة ذات السعات العالية والتي تعتمد على شدة الرياح والتشميس على التوالي تضفي مزيداً من التعقيدات على عمليات التشغيل التقليدية .

هذا الباب يتناول هذا الموضوع بمقدمة مختصرة عنه مع التركيز على الآثار التي تترتب على زيادة استيعاب الطاقة المتجددة المتغيرة.

3.1 تقييدات سعة الشبكات الفنية

ينبغي أن يكون بمقدور شبكتي النقل والتوزيع استقبال ونقل الطاقة ومقابلة الطلب على مدار ساعات السنة، وينبغي كذلك أن تكون الطاقة المزودة ذات جودة مرضية لكل المستهلكين. وعليه ينبغي تحديد عوامل السعة بناءً على حالة الشبكة في الساعات التي تشهد فيها أعظم الضغوط. وقد يحدث ذلك في أوقات ذروة الطلب أو أوقات التوليد العالي.

تُصمم المعدات التي توصل في شبكة الكهرباء للتشغيل على نطاق تردد ونطاق فولطية محددين وعدم الالتزام بحدود أي من هذين النطاقين في التشغيل يعرض المعدات للمخاطر والتلف وفي بعض الأحيان يعرض الإنسان للأذى أو الهلاك.

ورغم أن جودة الطاقة غير مشمولة بتفصيل أكثر في هذا التقرير إلا أنه لا بد من ذكر أهميتها. ونسبة للخصائص الفنية الطبيعية التي تتصف بها المعدات الموصلة في شبكة الكهرباء فتوجد دائماً بعض التشوهات و"الضجيج" في الموجات الكهربية المستلمة وكثيراً ما يطلق على هذه التشوهات في مصطلحات هندسة نظم القوى الكهربائية الاهتزازات أو التوافقيات أو التشوهات التوافقية. وينبغي لتجنب إحداث الضرر أو التلف في المعدات أن تظل قيم هذه التوافقيات في النطاق المحدد حسب المواصفات.

سعات المعدات

تشمل سعات المعدات التصميمية حدود السعة الحرارية وسعة احتمال دارة القصر لمعدات النظام من القواطع وقضبان التوصيل، والمحولات، والخطوط، والكوابل. عدم الالتزام بالتشغيل داخل هذه الحدود قد يسبب ضرر للمعدات. عادة تكون معدات نظام شبكات الكهرباء محمية وهذا يعني أن أجهزة الحماية ستقطع عنها الإمداد إذا تم تجاوز هذه الحدود. ولكن فصل المعدات الحرجة عن الشبكة بصورة غير متحكم فيها يؤدي إلى تعريض سلامة الشبكة للخطر وقد يؤدي لقطوعات الإمداد غير المقصودة، وفي الحالات الشديدة، يؤدي ذلك للإظلام التام على نطاق واسع، لكل ذلك يجب تجنب هذه الحالات ما أمكن ذلك.

تصمم خطوط الكهرباء الهوائية بقدرة احتمال قصوى محددة لحرارة الموصل وعندما يتم تجاوز الحدود الحرارية القصوى حسب المواصفات يكون هناك حمل حراري زائد.

وتحدد سعة الموصل لحمل التيار (السعة الأمبيرية) للخطوط الهوائية بناءً على اختيار مادة الموصل والمقطع العرضي وأبعاد النقل (جيومترية النقل). هنالك عوامل خارجية تؤثر في حرارة الموصل ومن ثم تؤثر في السعة الأمبيرية للخط الهوائي وتشمل هذه العوامل التشعيع الشمسي، وسرعة واتجاه الريح، ودرجة حرارة الطقس في محيط الخط. تحدد السعة الأمبيرية بناءً على الجزء الحرج الأكثر تأثيراً (أي الحلقة الأضعف في الخط) .

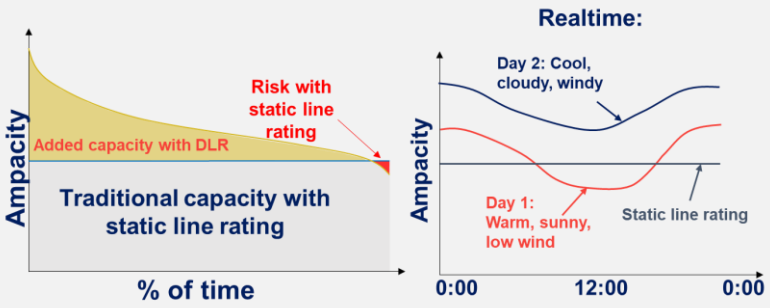
بالنسبة للكوابل، تعتمد السعة الأمبيرية على جيومترية مد الكابل وكذلك على مادة العزل المختارة. وتشمل العوامل الخارجية المحددة لسعة الكابل الحرارية (السعة الأمبيرية) المقاومة الحرارية للتربة ودرجة حرارة التربة وهي عوامل تتعلق بنقل الحرارة بعيداً عن الكابل.

قد تؤدي زيادة الحمل الحراري لتسريع عملية البلي وتدهور قوة الشد الميكانيكية. وترتبط المخاطر التشغيلية ذات الصلة بزيادة الحمل الحراري لخطوط النقل الهوائية بصورة رئيسية بعملية تدلي الأسلاك، التي تؤدي لزيادة مخاطر حدوث دارة قصر وللتلف المادي، والأهم من ذلك تسبيب أذى للأشخاص.

السعة الدينامية لخطوط الكهرباء، وتعرف أيضاً بالسعة الحرارية في الوقت الحقيقي وهي فلسفة معينة في العمليات التشغيلية لنقل الكهرباء حيث تهدف لتحسين استخدام السعة القائمة للنقل بدون الإضرار بالسلامة وحيث يتم النظر لمزيج من معلومات الطقس في الزمن الحقيقي مع قياسات حالة المُوَصّل مع توقعات الطقس المتقدمة جداً. وقد أثبتت هذه الفلسفة فاعليتها في رفع سعة النقل المسموح بها ما من شأنه تخفيف الازدحام، وبالتالي تخفيف عمليات التقليص ما يؤدي بدوره لتسريع التحول لشبكة أكثر خضرة.

السعة الدينامية لخطوط الكهرباء

تشير للتغير التفاعلي للسعة الحرارية المفترضة لخطوط نقل الكهرباء الهوائية وذلك تفاعلاً مع أحوال الطقس والبيئة. ويتم ذلك بصفة مستمرة بناءً على تغير درجة الحرارة المحيطة، والتشعيع الشمسي، وسرعة واتجاه الريح وذلك بهدف تخفيف الازدحام في الشبكة لأدنى درجة ممكنة.
(IRENA, 2020).



قام عدد من مشغلي نظم النقل باختبار السعة الدينامية لخطوط الكهرباء وحصلوا على نتائج طيبة. وهناك دلائل واضحة على أن رفع السعة الحرارية للخطوط يمكنه أن يؤدي إلى تحسين جدوى توزيع التوليد، كما يحفز التكامل ويقلل تقليص الطاقة الشمسية وطاقة الرياح (IRENA, 2020).

ومن الضروري ملاحظة أن خطوط النقل التي لا تعاني من الازدحام ولا تعيق أنشطة السوق (حيث ينطبق ذلك) قد لا تستفيد استفادة كاملة من السعة الحرارية الدينامية. وبنفس المستوى، شبكات الكهرباء المقيدة بقيود فولطية أو قيود استقرار أو قيود محطات تحويلية قد لا تستفيد. وعليه يجب على القائمين على شأن مرافق الكهرباء أن يتخذوا نهجاً تفاعلياً للتخطيط عند تحديدهم للخطوط الهامة وليقارنوا منهج السعة الحرارية الدينامية مع البدائل الأخرى المتاحة قبل تطبيقه.

وأخيراً، يجدر بالذكر أن التكلفة الأولية لإدخال وتطبيق منهج السعة الحرارية الدينامية أعلى بكثير من تكلفة التوسع الهامشية وذلك نسبة لأن تكلفة الإدخال الأولي تشتمل على إقامة نظم مساعدة للتحكم والبرمجيات الضرورية لمتابعة البيانات بالإضافة لتدريب كادر العمل.

تورد الوكالة الدولية للطاقة المتجددة ثلاثة عوامل مفتاحية لتمكين تطبيق السعة الحرارية الدينامية:

1. طريقة لحساب السعة الأمبيرية
2. عمليات رقمنة بغرض القيام بعمليات المتابعة والاتصالات والتحكم في الزمن الحقيقي
3. إيجاد حوافز تنظيمية لعمليات الشبكة التشغيلية ذات كفاءة التكلفة

متطلبات الفولطية وسعة القدرة التفاعلية

يصف الجهد الكهربائية أو الفولطية في نظم القوى الكهربائية إمكانية نقل الطاقة الكهربائية من نقطة في النظام إلى أخرى. ويمكن تشبيه ذلك بالضغط في أنابيب نقل المياه؛ فكما تتدفق المياه من النقطة ذات الضغط العالي إلى النقطة ذات الضغط المنخفض كذلك تتدفق الطاقة الكهربائية من نقطة الفولطية العالية إلى نقطة الفولطية المنخفضة.

وكما يحدث تناوب في قيمة التيار الكهربائي كذلك يحصل تناوب في قيمة الجهد الكهربائي وذلك بتردد يساوي تردد النظام. وأحياناً في نظم الكهرباء يخرج التيار الكهربائي والجهد الكهربائي المترددين قليلاً عن المزامنة لأي عدد من الأسباب. ويتسبب ذلك في منع تحويل الطاقة الكهربائية إلى شغل مفيد مرة أخرى في الماكينات والمعدات. هذه الظاهرة يعبر عنها باسم الطاقة التفاعلية. والطاقة التفاعلية مثلها مثل الطاقة الفاعلة (أو الحقيقية) لا بد أن تكون متوازنة، أي أن الطاقة التفاعلية المنتجة في نظام كهربائي لا بد أن تساوي الطاقة التفاعلية المستهلكة فيه. ومن الممكن تزويد النظام بالطاقة التفاعلية من مولدات الكهرباء، ولكن كثيراً ما يكون من الأجدى اقتصادياً تزويد النظام بهذه الطاقة من معدات تنظيم الجهد الموزعة في كل أنحاء النظام.

التحكم في الجهد الكهربائي في نظم الكهرباء أمر في غاية الأهمية لضمان تشغيل معدات النظام بأمان وبطريقة سليمة. عدم التحكم في الجهد الكهربائي قد يؤدي لتلف المعدات وذلك مثل الارتفاع الشديد في حرارة المولدات أو الموتورات، أو تقصير عمر لمبات الإضاءة وأجهزة الكهرباء المنزلية، أو تلف عوازل المعدات إذا تم تشغيلها بعيداً عن مستوى سعتها التصميمية. ومن وجهة النظر التشغيلية، فالتحكم في الجهد الكهربائي مهم لأجل خفض فاقد الطاقة في شبكة النقل والحفاظ على قدرة النظام على تحمل انهيار الفولطية ومنع حدوثه.

معدات تنظيم الفولطية

المفاعلات الحثية تستهلك الطاقة التفاعلية وتخفض الفولطية.

المكثفات تنتج طاقة تفاعلية وترفع الفولطية. تقليدياً، المكثفات والمفاعلات الحثية تُشَغّل بواسطة قواطع الدارات الكهربائية ما ينتج عنه عتبات عالية نسبياً من الطاقة التفاعلية. ويجدر بالذكر أن زمن الاستجابة طويل نسبياً .

معوضات الطور الدوارة هي ماكينات كهربائية دوارة بدون محرك رئيسي، أي أنها لا تنتج طاقة فاعلة.

معوضات القدرة التفاعلية الساكنة يمكن استخدامها للتحكم السريع في الفولطية، ولكنها باهظة التكاليف مقارنة بالمكثفات والمفاعلات الحثية. وتعمل هذه المعوضات الساكنة بوصل بطاريات المكثفات والمفاعلات الحثية باستخدام الثايرستورات بدلاً عن قواطع الدارات وبذلك يمكن وصل وفصل المعدات في دورة واحدة فقط (0.02 ثانية)

المعوضات التزامنية الساكنة يمكن استخدامها للتحكم في الفولطية بسرعة كبيرة. تعمل هذه المعوضات بتكنولوجيا تستخدم الترانزستورات ثنائية القطبية ذوات البوابات المعزولة وتوفر عمليات تحكم بالغة السرعة (تفوق سرعة معوضات القدرة التفاعلية الساكنة) ولها القدرة على التحكم في القدرة الفاعلة والقدرة التفاعلية بصورة منفصلة تماماً.

المولدات يمكنها توليد أو سحب القدرة التفاعلية كما توضح رسومات القدرات الخاصة بها. إنتاج الطاقة المتجددة المتغيرة من الرياح والألواح الشمسية تستخدم فيها في الغالب تكنولوجيا الترانزستورات ثنائية القطبية ذوات البوابات المعزولة ولها إمكانات تقديم وظائف المعوضات التزامنية الساكنة إذا لزم الأمر.

التحكم في التردد

من أهم خصائص شبكات إمداد الكهرباء في نظم القوى الكهربائية هي خاصية التيار المتردد. وهذه الخاصية تعني أن قيمة التيار تتناوب بين قيم موجبة وقيم سالبة. ويوصف عدد المرات التي تكتمل فيها دورة التناوب في الثانية بتردد النظام. فمثلاً إذا كان تردد النظام 50 هيرتز (50Hz) فهذا يعني أن التيار يكمل دورة التناوب 50 مرة في الثانية الواحدة. ويجب أن يظل تردد نظام القوى الكهربية المترابط ثابتاً لتجنب إحداث الضرر بالمعدات، وذلك لأن المعدات مصممة للعمل في نطاق ضيق جداً حول قيمة تردد النظام الاسمية.

موتورات المصانع على سبيل المثال، تدور بسرعات تعتمد على تردد النظام كما أن العلاقة بين القدرة والتردد في الأحمال التي تغذيها الشبكة قد لا تكون علاقة خطية. فمروحة هواء كهربائية مثلاً تدور بسرعة تتناسب مع عزم الدوران وتتناسب القدرة مع مربع السرعة، وهذا يعني أن تغييراً ضئيلاً في قيمة التردد قد يسبب تغيراً كبيراً في القدرة الكهربائية.

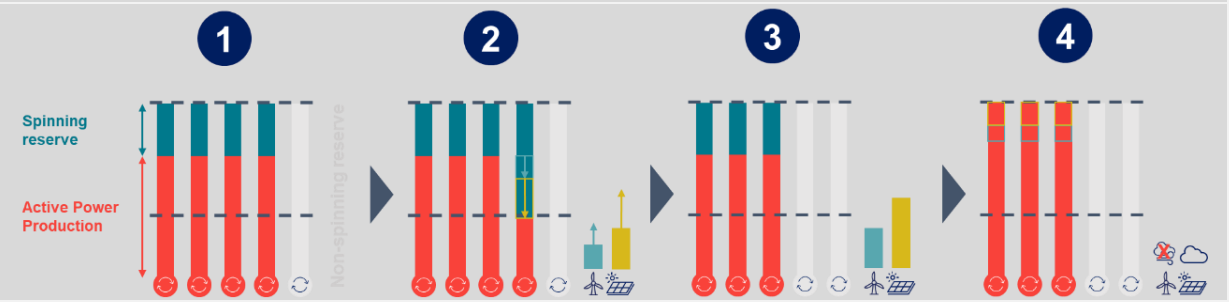
إن عملية تشغيل نظام القوى الكهربائية هي عملية توازن. إذا لم يكن الإمداد موازناً تماماً للطلب فإن ذلك يؤثر على تردد الشبكة. فإذا حدث تغيير فوري في قيمة الأحمال ولم يتبعه تغيير فوري في القدرة لإعادة التوازن فسوف تقوم الماكينات الدوارة بمعالجة عدم التوازن الناتج. ويطلق على هذه المعالجة استجابة القصور الذاتي. إذا حدثت زيادة (أو نقصان) في الأحمال تعني أن المولدات في الشبكة ستخفض (أو ترفع) سرعة دورانها حتى يصل مستوى القدرة المولدة إلى المستوى الذي يوازن الأحمال تماماً. التحكم الدقيق في قيمة التردد بحيث تظل في النطاق الضيق المحدد أمر في غاية الأهمية للمحافظة على التوازن المذكور ومنع شطط التردد: وهو ظاهرة تنطوي على زيادة في الأحمال تؤدي لخفض التردد الذي يؤدي بدوره لخفض الأحمال ما يؤدي لزيادة التردد إلى أن يؤدي ذلك في النهاية لحدوث ذبذبات كبيرة غير مخمدة وارتفاع غير منته لانحراف التردد عن التردد الاسمي.

التغييرات الطفيفة المؤثرة في التوازن بين الطلب والإمداد تحدث بشكل مستمر في شبكة الكهرباء وتتم معالجتها بواسطة استجابة القصور الذاتي. ولكن لكي تكون شبكة الكهرباء قادرة على معالجة التغييرات الكبيرة فلابد لمنظومة التوليد أن تضم **احتياطياً دواراً** كافياً .

إمكانية أن يسبب إدراج الطاقة المتجددة المتغيرة قلة كفاية الاحتياطي الدوار

مع زيادة معدلات إدراج الطاقة المتجددة المتغيرة في شبكات الكهرباء قد يصبح توفر الاحتياطي الدوار مشكلة وذلك كما يوضح المثال في الشكل أدناه. ومع أن الشكل أدناه يوضح حالة عامة إلا أنه يشرح أهمية التخطيط والتحكم المستمر في عمليات تشغيل الشبكة.

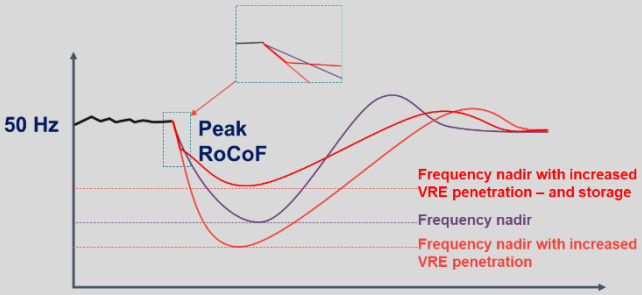
1) شبكة كهرباء مستقرة ابتداءً في نقطة تشغيل معينة، أضيف إليها سعة توليدية من الطاقات المتجددة المتغيرة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح
2) إضافة الطاقة المتجددة المتغيرة تعني تبديل توليد الطاقة من المولدات الدوارة في المحطات الموزعة حالياً حسب جدول توزيع التوليد
3) في مرحلة ما، قد تضطر بعض المولدات للتوقف عن التوليد لتفسح المجال للتوليد من مصادر التوليد المتغيرة. يؤدي ذلك لخفض الاحتياطي الدوار برفع (uploading) محطات التوليد الأخرى وخفض القصور الذاتي للشبكة ما يجعلها أكثر عرضةً لانحرافات التردد.
4) في غياب كفاية الاحتياطي الدوار لن تتمكن الشبكة من تحمل التحول إلى ظروف سماء ملبدة بالغيوم أو سكون الرياح، كما لن يتمكن من تحمل خروج أكبر وحدة توليد من المنظومة وهو عادة شرط أساسي للتشغيل.



إن خفض مصادر التوليد التقليدية الدوارة المدرجة في جداول إرسال التوليد لا يخفض فقط الاحتياطي الدوار للشبكة، بل يخفض أيضاً القصور الذاتي في الشبكة، ويوضح صندوق الحقائق أدناه كيف يؤثر ذلك على استجابة الشبكة للاختلالات. قد تصبح مسائل استقرار الشبكة من حيث ثبات تردد الشبكة على المدى الطويل حالات معقدة بجداول زمنية قد تصل لدقيقة كاملة مقابل استجابة الأجهزة مثل منظمات فولطية الأحمال أو المحركات الرئيسية.

أثر إدراج الطاقة المتجددة والمتغيرة وتخزين الطاقة على استجابة التردد للاختلالات

كلما يحدث اختلال في الشبكة يتبعه اختلال في التوازن بين الطلب والإمداد ما يؤدي لتغيير تردد الشبكة. هذا التغيير لا بد من كبحه وعكسه لتجنب الأعطال. مسائل استقرار التردد في المدى القصير يمكن أن تكون مثلاً في تكوّن منطقة قصور توليد مع عدم كفاية فصل الأحمال نتيجةً لانخفاض التردد، ما يؤدي خلال ثوانٍ لحالة إظلام، وقيم الإطار الزمني المهمة هنا تقع بين المئات من الميللي ثانية إلى عدد من الثواني.



إن أهم خصائص استجابة التردد لاختلالات الشبكة المفاجئة هي نقطة الكبح التي تسمى نقطة النظير (nadir). تتيح استجابة القصور الذاتي التي توفرها الماكينات الدوارة حالة استقرار للتردد بصورة فورية ما يؤدي للحد من معدل تغيير التردد في الشبكة. سيؤدي إدراج الطاقات المتجددة المتغيرة بصورة متزايدة وإحلالها محل الماكينات الدوارة إلى خفض استجابة القصور الذاتي وقد تنزل نقطة الكبح تحت النقطة المحددة كأعلى نقطة لفصل الأحمال نتيجةً لانخفاض التردد، ما يعني أن الاحتياطيات الرئيسية للتحكم في التردد غير كافية، ما يؤدي لفرض قيود على الحد الأعلى لمشاركة مولدات الطاقات المتجددة المتغيرة في مزيج التوليد في الشبكة وهو ما يطلق عليه الحد الأقصى للإدراج أو معدل الإدراج غير المتزامن في الشبكة.

وبالرغم من أن نظم بطاريات تخزين الطاقة لا تستطيع توفير استجابة قصور ذاتي فورية وخفض معدل تغير التردد لكنها قد تستطيع توفير استجابة قدرة سريعة كثيراً ما يطلق عليها القصور الذاتي الاصطناعي (*synthetic inertia*). تستجيب البطاريات بمجرد تمكنها من جس الحدث، ويحدث ذلك عادة في إطار زمني يساوي مئات الميللي ثانية. سرعة استجابة البطاريات تكافئ أو تفوق استجابة التردد السريعة للماكينات الدوارة التقليدية بالنظر لخفض أقصى انحراف في قيمة التردد.

3.2 موثوقية شبكات الكهرباء

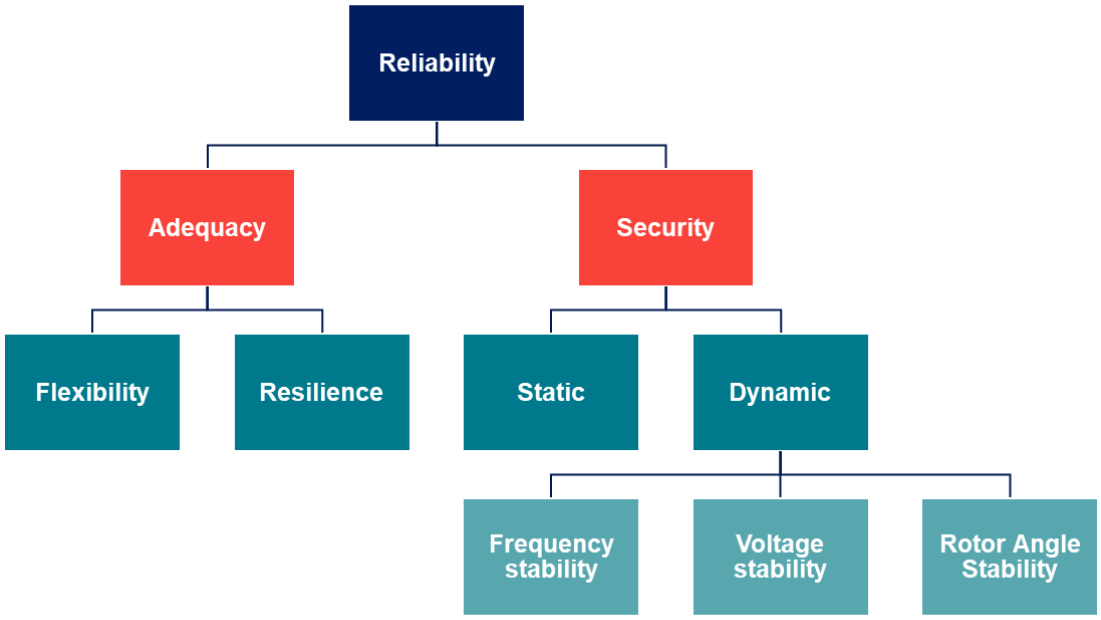
يُستدل على موثوقية شبكات الكهرباء من قدرتها على توفير الإمداد بالطاقة الكهربائية الكافية بدون انقطاع ولفترات طويلة. ولأجل حساب مؤشرات درجة الموثوقية، لا بد من توفر إمكانية توقع ما يمكن أن يحدث في النظام. من الممكن فهم الموثوقية من دراسة اثنين من الوظائف الأساسية لنظم الطاقة ألا وهي كفاية الإمداد وأمن الشبكة.

تعنى عبارة *نظام الطاقة الكهربائية الآمن*، قدرة النظام على الاستمرار في الإمداد بخدمة الطاقة الكهربائية بدون انقطاع متغلباً على كل المعيقات. وتعني عبارة *"الكفاية" في نظم الطاقة*، قدرة النظام على تلبية الطلب على الإمداد بالطاقة الكهربائية من قبل العملاء في كل الأوقات، مع وضع الاعتبار لاحتمال خروج بعض مكونات النظام في بعض الأحيان عن الخدمة.

بينما يشمل أمن نظام شبكة الكهرباء مسائل متغيرة مع الزمن يمكن تقييمها من خلال دراسة أداء نظام الشبكة الكهربائية وهو يعمل تحت مجموعة أوضاع معينة، مثل استخدام المحاكاة للظروف المعينة، يحتاج تقييم النظام من حيث الكفاية إلى القيام بتحليل التوزيعات الاحتمالية وما يترتب عليها من نتائج.

يوضح **Error! Reference source not found.** أدناه التصنيف الشائع لموثوقية نظام الطاقة الكهربائية .

الشكل رقم 3-1: تصنيف موثوقية نظام الطاقة الكهربائية



3.2.1 الكفاية

تعني **الكفاية** في نظم الطاقة الكهربائية قدرة النظام على تلبية الطلب على الطاقة الكهربائية في كل الأوقات مع وضع الاعتبار لخروج بعض مكونات النظام عن الخدمة في بعض الأحيان. وتشتمل الكفاية في نظم الطاقة الكهربائية على كل من كفاية التوليد وكفاية النقل.

كفاية التوليد في نظام الطاقة الكهربائية هي تقييم لمدى قدرة سعات الطاقة المولدة على تلبية الطلب على الطاقة الكهربائية في النظام. وتعني *كفاية النقل* في نظام الطاقة الكهربائية، تقييم قدرة النظام على إدارة تدفق الطاقة الناتج عن نقل الطاقة الكهربائية من محطات التوليد إلى المستهلك. تصف اللجنة الأوروبية (Mercados, E-Bridge, & REF-E, 2015) الكفاية على أنها تتأثر بمتغيرات عديدة عشوائية لا يمكن التحكم بها:

- الخروج غير المتوقع لمرافق توليد أو نقل الطاقة من الخدمة
- توفر المصادر الأساسية خصوصاً في حالة توليد الطاقة غير المستقر من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة
- محدودية سعات النقل وتوفرها
- تغير الأحمال
- وجود المساندة (أو عدمها) من الدول المجاورة

يجب وضع سعات الطاقة العابرة للحدود، والتوليد المتقطع، واستجابة الطلب في الاعتبار من أجل الحصول على تقييم للكفاية يتسم بالواقعية.

تتعلق مسألة مهمة من مسائل الموثوقية بهامش السعة لمحطات توليد الكهرباء.[6] بحيث أنه يجب ضمان وجود طاقة توليدية كافية في النظام تستطيع تغطية أوقات ذروة الطلب على الكهرباء وأن تكون الطاقة الكهربائية المتوفرة على الدوام مساوية للطلب أو تزيد عنه. يشمل هذا تحمل خروج بعض المرافق الرئيسية عن الخدمة، وفترات الجفاف الحاد، واحتمالات شح الإمداد بالوقود اللازم لمحطات التوليد. كما أن إضافة التوليد المتغير للطاقة المتجددة إلى نظام الطاقة يعنى أن قدرات التوليد والطاقة الكهربائية المنتجة قد زادت، بمعنى أن توفر الطاقة المنتجة قد ازداد. ويجب، وعلى كل حال، الوضع في الاعتبار عند تقييم توفر الطاقة من المصادر المتجددة مواسم الجفاف (بالنسبة للطاقة الكهرومائية)، وانتشار السحب (بالنسبة للطاقة الشمسية)، وسكون الرياح (بالنسبة لطاقة الرياح).

استناداً إلى وصف كفاية الطاقة الوارد أعلاه، فإننا قد ننظر إلى الكفاية من زاوية مرونة نظام الطاقة الكهربائية ومقدرته على التكيف.

المرونة

تعني المرونة في نظام الطاقة الكهربائية أن النظام قادر على استيعاب المتغيرات التي تطرأ على الطلب والإمداد في كل الأوقات. ويشمل تقييم المرونة في نظام الطاقة دراسة تفاعل النظام مع التغيرات، وحالات عدم التيقن قصيرة المدى، والفروقات ما بين الإمداد المتوقع والإمداد الحقيقي للطاقة الكهربائية؛ وهذا يعني: ما إذا كان النظام قادراً على استعادة التوازن وكم من الزمن يحتاجه لذلك. تكون أسباب التغيرات، في سياق الطاقة المتجددة المتغيرة، عائدة إلى انتشار السحب فوق مشروعات الطاقة الشمسية، أو سكون الرياح غير المتوقع. يجب أن تكون سعات الطاقة الحقيقية الاحتياطية ومعدلات صعود المحطات الاحتياطية للوصول إلى قمة انتاجها وعناصر تخزين الطاقة قادرة على تغطية الفجوة التي تحدث بسبب القطوعات التي تحدثها تغيرات المناخ بالنسبة للطاقة المتجددة، إلا إذا كان فصل الإمداد عن بعض الأحمال مقبولاً. بينما لا يتسم التوليد من مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بالمرونة، فإن غيرها من المصادر المتجددة مثل الطاقة الكهرومائية تدخل مرونة إضافية إلى النظام.

القدرة على التكيف

تشير القدرة على التكيف إلى قدرة نظام الطاقة على تحمل الأعطال الكبيرة التي قد تحدث مثل خروج أحد خطوط النقل الرئيسية لفترة طويلة، أو انعدام الوقود في محطات التوليد التي تعمل بالديزل. قد تكون الأسباب التي تؤدي إلى الأعطال الكبيرة طبيعية أو من صنع البشر.

وجدير بالملاحظة أنه خلال السنوات الأخيرة، ومع تغير المناخ الذي يشهده العالم، تزايد تكرار حدوث الكوارث الطبيعية وتزايدت حدتها وتكلفتها(Raoufi, Vahidinasab, & Mehran, November 2020) . كما أن الدراسات تتوقع أن يتسبب تغير المناخ مستقبلاً في ندرة المياه، وأن تنويع مصادر توليد الطاقة بإدخال الطاقة المتجددة المتغيرة سيعزز من أمن الطاقة خصوصاً في الأنظمة التي يغلب عليها التوليد المائي (Habostad, 2021) .

[6] يعني هامش السعة، نسبة سعة التوليد المتوفرة إلى الطلب على الطاقة الكهربائية في أوقات الذروة، معبراً عنها بالنسب المئوية.

يعمل المشغلون في أنظمة الطاقة الكهربائية جيدة البناء، في أغلب الأحيان، على تخطيط الشبكة وفقاً لمبدأ ن-1 (N-1 criterion). يحتاج نظام الطاقة الكهربائية المكون من عناصر عددها ن، لكي يمتثل لمبدأ ن-1، أن يكون قادراً على تحمل فقدان أحد عناصره دون أن يفقد حالة الثبات والاستقرار. ويعني هذا، عملياً، أن خروج أكبر محطات التوليد أو أهم خطوط النقل في الشبكة عن الخدمة يجب ألا يتسبب في انقطاع الخدمة عن أي زبون. يمكن أن يُختبر هذا المبدأ عن طريق تحديد عدد معين من الحالات الطارئة التي يزيد احتمال حدوثها ودراسة مدى تأثيرها على النظام عن طريق محاكاة أثرها بواسطة أداة محاكاة نظم الطاقة الكهربائية.

3.2.1 الأمان

تشير عبارة **أمان نظام الطاقة الكهربائية** إلى قدرة شبكة الكهرباء على تحمل الأعطال بدون أن تؤدي إلى انقطاع الخدمة عن العملاء. وحتى يكون النظام آمناً، بجانب أن يكون مستقراً، يجب أن يكون النظام محصناً ضد الحالات الطارئة التي لا تصنف على أنها من مشاكل استقرار النظام. تشمل هذه الحالات التخريب، أو سقوط أحد أبراج النقل، أو تعطل أحد الكوابل. ويشتمل الأمان، أيضاً، على الآثار المترتبة على عدم الاستقرار. قد يكون هناك نظامان مستقران ومتساويان في درجة هامش الاستقرار، ولكنهما غير متساويين في الأمان وذلك بسبب أن الآثار المترتبة من عدم الاستقرار أكثر حدةً على أحدهما من الآخر.

تتم دراسة أمان نظم الطاقة الكهربائية، عادة، بإجراء تحليل ثابت وتحليل ديناميكي. يتيح تحليل الأمان للنظام تحديد البارامترات الهامة لعمليات تشغيل النظام مثل الحد الأقصى المسموح به لانسياب الطاقة على خطوط النقل، والكمية اللازمة من احتياطيات التردد الرئيسية والثانوية بالإضافة للمستوى الثالث من احتياطيات التردد، ومتطلبات التيار التفاعلي للتحكم في الفولتية في النظام.

الأمان في حالة الثبات

تشتمل عملية تقييم الأمان في حالة الثبات على دراسة انسياب الأحمال في النظام في ظروف التشغيل العادية وفي حالة خروج أحد العناصر عن الخدمة. تُستخدم عملية التقييم هذه في تحديد بارامترات التشغيل مثل الحمولة القصوى المسموح بمرورها في خطوط النقل، ومتطلبات التيار التفاعلي للتحكم في الفولتية في النظام.

قام (وو وكوماغي، 1982) (Wu & Kumagai, 1982) بتعريف منطقة التشغيل الآمن للشبكة في حالة الثبات على أنها "مجموعة عمليات حقن للقدرة الفعالة والقدرة التفاعلية (متطلبات الأحمال من الطاقة وتوليد الطاقة) التي تُستوفَى فيها معادلات تدفق الطاقة وقيود الأمان التي تفرضها حدود تشغيل المعدات."

استقرار النظام

يشبه استقرار نظام الطاقة الكهربائية الاستقرار في أي نظام ديناميكي آخر ويستند إلى نفس العمليات الحسابية الأساسية. وهي ببساطة مسألة حفاظ على التوازن بين القوى المتعارضة. تشير عبارة استقرار النظام في دراسات أنظمة الطاقة الكهربائية إلى مقدرة النظام على تحمل الأعطال الفجائية، مثل حالات الماس الكهربائي، أو خروج مولد عن الخدمة، أو خروج أحد خطوط النقل أو الحمولة، ومن ثم استعادة حالة توازن التشغيل بما يحافظ على تماسك النظام. يشير هذا إلى الإيفاء بمتطلبات الفولتية والتردد لشبكة الكهرباء، وقد تتضمن أيضاً تقييم قدرة النظام على تحمل هبوط الفولتية واستمرار التشغيل واستقرار الزاوية الدوارة بالنسبة لمحطات التوليد الدوارة.

يتم تقسيم استقرار أنظمة الطاقة الكهربائية، في الغالب، إلى ثلاث فئات:

1. **استقرار التردد**: هو التوازن ما بين إمداد الطاقة الكهربائية والطلب عليها – المحافظة على السرعة المتزامنة للمولدات في النظام
2. **استقرار الفولتية (الجهد)**: توازن الطاقة التفاعلية
3. **استقرار زاوية الدوار**: التوازن ما بين عزم الدوران الميكانيكي الواقع على المولدات وبين عزم الدوران الكهربائي الذي يظهر على الشبكة – المحافظة على الفروقات الصغيرة عن السرعة المتزامنة في كل المولدات في النظام.

تحتوي محطات توليد الطاقة الكهرومائية ومحطات توليد الطاقة الحرارية على ماكينات دوارة ينبغي أن تعمل على نفس التردد الذي تعمل عليه بقية عناصر النظام (أي بسرعة متزامنة باستمرار). يتم توصيل محطات الطاقة الشمسية ومعظم محطات طاقة الرياح الحديثة مع الشبكة من خلال محول عكسي (انفيرير) وعليه تكون منفصلة عن التردد في الشبكة – أي

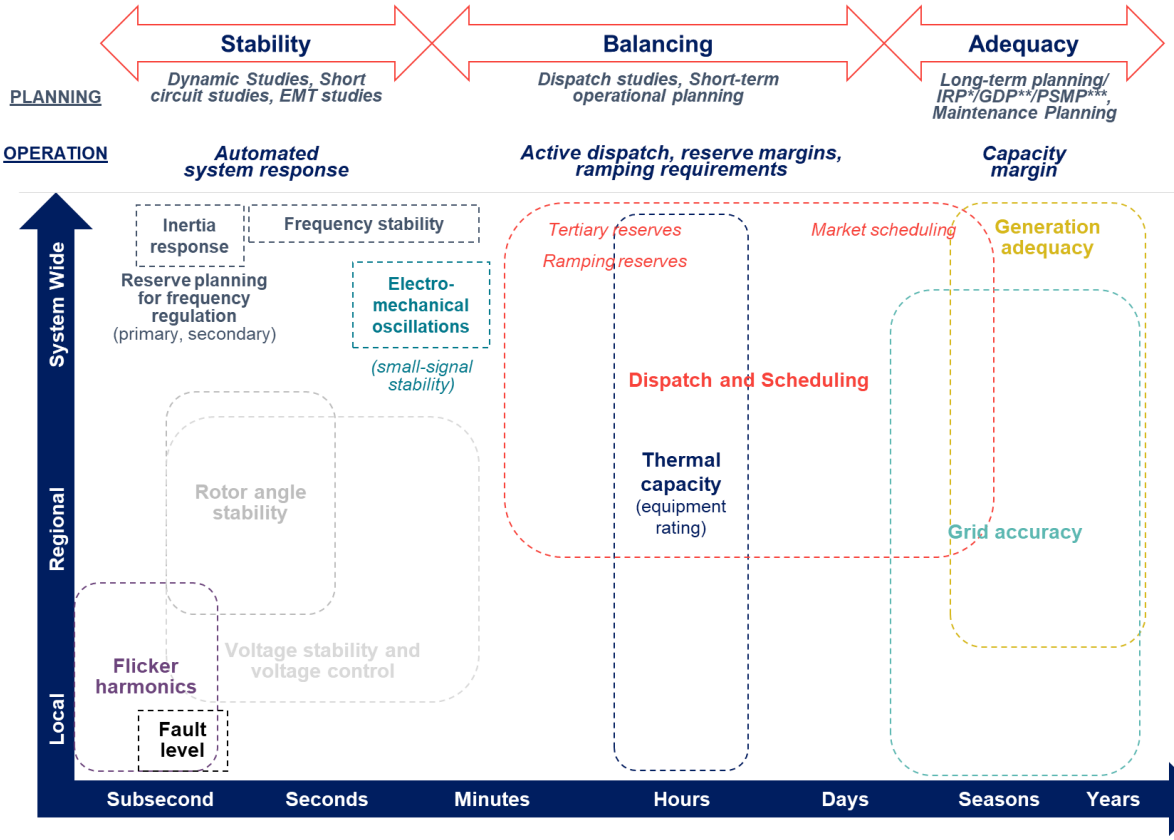
أنها ليس لديها سرعة متزامنة. ومن الممكن أيضاً، على أي حال، أن تؤثر هذه المصادر المتجددة على استقرار الزاوية الدوارة في النظام بتأثيرها على عملية التشغيل للمحطات الموجودة أصلاً في النظام.

3.3 معايير التخطيط والتشغيل لسعات الشبكة

ان التخطيط لإنشاء شبكة لنقل الكهرباء وتشغيلها أمر بالغ التعقيد، تحيط به الكثير من الشواغل. وتتفاوت تحديات التشغيل من حيث النطاقات الزمنية والمجالات المتأثرة.

ويستند الشكل التوضيحي أدناه على تقرير "رفع مستوى الطاقة المتجددة المتغيرة" (Romero & Hughes, February 2015) ويبني على المفاهيم الواردة في القسمين السابقين (أي ظواهر أنظمة الطاقة الكهربائية التي يجب وضعها في الحسبان عند تقييم سعة شبكة نقل الطاقة الكهربائية).

الشكل رقم 3-2: الشواغل التي تحيط بتخطيط وتشغيل أنظمة الطاقة



المصدر: مقتبس من الشكل رقم 2.6 والشكل رقم 2.10 في (Romero & Hughes, February 2015)

قد تؤدي الزيادة في حجم الطاقة الكهربائية الواردة إلى النظام من مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة إلى التأثير على النظام على المستوى المحلي وعلى امتداد نواحيه، وعلى كل النطاقات الزمنية. فمثلاً على المستوى المحلي، في نطاق الجزء من الثانية، قد يكون للطاقة الشمسية الموزعة، أو على الأسطح، تحكم غير جيد على الفولتية الأمر الذي قد ينتج عنه أثر سلبي على استقرار الفولتية وعلى التحكم في الفولتية. كما أن إدخال كمية كبيرة من انتاج الكهرباء الموزعة على النظام قد يؤثر على مستويات تيارات القصر. ونظام الحماية الذي صمم من الأول لنظام الطاقة الكهربائية ليعمل في ظل نظام توزيع تتدفق فيه القدرة (وتيارات القصر) في اتجاه واحد من محطة التحويل المغذية إلى المستهلك، قد يُجابَه بتحديات في كشف ومعالجة دارات القصر عندما يصبح تدفق التيار في اتجاهين.

كما أن التوليد الموزع القائم على المحول العكسي (انفيرتر)، بدون الاهتمام بمتطلبات التصميم السليمة، قد يتسبب في التذبذبات والتشوه التوافقي الأمر الذي يقلل من مستوى جودة الطاقة الكهربائية.

ان مسائل الاستقرار الواردة في القسم 3.2.2 هي ظواهر مرتبطة بمدى زمني قد يصل إلى الثواني. ويتم تصميم تدابير استقرار أنظمة الطاقة الكهربائية على أن تعمل بطريقة مؤتمتة. ويعني هذا أن التخطيط لمسائل استقرار النظام يجري بتحليل الأحداث التي قد تحدث في النظام، مثل الأعطال الكبيرة أو الماس الكهربائي. ويتم تصميم عمليات نظم الحماية وأجهزة التحكم والمنظمات المؤتمتة لتتصدي لتلك المخاطر استناداً إلى إعدادات مستمدة من الدراسات.

يتم التخطيط لمسائل التوازن بالنطاق الزمني من الدقيقة والساعة وحتى اليوم من خلال دراسات إرسال القدرة (dispatch) المنتجة إلى الشبكة الناقلة عن طريق تقييم هوامش الاحتياطيات اللازمة ونسبة ما يستغرقه جانب الإمداد من الزمن لإرسال الطاقة إلى الشبكة، والمرونة الموجودة في جانب المستهلك، ومسائل الاختناقات المحتمل حدوثها في شبكة النقل. توفر تحليلات الأمان لحالة الثبات، (تدفق الأحمال والدراسات الديناميكية)، لمشغلي الشبكة المعلومات الضرورية مثل حدود سعة النقل التي لا يجب تجاوزها، بما يعني مثلاً أن المولدات القريبة من مراكز الأحمال الكبيرة يجب تشغيلها. هذا الأمر قد يضع القيود على الطاقة المتجددة المتغيرة متسبباً في تقليص السعة في المناطق البعيدة عن مركز الأحمال وليس بها سعات نقل كافية.

يجب على المخططين، بالنسبة للنطاقات الزمنية الأطول، أن يضمنوا توفر الطاقة الكهربائية الكافية في كل الأوقات، واضعين في الاعتبار التباينات الموسمية في كل من جانب الطلب وجانب الإمداد. يتم التعامل مع كفاية نظم الطاقة الكهربائية عن طريق التخطيط طويل المدى، بالتركيز على مصادر التوليد وشبكة النقل. يتم القيام بمثل ذلك التخطيط في شكل دراسات كبيرة للنظام تضع في الاعتبار التطويرات الجارية، والمخطط لها في كل جوانب النظام من مصادر التوليد والإمداد إلى جانب الطلب على الطاقة وإلى شبكة النقل. تشمل الأمثلة على ذلك خطط الموارد المتكاملة، وخطط تطوير شبكة النقل، والخطط الرئيسية لنظام الطاقة الكهربائية.

4 الاعتبارات الخاصة بالدولة

لمحات رئيسية مختصرة للفصل

- **تم تقديم أربعة أمثلة عامة لنظم الطاقة الكهربائية ذات الخصائص المتباينة، تمثل أربع فئات يمكن وضع كل دولة من دول منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي في احداها**
  1. **دول الجزر (المحيط الهندي)**
  2. **أنظمة الطاقة الكهربائية المتطورة المعتمدة على الوقود الأحفوري**
  3. **أنظمة الطاقة الكهربائية متوسطة التطور والمعتمدة جزئياً على مصادر الطاقة المتجددة**
  4. **أنظمة ذات حجم محدود من حيث الاستهلاك ومن حيث مشاركة الطاقات المتجددة أو كلاهما**
- **تتباين المسائل والإجراءات التي يجب اتخاذها بدرجة طفيفة ما بين هذه الفئات الأربعة. وعلى أي حال، فإن المرونة والتخطيط الاستباقي مطلوب على كل المستويات ولكل الفئات لضمان القدرة على النقل**

إخلاء مسؤولية: **كان من المفترض في البدء أن تكون هذه الدراسة مشتملة على تقييم لسعة الشبكات في أربعة من الدول الأعضاء المختارة. ولكن نسبة لعدم توفر المعلومات المطلوبة لمثل هذه الدراسات، فقد تم اختيار نهج مختلف. فقد تم تقديم أمثلة عامة لنظم طاقة بخصائص ينبغي أن تكون ذات صلة بالدول في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي. استندت الأمثلة المقدمة على خصائص تتسم بها أنظمة الطاقة المختلفة في المنطقة.**

نهدف في هذا الفصل إلى تقديم أمثلة عامة لأنظمة الطاقة الكهربائية تشابه الواقع الذي تشهده معظم دول منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي. ونقوم في هذا الفصل أولاً، من أجل تقديم أمثلة تكون ذات صلة بالواقع في كل الدول الأعضاء، بتصنيف أنظمة الطاقة في المنطقة بناءً على بعض الخصائص المختارة. ان محاولة الوقوف على كل النظم في كل الدول الأعضاء من خلال بعض الأمثلة المختارة يعني أن الخصائص التي تم اختيارها هي على مستوى عالٍ وأنه لم يتم الوقوف على كل السمات لأنظمة الطاقة الكهربائية المختلفة. وبالرغم من كل ذلك، فإن هذا النهج سيكون أقرب تمثيلاً لمعظم الدول الأعضاء من أن نقوم ببساطة بتقديم نماذج مفصلة لقليل من نظم الطاقة الكهربائية القائمة.

4.1 تصنيف الدول في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي

ملحوظة حول المنهجية: يمكن استخدام العديد من البارامترات لتصنيف أنظمة الطاقة الكهربائية. تركز عملية التصنيف المقدمة في هذا الفصل الفرعي من التقرير على بعض مؤشرات الأداء المختارة. تستند عملية التصنيف على إحصاءات الأمم المتحدة، ولكنها أيضاً، بدرجة ما، تتضمن تقييمات نوعية قام بها الاستشاري. تم استخدام ما يلي من الخصائص لفرز السمات الرئيسية لأنظمة الطاقة:

1. **مساهمة الطاقة المتجددة:** تستخدم مساهمة الطاقة المتجددة (كنسبة مئوية من جملة سعة الطاقة الكهربائية المركبة) كمؤشر لقياس المدى الذي بلغته الدولة في إنشاء نظام طاقة كهربائية ذي انبعاثات قليلة.
2. **نسبة انتشار خدمة الكهرباء:** وتستخدم نسبة انتشار خدمة الكهرباء كمؤشر لقياس أي مرحلة بلغتها الدولة في طريق توفير خدمات الكهرباء للجميع. كما أنها أيضاً تكون مؤشراً إلى مدى انتشار شبكة نقل الطاقة.
3. **إجمالي استهلاك الكهرباء:** يشير إجمالي استهلاك الكهرباء إلى حجم نظام الطاقة الكهربائية الموجود، وهو بالتالي مؤشراً إلى حجم الأثر الذي يمكن أن يتركه إدخال الطاقة المتجددة المتغيرة إلى النظام.
4. **نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء:** لا تقتصر نسبة استهلاك الفرد من الكهرباء على الدلالة إلى عدد السكان الذين يتمتعون بخدمة الكهرباء، وانما هي أيضاً تدل على درجة استخدام الدولة للطاقة الكهربائية للأغراض الإنتاجية.

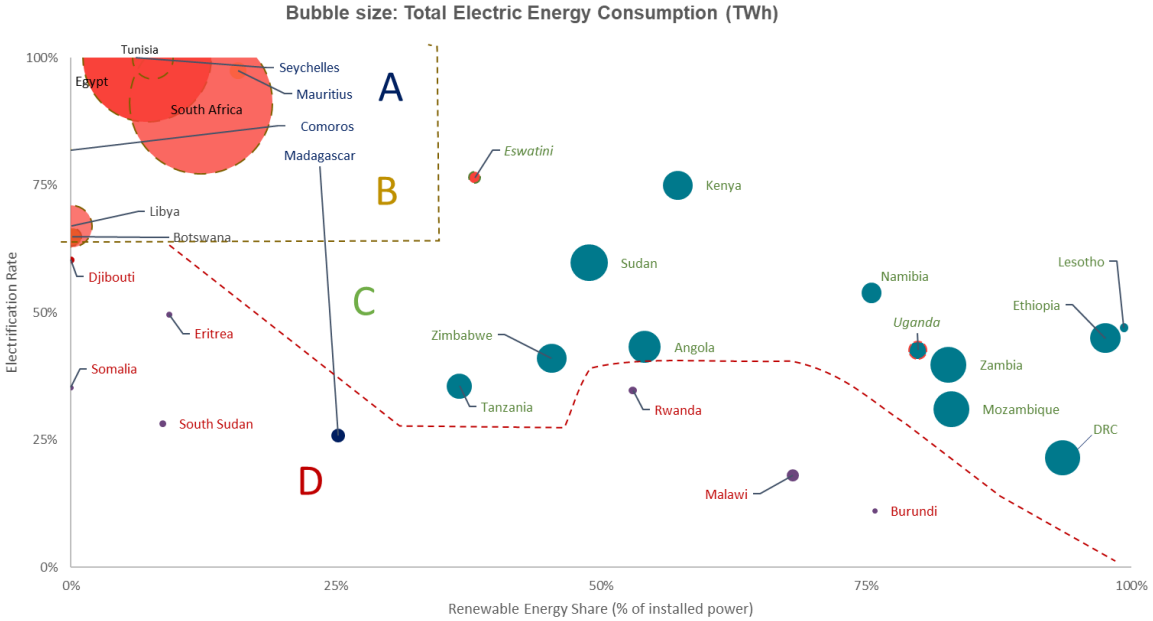
نقدم في الجدول أدناه، استناداً إلى تلك المعايير، هذه الفئات الأربعة العامة لأنظمة الكهرباء. ان مؤشرات التصنيف لم يتم تحديدها بصورة كَمية ويجب أن التعامل معها على أنها استرشادية وليست مطلقة.

الجدول رقم 4-1: معايير الفرز لتصنيف أنظمة الطاقة الكهربائية في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي

النوع	فرص الربط البيني؟	مساهمة الطاقة المتجددة [%]	نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء [kWh]	نسبة السكان الذين يتمتعون بخدمة الكهرباء [%]	إجمالي الطلب على الكهرباء [TWh]
أ: (المحيط الهندي) الدول الجزرية	لا				صغير
ب: الاستهلاك العالي للكهرباء المنتجة من الوقود الأحفوري	نعم	منخفض	مرتفع	مرتفع	ضخم
ج: استهلاك متوسط من الكهرباء، ومساهمة جزئية من الطاقة المتجددة	نعم	متوسط / عالي	متوسط	متوسط / عالي	متوسط
د: استهلاك محدود الحجم ومساهمة محدودة للطاقة المتجددة	نعم	منخفض / متوسط	منخفض	منخفض	صغير

كما هو واضح في الشكل الشكل 2 -على صفحة 13-2 فإن معظم الدول، عدا دول الجزر، لها خطوط ربط بيني قائمة أو ملتزمة بإنشائها أو تخطط لإنشائها. وبالتالي فإن عدد خطوط الربط القائمة لن يتم استخدامها كمعايير للتصنيف. وعلى كل حال فقد تم وضع دول الجزر في فئة منفصلة حيث أنها ملزمة بتزويد نفسها بنفسها بالطاقة الكهربائية إذ انها لا يمكنها الاعتماد على دول مجاورة لمدها بالطاقة الكهربائية. بالرغم من تركيزها فقط على دول الجزر في المحيط الهندي، فإن النصح المقدم للدول في النوع A ينطبق أيضاً على الدول التي لا تزال غير مربوطة مع الدول المجاورة لها. يضع الرسم البياني الفقاعي **Error! Reference source not found.** الدول الأعضاء في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي في فئات مختلفة استناداً إلى المعايير أعلاه.

الشكل رقم 4-1: عملية تصنيف أنظمة الطاقة في دول الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي



المصدر: راجع الملحق أ

تم في الرسم التوضيحي تلوين حدود دولتين من الدول بالألوان في إشارة إلى أنهما كان من الممكن إدراجهما تحت أكثر من فئة واحدة (راجع الملحق أ لمزيد من التفاصيل). تُعد مساهمة الطاقة المتجددة في مجمل الطاقة الكهربائية المنتجة في أوغندا مساهمة عالية، ومعدل وصول خدمة الكهرباء إلى أنحاء البلاد في المتوسط، كما تُعد من الدول المصنفة على أنها دول ذات كثافة كهربائية متوسطة، وهي متوسطة إلى عالية في مساهمة الطاقة المتجددة. إلا أن أوغندا تقبع في أسفل الترتيب مع أربعة آخرين في نسبة نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء. وبالتالي فبالإمكان وضع الدولة ضمن الفئتين **ج** و**د**. وتمتلك ايسواتيني شبكة طاقة كهربائية صغيرة تسهم فيها الطاقة المتجددة بنسبة مقدرة، الأمر الذي يجعلها أقرب إلى الفئة **ج**. كما أن المعدل العالي من نصيب الفرد في استهلاك الكهرباء والنسبة العالية من وصول خدمات الكهرباء إلى السكان تجعلها أقرب إلى الفئة **ب**. وأخيراً، تملك جيبوتي نظام للطاقة الكهربائية يقع نصيب الفرد فيه من استهلاك الكهرباء في المعدلات العالية. ولكن نسبة لاعتماد انتاج الطاقة كلياً على الوقود الأحفوري ولصغر حجم النظام بصورة عامة، تم إدراجها بصورة دلالية تحت الفئة **د**.

ليست هذه هي الدول الوحيدة التي يمكن أن تضعها خاصية واحدة أو أكثر من الخصائص تحت فئات متعددة. تم الآن تحديد الخط الفاصل ما بين الفئتين **ج** و**د** وبالتالي يتم إدراج كل من تنزانيا والكونغو الديمقراطية تحت الفئة **ج** بينما تندرج رواندا تحت الفئة **د**، بالرغم من أن رواندا لها معدل من نسبة وصول خدمات الكهرباء إلى أنحاء البلاد مشابه لما لتنزانيا ولها نسبة مساهمة للطاقة المتجددة تقع ما بين نسب المساهمة للدولتين الأخريين. استند هذا على تقييم حجم النظام وعلى إجمالي نصيب الفرد من استهلاك الطاقة الكهربائية.

يُلفت نظر المطلع على هذه الدراسة إلى أن التصنيف ما هو إلا محاولة لتحديد المبادئ التوجيهية المناسبة لنظم الطاقة الكهربائية ذات الخصائص المختلفة، والتي قد تكون ذات صلة بكل الدول الأعضاء. وبما أن خصائص نظم الطاقة الكهربائية تتغير مع الزمن، فينبغي على القائمين على مرافق نظم الطاقة الكهربائية أن يعملوا على تقييم كيف وإلى أي مدى تناسب المبادئ التوجيهية المقدمة احتياجات نظمهم المحددة.

4.2 أ: دول جزر المحيط الهندي

تختلف دول الجزر في المحيط الهندي عن غيرها من الدول في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي في أنها لها نظم طاقة كهربائية منفصلة بدون أي توقعات في أن يحدث لها ربط بيني مع نظم الطاقة الكهربائية في دول مجاورة. وبالرغم من أن أحجام ودرجة تقدم نظم الطاقة الكهربائية في دول الجزر متباينة، إلا أنها تم إدراجها تحت فئة منفصلة لأنها لا بد أن تعتمد كل واحدة منها على نفسها، ولأنه لا يمكن استخدام الربط البيني ليعطيها مرونة أكثر. ومن هذا

المنطلق، فإن المبادئ التوجيهية التي تنطبق على الفئة أ هي منطبقة بصورة كبيرة على دول الداخل التي لم تقم بعد بعمل الربط البيني بينها وبين ما جاورها من الدول.

تمتلك كل الدول في الفئة أ نظم طاقة كهربائية يقل إجمالي الطلب على الطاقة فيها عن ثلاثة (TWh)، إلا أنهم يواجهون تحديات مختلفة. تتمتع مدغشقر، من ناحية واحدة، بكثافة سكانية كبيرة مشتتة جغرافياً في أنحاء البلاد مع معدل منخفض لوصول خدمات الكهرباء إلى السكان، وقد تحتاج إلى إنشاء نظام للطاقة الكهربائية مبني على الموارد الموزعة وشبكات كهرباء ريفية صغيرة قبل أن تقوم ببناء شبكة مركزية كبيرة. ومن جانب آخر، فإن سيشل وموريشيوس، وجزر القمر بدرجة جزئية، لها ما يقرب من الخدمة الشاملة لكل السكان في الجزر الصغيرة التي تزودها بالطاقة الكهربائية بصورة رئيسية مولدات تعتمد على الوقود الأحفوري. تُعد نسبة السكان المصنفين كسكان حضر نسبة متوسطة، مما يشير إلى أن شبكات التوزيع تلعب دوراً مهماً في الإمداد الكهربائي في شبكات نقل الطاقة الكهربائية المربوطة.

من الخصائص الرئيسية لنظم الطاقة الكهربائية المدرجة تحت الفئة أ أنها تعتمد على محطات توليد صغيرة إلى متوسطة الحجم تعمل بصورة أساسية بالوقود الأحفوري، بما فيها المحطات الحرارية التي تكون في حالة استعداد على مدار الساعة لإرسال الطاقة الكهربائية في الشبكة عند الطلب. تمدد شبكة النقل في هذه الفئة محدود نسبياً، والفولتية في النظام معتدلة. يتم توزيع الطاقة الكهربائية من خلال شبكة توزيع إلى المستهلك. لذلك، فإن نظم الطاقة المتجددة مرشحة لأن تتسيد هذه الأنظمة بسرعة وأن تلعب دوراً هاماً. ويجب على أنظمة الطاقة الكهربائية في دول الجزر أن تحافظ على المرونة والقدرة على التحكم حتى تكون قادرة على القيام بعملية التحول إلى الطاقات المتجددة. وبما أن الربط البيني ليس وارداً كحل يضفي المرونة لهذه الأنظمة، فإن دول الجزر قد تلجأ إلى وسائل أكثر كلفة لتحقيق المرونة مثل تخزين الطاقة، أو مزاوجة القطاعات (sector coupling) في استخدام الطاقة لأغراض غير الكهرباء مثل التسخين، أو الهيدروجين، أو غيرها من الخيارات التي غالباً ما يطلق عليها " (Power to X)" أو "(P2X)". قد يلعب المستهلكون المنتجون ومستخدمو الطاقة الكهربائية دوراً هاماً في زيادة مساهمة الطاقات المتجددة في نظم الطاقة الكهربائية.

تتضمن المسائل التي يجب الانتباه إليها في الفئة أ ما يلي:

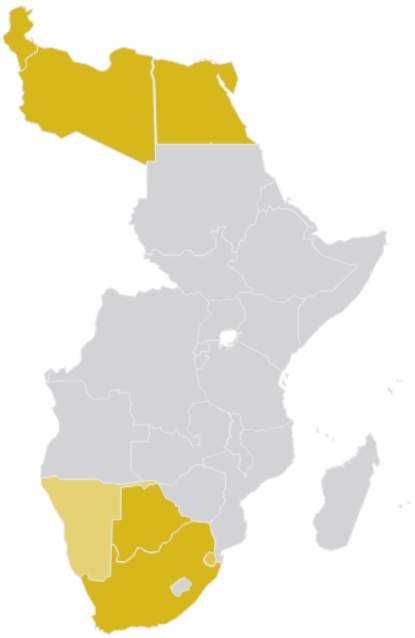
الجدول رقم 4-2: مسائل يجب النظر فيها في أنظمة الفئة أ

جانب الإمداد	**الكفاية** -هامش السعة والوفرة -المرونة والاستعداد للإمداد عند الطلب -الاحتياطي الدوار، وسرعة إدخال الطاقة المولدة إلى الشبكة، وطاقة القصور الذاتي المخزنة لتعويض الفاقد -تحديث الوحدات الحرارية للحدود الدنيا الأقل للحمولات
النقل	في حالة نقل الجهد العالي: **الأمان** -الازدحام / الاختناقات **القدرة على التكيف والكفاية** - وفرة الاحتياطي (استيفاء مبدأ "N-1 ")
التوزيع	**الأمان** قدرة النظام على استقبال أحمال جديدة دون الحاجة إلى إجراء تعديلات **الكفاية** التنسيق مع خطط الشبكات الصغيرة والتوليد خارج الشبكة
التخزين	التخزين له أهمية كبرى على مستوى محطات التوليد وعلى مستوى التوزيع حيث يضفي مرونة على النظام ويقلل الاعتماد على التوليد باستخدام الديزل. التخزين لفترات طويلة له أهمية كبرى في إحداث التحول نحو أنظمة أكثر اعتماداً على الطاقة المتجددة
جانب الطلب	**المرونة** جانب المستهلك (المناطق السكنية) المستهلكين المنتجين

يجب أن تراعي قوانين وأكواد الشبكة ومتطلباتها صغر حجم الأنظمة. من الممارسات الشائعة في تناول مسائل الطاقة المتجددة المتغيرة في قوانين وأكواد الشبكات وفي المتطلبات الفنية هي أن المحطات الصغيرة لا تخضع لنفس المتطلبات الفنية التي تفرض على المحطات الكبيرة. ونسبة لمحدودية أحجام أنظمتهم، فيجب على دول الجزر أن تنظر باهتمام في مسألة فرض المتطلبات من عدمها أو تخفيفها لمحطات الطاقة المتجددة الصغيرة مثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية الموزعة المركبة على الأسطح.

من الممكن أن تتركز مشروعات الطاقة المتجددة في المناطق التي يكون فيها الإمداد الكهربائي مستنزفاً. في مثل تلك المناطق، إدخال طاقة منتجة من المصادر المتجددة بإمكانه أن يحسن أوضاع الشبكة بشكل كبير، مما يتيح الاستخدام الأمثل لسعة الشبكة.

4.3 ب: استهلاك عالي للكهرباء المنتجة من الوقود الأحفوري



تمثل الفئة **ب** أنظمة طاقة كهربائية متطورة تعتمد على الوقود الأحفوري. ولكي يندرج نظام الطاقة الكهربائية تحت الفئة **ب**، يجب أن تكون تغطية خدمة الكهرباء التي يوفرها النظام تفوق 50%، وأن تكون مساهمة الطاقة المتجددة فيه أقل من 25%، وأن يكون نصيب الفرد فيه من استهلاك الكهرباء يفوق 1000 كيلو وات ساعة.

الدول التي تندرج تحت هذه الفئة هي جنوب أفريقيا ودول شمال أفريقيا، تونس، وليبيا، ومصر. والدولتان اللتان تتميزان عن البقية هما جنوب أفريقيا ومصر. حيث يبلغ اجمالي استهلاك الكهرباء في كليهما عشرة أضعاف إجمالي استهلاك ليبيا من الكهرباء وهي الدولة التي تحتل المرتبة الثالثة من حيث استهلاك الكهرباء حسب إحصاءات عام 2018. وبالرغم من أن إجمالي الطلب على الكهرباء في أنظمة الطاقة الكهربائية في إسواتيني وبوتسوانا صغير، إلا أن ارتفاع معدل انتشار خدمة الكهرباء في أنحاء البلاد، وارتفاع نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء بإمكانه أن يجعل الدولتين مرشحتين لإدراجهما تحت الفئة **ب** ولكنهما مدرجتان تحت الفئة **ج** نظراً للمساهمة العالية للطاقة المتجددة في مزيج الإمداد في أنظمتهما.

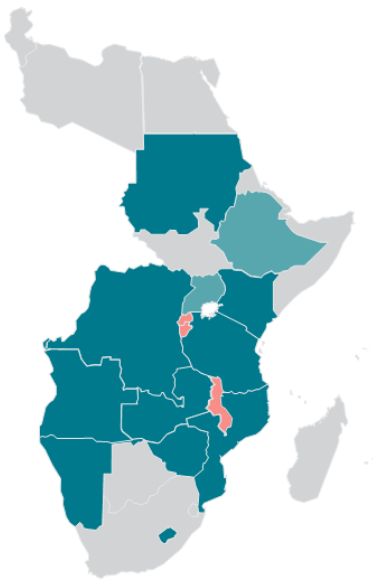
يشتمل التفاوت فيما بين دول الفئة **ب** على حجم الدولة (ومدى انتشار الشبكة في الدولة)، بالإضافة إلى الحجم الكلي للنظام.

السمة الرئيسية لأنظمة الفئة **ب** هو أنها تتكون في جانب الإمداد من محطات توليد ضخمة تعتمد بصورة أساسية على الوقود الأحفوري. يتم نقل الطاقة الكهربائية إلى مراكز الأحمال من خلال شبكة نقل متطورة بدرجة نسبية، ويتم توزيعها من خلال شبكة توزيع إلى المستهلكين. وتشهد الدول المندرجة تحت الفئة **ب** طلباً متوسطاً إلى عالٍ على الطاقة الكهربائية من القطاعات الصناعية فيها التي يتم إمدادها بفولتية عالية، وبها قاعدة متطورة نسبياً من العملاء في المناطق السكنية تشتمل على العديد من مراكز الأحمال الحضرية الكبيرة. المسائل التي يجب النظر فيها باهتمام بالنسبة لأنظمة الطاقة الكهربائية المندرجة تحت الفئة **ب** موضحة في الجدول التالي.

الجدول رقم 4-3: المسائل التي يجب النظر فيها في أنظمة الفئة ب

جانب الإمداد	**الكفاية** -هامش السعة والوفرة -المرونة والاستعداد للإمداد عند الطلب (dispatchability) -الاحتياطات التشغيلية، وسرعة حقن الإمداد في الشبكة -التخطيط التشغيلي (التشغيل الاقتصادي لوحدات التوليد حسب الطلب)
النقل	**الأمان** -الازدحام / الاختناقات **القدرة على التكيف والكفاية** -الوفرة (استيفاء مبدأ "N-1 ") -سعة الربط البيني
التوزيع	**الأمان** قدرة النظام على استقبال أحمال جديدة دون الحاجة إلى إجراء تعديلات
التخزين	قد يكون في التخزين قصير المدى حلاً للتقلبات قصيرة المدى للطاقة المتجددة المتغيرة التي قد لا تستطيع المحطات الحرارية التي تستغرق بعض الزمن في بداية التشغيل. قد يكون التخزين متوسط المدى الخيار الأنسب نسبة لبطء بداية تشغيل المحطات الحرارية
جانب الاستهلاك	**المرونة** استجابة جانب الطلب في القطاع الصناعي، الاستجابة الاجمالية لجانب الطلب

4.4 ج: الأنظمة متوسطة الحجم المستندة جزئياً إلى الطاقة المتجددة



تمثل الفئة **ج** نظم الطاقة متوسطة التطوير والتي تساهم فيها الطاقات المتجددة بدور بارز ضمن تشكيلة مصادر الطاقة التي تستخدمها. ولكي يتسنى لنظم الطاقة أن تندرج في الفئة **ج** يجب أن يكون اسهام الطاقة المتجددة فيها يفوق 25% وأن يفوق استهلاك الفرد فيها 100 كيلو وات ساعة تقريباً. ويجب أن يكون الحجم الكلي للنظام أكبر من واحد (تيرا وات ساعة (TWh)). ويجب ألا تكون نسبة وصول خدمات الكهرباء إلى أطراف البلاد ضعيفة، بغير تحديد لمدى اتساعها.

تشمل الدول التي يمكن أن تندرج تحت المجموعة **ج** كل من إسواتيني، وناميبيا، وليسوتو، وأنغولا، والسودان، وزمبابوي، وزامبيا، والكونغو الديمقراطية، وكينيا، وتنزانيا، وموزامبيق، واثيوبيا، وأوغندا. تم ادراج اثيوبيا وأوغندا تحت الفئة **ج** بالرغم من صغر نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء الأمر الذي يشير إلى الفئة **د**، ولكن يأتي ادراجهما تحت الفئة **ج** نسبة لمساهمة الطاقة المتجددة بدرجة كبيرة ضمن تشكيلة مصادر الطاقة التي تستخدمها. وبالرغم من المساهمة الكبيرة للطاقات المتجددة في ملاوي وبوروندي ورواندا، إلا انها قد أدرجت تحت الفئة **د** نسبة لضعف انتشار خدمات الكهرباء في أنحائها، ولصغر حجم شبكة الطاقة الكهربائية، ولانخفاض مستوى نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء.

تحتوي الدول المندرجة تحت الفئة **ج** على نسب عالية من مساهمة الطاقة الكهرومائية في نظم الطاقة الكهربائية عندهم. ويعني هذا أن بعض محطات توليد الطاقة الكهرومائية قد تكون قد صممت لتكون محطات أحمال أساسية، وتعمل عادة بأفضل نقطة كفاءة. سيعمل دخول المزيد من محطات الطاقة المتجددة في هذه النظم إلى زيادة نسب توقف واستئناف عمل هذه الوحدات والتشغيل خارج نطاق أفضل نقاط الكفاءة، الأمر الذي سيستدعي زيادة أعمال الصيانة للمحطات القائمة لمجابهة زيادة اهلاك وحدات النظام. تُعتبر محطات التوليد الكهرومائية المعتمدة على الخزانات هي الأنسب لتعمل جنباً إلى جنب مع مصادر الطاقة المتجددة المتغيرة، بالرغم من زيادة متطلبات الصيانة بها، لأنها يمكن التحكم بها، ولما لها من سرعة في تشغيلها وسرعة في صعودها لقمة التوليد. ومن الممكن التحكم في التوليد المائي بتخفيضه أو إيقافه عندما يكون التوليد في محطات الطاقة المتجددة المتغيرة عالٍ في أثناء النهار، وإعادته بسرعة أثناء الليل.

يشكل تغير المناخ خطراً على توفر المياه على مدار العام. وتتوقع العديد من المصادر أن متوسط نسبة هطول الأمطار سيتدنى نسبة لتغير المناخ . (Spalding-Fecher, Joyce, & Winkler, 2017) وبالتالي، سيشكل الاعتماد الكبير على التوليد المائي للكهرباء خطراً على استقرار الإمداد. وتشهد سنوات الجفاف، عادة، توليد أعلى للكهرباء من محطات الطاقة الشمسية على عكس السنوات التي تكثر فيها الأمطار، كما أن التوليد من طاقة الرياح يتأثر أيضاً بالأمطار. ان تنويع تشكيلة المصادر المستخدمة لتوليد الطاقة في الدول التي تعتمد بصورة كبيرة على التوليد المائي بإدخال الطاقة المتجددة المتغيرة يعتبر خياراً مناسباً لتقليل أثر مواسم الجفاف على استقرار خدمة الكهرباء. نورد في الجدول أدناه توضيح للمسائل التي يجب أن ينظر فيها باهتمام في نظم الطاقة المندرجة تحت الفئة **ج**.

الجدول رقم 4-4: المسائل التي يجب النظر فيها في نظم الفئة ج

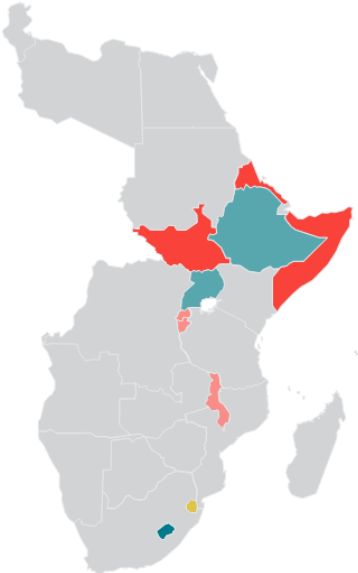
جانب الإمداد	**الكفاية** -هامش السعة والوفرة -المرونة والاستعداد للإمداد عند الطلب -الاحتياطات التشغيلية التخطيط التشغيلي (جهوزية الوحدات، التشغيل/الايقاف)
النقل	**الأمان** -الازدحام / الاختناقات **القدرة على التكيف والكفاية** -وفرة الاحتياطي (استيفاء مبدأ "N-1 ") -سعة الربط البيني
التوزيع	**الأمان** قدرة النظام القائم على استقبال أحمال جديدة – التحكم في الفولتية والسعة الحرارية **الكفاية** التنسيق مع شبكات التوزيع الصغيرة ومع التخطيط للتوليد خارج الشبكة
التخزين	استغلال خزانات التوليد المائي قد يكون في التخزين قصير المدى حل للتقلبات قصيرة المدى للطاقة المتجددة المتغيرة
جانب الاستهلاك	**المرونة** استجابة جانب الطلب في القطاع الصناعي والطلب الكلي النمو الاستراتيجي للأحمال

4.5 د: النظم ذات الأحجام والاستهلاك المحدود، والمساهمة المحدودة للطاقة المتجددة

تمثل الفئة **د** الدول التي لها نظم طاقة كهربائية صغيرة (أقل من 5 تيرا وات ساعة) واستهلاك محدود للأفراد يقل عن 100 كيلو وات ساعة. ومن السمات الأخرى لدول الفئة **د** الانتشار المحدود لخدمات الكهرباء في انحائها (أقل من 50%)، بالإضافة إلى المساهمة المنخفضة نسبياً للطاقة المتجددة في نظم الطاقة المحلية.

تندرج تحت الفئة **د** كل من الصومال، وجنوب السودان، واريتريا، وجيبوتي، بالإضافة إلى ملاوي، ورواندا، وبوروندي، وإلى حد ما كل من أوغندا، واثيوبيا (نصيب منخفض للفرد من الاستهلاك، ولكن مساهمة كبيرة من الطاقة المتجددة). من الممكن إدراج كل من ليسوتو واسوا تيني في الفئة **د** نسبة لصغر حجم نظم الطاقة الكهربائية فيها. ولكن على كل حال، فإن نسبة انتشار خدمة الكهرباء العالية في أنحاء البلاد قادت لإدراجهما في فئات أخرى. الكونغو الديمقراطية لها معدل منخفض من انتشار خدمات الكهرباء، ولكن مساهمة عالية للطاقة المتجددة في نظام الطاقة الذي هو كبير الحجم نسبياً والكونغو الديمقراطية ليست موضحة في الشكل التوضيحي المرفق.

من السمات الرئيسية التي تتسم بها نظم الطاقة الكهربائية في الفئة **د** هي أنها صغيرة نسبياً الأمر الذي يرشحها لأن تستوعب نظم الطاقة المتجددة المتغيرة في وقت قريب. سيكون من المهم جدولة محطات التوليد من أجل ضمان هوامش احتياطي كافية وفي نفس الوقت تجنب الكثير من التقليص بهدف تسهيل المزيد من التطوير للطاقة المتجددة المتغيرة قليلة التكلفة. يجب أن ينظر إلى محطات الطاقة المتجددة كخيار لأن تكون محطات للأحمال الرئيسية في مكان المحطات



التي تعمل بالوقود الأحفوري، ويجب إعطاء خطوط الربط البيني الأولوية القصوى لتوفير المرونة للنظام.

تتباين الدول التي تندرج تحت الفئة **د** من حيث المساحة والكثافة السكانية وانتشار شبكة نقل الطاقة الكهربائية في الدولة. يجب، كل ما كانت هناك شبكة لنقل الطاقة الكهربائية، التفكير جيداً في الأماكن التي ستقام فيها محطات الطاقة المتجددة. قد لا يتناسب الموقع المثالي من حيث توفر الموارد مع الأماكن التي يكثر فيها الطلب على الكهرباء أو مع الأماكن التي تكون فيها الشبكة ذات سعة كافية. قد تؤثر محدودية سعة شبكة النقل على قرار اختيار مكان إنشاء محطات جديدة. ويجب، في الدول التي بها شبكات نقل غير متطورة، أن يسير بناء خطوط النقل جنباً إلى جنب مع بناء محطات التوليد الجديدة.

يجب أن يتبع الإنتاج المركزي للطاقة الكهربائية إنشاء خطوط نقل بسعات كافية و/أو أن تكون قريبة من أماكن الطلب الجديدة على استهلاك الكهرباء. وأخيراً، فإن التوليد البسيط في أماكن الاستهلاك قد يجابه بمتطلبات فنية مشددة من أجل تقديم خدمات الشبكات مثل التحكم في الفولتية على سبيل المثال للاستخدام الأمثل للسعات المتوفرة في الشبكة القائمة.

تتضمن المسائل التي يجب دراستها بشكل جيد في أنظمة الفئة **د** ما يلي:

الجدول رقم 4-5: المسائل التي يجب النظر فيها في أنظمة الفئة د

جانب الإمداد	**الكفاية** -هامش السعة والوفرة -المرونة والاستعداد للإمداد عند الطلب -الاحتياطي الدوار، ومعدلات صعود خرج التوليد، والقصور الذاتي
النقل	**الأمان** -الازدحام / الاختناقات **القدرة على التكيف والكفاية** -بناء مشروعات النقل الرئيسية -إعطاء فرص الربط البيني أولوية الاهتمام
التوزيع	**الأمان** -قدرة شبكة التوزيع القائمة على استيعاب أحمال جديدة **الكفاية** -التخطيط لتطوير شبكة التوزيع -التنسيق مع شبكات التوزيع الصغيرة ومع التخطيط للتوليد خارج الشبكة
التخزين	اعتبار إنشاء مشروعات الطاقة المتجددة المتغيرة بديلاً لتعزيز الشبكة
جانب الطلب	**المرونة** النمو الاستراتيجي للأحمال

5 المبادئ التوجيهية المنسقة

لمحات رئيسية مختصرة للفصل

- **يجب أن تخضع المشروعات الجديدة للمتطلبات الوظيفية.**
- **تزداد أهمية مرونة الشبكة والقدرة على التحكم بها مع تزايد ارتفاع معدلات انتشار مشروعات الطاقة المتجددة المتغيرة، ويجب وضعها كأولوية في تخطيط الشبكات.**
- **تجعل الطاقات المتجددة الموجودة في أماكن الاستهلاك، مثل الطاقة الشمسية المركبة على الاسطح، سعة الشبكة على المستوى المحلي والاقليمي على درجة كبيرة من الأهمية. يجب أن يكون لمرافق الطاقة الكهربائية منهجاً تفاعلياً لضمان السعة الكافية للشبكة على المستوى المحلي والإقليمي.**
- **يمكن لمغذيات الربط البيني وممرات نقل الطاقة الداخلية أن تلعب دوراً مهماً في إطلاق قدرات الطاقة المتجددة الكامنة في منطقة الشرق الأفريقي والجنوب الأفريقي والمحيط الهندي، ويجب السعي في تحقيقها.**

يتم الوصول إلى الاستخدام الأمثل للموارد في نظم الطاقة الكهربائية عندما يتاح لكل عنصر من عناصر النظام أن يؤدي العمل الذي يجيده على أكمل وجه. إن وجود سعة غير محدودة لشبكة النقل يعني أن الشبكة لن تضع القيود لا على الإنتاج ولا على الطلب. ولكن في الواقع العملي، فإن سعة شبكة النقل هي مورد محدود ومكلف، وزيادة سعة الشبكة ليست هي دائماً الحل الأمثل. ومن أجل الاستخدام الأمثل للشبكة وإتاحة الفرصة للمزيد من الإنتاج من المصادر المتجددة، فإن كل العناصر في نظام الطاقة يجب أن تتناغم معاً في الأداء.

يستطيع العملاء، في جانب الطلب، أن يكيفوا أوضاعهم طالما أن إمداد خدمة الكهرباء له القدرة على أداء ما هو مفترض عليه تأديته. يمكن إرجاء بعض المهام، على سبيل المثال، مضخات التسخين، وسخانات المياه، وشحن بطاريات السيارات الكهربائية، إلى الأوقات التي لا تكون فيها الأحمال عالية في الشبكة. يمكن إضافة مستهلكين جدد، إلى حد ما، في المواضع التي تكون جيدة للشبكة.

يمكن *لإنتاج* الكهرباء المساهمة بخصائص متعددة يمكنها أن تفيد نظام الطاقة الكهربائية. تعتمد الطاقات المتجددة المتغيرة على توفر التشعيع الشمسي، مثلاً، والرياح من أجل أن تنتج الطاقة الكهربائية، ولكنها أيضاً تستطيع، إذا تم تصميمها بطريقة جيدة، المساهمة في تنظيم الفولتية. يمكن التقليل من مشكلة عدم القدرة على التنبؤ في جانب الطاقة المتجددة المتغيرة بالتركيز على تجويد الأرصاد الجوية. ويمكن للمحطات الحرارية المساهمة بالأحمال الأساسية طالما توفر الوقود. وبإمكان محطات التوليد المائي المساهمة بالدرجة العالية من الاستعدادية لتوفير الإمداد الكهربائي عند الطلب، ولكنها قد تتعرض لمواسم الجفاف.

يجب الحرص على البناء الجيد لشبكات *النقل والتوزيع* بحيث تنقل الطاقة من حيث مواقع انتاجها إلى مواقع الطلب لاستهلاكها. تغني السعات الكافية لشبكات النقل كل منطقة أو دولة عن الحاجة للاستثمار المكلف في زيادة التوليد لتغطية احتياجاتها. وبإمكان المناطق التي تزخر بموارد الطاقة المتجددة أن تزود المناطق ذات الطلب العالي للطاقة بالإمداد الكهربائي.

من الممكن للتخزين أن يكون طريقة جيدة لإتاحة الاستخدام الأمثل للتوليد الموجود وللشبكة. يمكن للتخزين أن يساعد في إرجاء الاستثمارات في التوليد وفي تعزيز شبكة النقل، وذلك بتقديم خدماته لتشغيل النظام ولمولدي الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح.

يجب أن تكون نظم الطاقة الكهربائية في المستقبل أكثر ذكاءً وقابلية للتكيف. سيكون الحصول على البيانات والقياسات وإمكانية تحليلها مهماً من أجل بناء نظم طاقة كهربائية مرنة وقادرة على استخدام الموارد بأمثل الطرق المتاحة.

يُنصح واضعي السياسات والمنظمين ومشغلي النظم أن يتخذوا منهجاً متكاملاً تجاه نظم الطاقة الكهربائية التي تزداد تكاملاً بصورة مستمرة، وذلك حتى تستطيع إطلاق إمكانات سعة الشبكات واستغلالها بهدف اتاحة اندماج نظم الطاقة المتجددة المتغيرة بصورة أكبر. فيما يلي من الفصول يتم تقديم العناصر الرئيسية لمثل ذلك النهج.

5.1 العنصر الرئيسي الأول: تنفيذ المتطلبات الوظيفية في أكواد شبكات النقل

بالرغم من أن التشابه بين نظم الطاقة الكهربائية في بعض الخصائص يجعلنا نصفها وندرجها في فئات مشتركة، إلا أنه لا توجد شبكة كهرباء مشابه بدرجة كاملة لشبكة أخرى. وبغض النظر عن الخصائص، فإن الحاجة إلى التشغيل الآمن لشبكة الربط البيني للكهرباء وسلامتها هو هم مشترك بين كل الدول والمناطق. وبتركيزها على المتطلبات الوظيفية بدلاً عن المواصفات الفنية الجامدة، تكون المرافق قد وضعت نفسها في الوضع المستقبلي المناسب حيث أن نظم الطاقة الكهربائية تزداد ارتباطاً مع بعضها كل يوم وتزداد تعقيدا وتزداد تحولاً إلى الطاقات المتجددة.

يضمن اسناد تقييم تنفيذ عمليات توصيل جديدة للمتطلبات الوظيفية الالتزام بشروط نظام الطاقة على الدوام قبل السماح بإضافة توليد جديد إلى الشبكة. ويتمثل العيب في هذا النهج في أنه يستند غالباً إلى دراسات شاملة وتوثيق قبل السماح بإضافة توصيلات جديدة.

قد تكون مشروعات الطاقة المتجددة مشروعات كبيرة وذلك مثل مشروعات طاقة الأرض الحرارية، أو مشروعات الطاقة الشمسية الكهروضوئية، أو مشروعات طاقة الرياح، أو مشروعات التوليد المائي. أو قد تكون مشروعات صغيرة موزعة في أماكن استهلاكها مثل مشروعات التوليد المائي الصغيرة أو الطاقة الشمسية الكهروضوئية على أسطح المباني. إن فرض نفس المتطلبات، من دراسات وتوثيق، التي تفرض على المشروعات الكبيرة على المشروعات الصغيرة قد يعيق تطوير مشروعات الطاقة المتجددة الصغيرة الموزعة في أماكن استهلاكها. وإن تخصيص متطلبات مختلفة استنادا إلى حجم المشروع هو نهج جيد من أجل تسهيل نمو الطاقة المتجددة، وخصوصاً على مستوى مشروعات الطاقة المتجددة الصغيرة الموزعة في أماكن استهلاكها. المثال الجيد لذلك هو الطاقة الشمسية على الأسطح. ليس معقولاً أن تفرض نفس الشروط المفروضة على مشروع توليد مائي إنتاجه في حدود آلاف الميغا وات على مشروع ألواح طاقة شمسية مركبة على سطح تنتج في حدود الكيلو وات.

نفس المفهوم ينطبق على جانب الاستهلاك، حيث أن عميل في القطاع الصناعي يستهلك أحمال من الكهرباء كبيرة ومعقدة موصلة مع شبكة نقل الطاقة وتؤثر عليها بدرجة كبيرة، من غير المعقول أن تطبق عليه نفس المتطلبات التي تطبق على مستهلك صغير.

على واضعي السياسات عمل ما يلي:

- تحديد المسؤولية المنوطة بكل طرف عند عمل وتقييم التوصيلات الجديدة لشبكة الكهرباء.
- توفير الإطار التشريعي الذي يضمن للمشغلين والمنظمين تعديل التصميمات وقوانين التوصيل والإجراءات التشغيلية من أجل اتاحة معدلات كبيرة من مساهمة الطاقة المتجددة من غير التفريط في أمان النظام.

يجب على المنظمين أو مشغلي النظام أو كليهما عمل ما يلي:

- التأكد من أن قوانين التوصيل بالشبكة، واتفاقات التوصيل البيني كلها تستند إلى المتطلبات الوظيفية.
- مراجعة وتعديل إجراءات التشغيل بهدف اتاحة مساهمة الطاقة المتجددة بنسب عالية وفي نفس الوقت التأكد من التشغيل السليم والأمن للنظام.
- التأكد من ان المتطلبات يتم تحديثها بالتوافق مع تطورات التكنولوجيا وتبنيها لتلائم خصائص نظام الطاقة الكهربائية الوطني على الوجه الأكمل.
- التعاون مع المرافق الأخرى لضمان وضع المتطلبات الوظيفية المنسقة حيثما كان ذلك مطلوباً.

5.2 العنصر الرئيسي الثاني: تنسيق جهود التخطيط

بالرغم من ان الفقرة السابقة قد طرحت مسألة تخفيف المتطلبات على توصيل الأحمال البسيطة التي لا تؤثر كثيراً على النظام بعكس توصيل الأحمال الضخمة التي لها تأثير كبير على النظام، إلا ان ذلك لا يعني ان المرافق عليها اتباع نهج ردود الأفعال في وضعها للمتطلبات لمشروعات الطاقة الصغيرة الموزعة في أماكن الاستهلاك. إن تقييم القدرة الاستيعابية لشبكة الطاقة الكهربائية لأحمال جديدة بدون إجراء تعديلات، هي مثال للنهج الاستباقي الذي يتيح لمرافق الكهرباء تقييم مشروعات الطاقة الصغيرة الموزعة في أماكن استهلاكها التي عندها تظهر الحاجة إلى إجراء المزيد من الدراسة المفصلة بهدف تجنب المفاجئات المكلفة التي قد تحدث مثل الاضطرار إلى إجراء تعديلات على أجزاء كبيرة من الشبكة المحلية أو الإقليمية.

إن للإبلاغ عن التوليد المحلي القائم أو المخطط له ومتابعته على مستوى التوزيع أهميته لمشغلي النظام في تخطيطهم وقراءتهم لمستقبل العمل على مستوى نظام شبكة النقل. أما على مستوى نظام الطاقة الكهربائية عموماً، فإنه لا تزال هناك حاجة لإجراء التقييمات التقليدية لسعة شبكة النقل، أي كل من الدراسات المحددة للربط البيني لمحطات توليد جديدة والدراسات الأوسع للنظام بهدف ضمان الكفاية والأمان للشبكة على المدى الطويل. ينبغي لهذه الجهود في البحث والتخطيط، على كل حال، أن تعمل على معالجة مسألة ضعف القدرة على التنبؤ التي جاءت مع دخول الطاقة المتجددة المتغيرة. هذا يعني حتمية سير التخطيط طويل الاجل وتقييم التباينات على المدى القصير والتي جرى التقليد على ان يكلف بها التخطيط التشغيلي في طريق التكامل بصورة أكبر.

يجب أن تكون الجهود الدولية جزءاً من تخطيط الشبكة المنسق بهدف تقييم التطوير الأمثل على المستوى الإقليمي. سيلعب التوسع في التطوير في اتجاه نظام ربط بيني إقليمي كامل يشتمل على شبكة نقل ذات سعة كافية عبر الحدود وفي داخل الدولة، دوراً هاماً في فسح المجال لأنظمة الطاقة المتجددة المتغيرة ليتم إدماجها في النظام في كل منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي.

يجب ألا يقتصر التنسيق في جهود التخطيط على قطاع الطاقة الكهربائية فقط. تقوم الوكالة الدولية للطاقة (IEA, May 2019) بإلقاء الضوء على أهمية تنسيق وتوحيد عملية التخطيط في كل قطاعات سوق الطاقة وحتى القطاعات الاقتصادية مثل النقل والصناعة. يجب النظر إلى أي من الأصول التي تستخدم الكهرباء على انها جزء من نظام الطاقة الكهربائية، ويجب وضعها في الحسبان عند إجراء تقييم متكامل لنظام الطاقة. ان اتخاذ قرارات بمعزل عن الآخرين قد يؤدي إلى ضياع الفرص وقصور التنمية.

على واضعي السياسات عمل ما يلي:

- أن يحددوا بوضوح دور مشغلي النظام على المستوى الوطني وعلى المستوى المحلي (مشغلي نظام النقل ومشغلي نظام التوزيع (TSOs and DSOs))
- وضع إطار عمل يوضح حقوق وواجبات أصحاب المصلحة فيما يتعلق بتبادل المعلومات
- التأكد من المشاركة في منابر التعاون الدولية

يجب على المنظمين أو مشغلي النظام أو كليهما عمل ما يلي:

- خلق هياكل للتعاون وتبادل المعلومات فيما بين أصحاب المصلحة المختلفين
- التركيز على التكامل المتزايد ما بين مجهودات التخطيط والتشغيل
- تطبيق منهج تخطيطي نشط
  - يجب المداومة على وضع الخطط مثل الخطط العامة لنظم شبكات الكهرباء، وخطط المصادر المتكاملة أو خطط تطوير الشبكة أو كليهما معاً وذلك على فترات منتظمة
  - يجب أن تكون خطط التنمية المحلية جزءاً لا يتجزأ من الخطة الوطنية لتطوير الشبكة
- المشاركة الفعالة في المنابر الإقليمية للتعاون الدولي فيما بين مشغلي ومنظمي أنظمة الطاقة

5.3 العنصر الرئيسي الثالث: تفعيل المرونة في جميع أجزاء النظام

تزيد أهمية المرونة كلما ازدادت مساهمة الطاقة المتجددة المتغيرة في نظم الكهرباء. يجب تصميم الأطر التنظيمية، والتسويق، وبرامج التحفيز لمكافأة المرونة في كل أجزاء شبكة الكهرباء – سواء كانت في جانب الطلب (مصادر الطاقة الموجودة قرب المستهلك)، والتخزين، والنقل والتوزيع، أو كانت في جانب الإمداد.

تعتبر محطات الكهرباء التقليدية في الوقت الحالي هي المصدر الرئيسي للمرونة في النظام بالنسبة لأنظمة الطاقة الكهربائية الحديثة. ولكن على كل حال، قامت العديد من الدول بتبني إصلاحات في السوق واللوائح لتكسب مرونة في الخدمات من محطات الطاقة المتجددة المتغيرة. تشتمل الأمثلة في ذلك الصدد على تغييرات على قوانين التوصيل التي تتطلب من مشاريع الطاقة المتجددة أن تساهم في خدمات المرونة قصيرة المدى (مثل الاستجابة الأولية لتصحيح التردد) (IEA, May 2019) .

يشهد جانب الاستهلاك تغيرات من الأحمال السالبة إلى مصادر الطاقة الكهربائية الموزعة في أماكن الاستهلاك مصاحبة بالعديد من الحلول الذكية للتحكم في الأحمال، والمزيد من السيارات الكهربائية، ومستهلكين منتجين يقومون بإنتاج الكهرباء محلياً ويستهلكونها. من الممكن أن يكون للمرونة المجتمعة في مصادر الطاقة الموزعة هذه أهمية على مستوى نظام الطاقة. وبالتالي فإن المستهلكين يجب تحفيزهم لاختيار حلول تنتفع منها شبكة الكهرباء بصورة عامة.

تمثل البطاريات، في جانب التخزين، مثال شائع للعناصر التي يمكنها تقديم عدد كبير من خدمات مرونة النظام بصورة آنية.

بالإمكان توفير المرونة للنظام من خلال الحلول التكنولوجية المتقدمة مثل قياس السعة الدينامية القصوى للخط أو من خلال خطوط الطاقة الافتراضية والتي هي عبارة عن بطاريات لتخزين الطاقة تستخدم عند الذروة، أو عن طريق تعزيز سعة الشبكة. تتيح الشبكات القوية المجال لتشارك مصادر المرونة الأخرى فيما بين المناطق. بالنسبة لدول الداخل في منطقة الشرق الإفريقي-والجنوب الإفريقي- والمحيط الهندي، فإن خطوط الربط البيني الإضافية قد توفر لمشغلي النظم فرصة للوصول إلى مجموعة كبيرة من الخيارات في جانب الاستهلاك وفي جانب الإمداد التي ستكون مصدر هام للمرونة في الشبكة.

على واضعي السياسات عمل ما يلي:

- التأكيد على إجراء المراجعات الإلزامية الدورية لسياسات المرونة في النظام (بما فيها أكواد التوصيل) وذلك بهدف مواءمة تسارع التطور التكنولوجي، وضمان أن تدابير المرونة تعتبر بديلاً للتطوير التقليدي للشبكة
- دعم البحوث ومجهودات التطوير، والمشروعات التجريبية، والمشروعات الايضاحية بهدف تشجيع المرونة في نظم الطاقة الكهربائية لديهم وفي المنطقة ككل
- تحديد قواعد واضحة لمكان وقوع الملكية والتشغيل لأنظمة التخزين
- تقديم الحوافز لتقليل التكلفة الأولية للتخزين وجذب الاستثمار في مجال التخزين
- دعم المجهودات التي تتيح لكل المصادر المشاركة في مشروعات المرونة، بما فيها مصادر الطاقة الصغيرة الموزعة في أماكن الاستهلاك

يجب على المنظمين أو مشغلي النظام عمل ما يلي:

- وضع إطار عمل تنظيمي واضح المعالم لملكية وتشغيل أنظمة التخزين
- وضع تصميم للسوق يحفز خدمات المرونة ويشجع الاستثمار
- اعتبار المرونة على الدوام جزء من تخطيط نظام الطاقة الكهربائية كبديل للاستثمار في زيادة سعة الشبكة أو زيادة التوليد
- اكتساب الخبرة عن طريق تطبيق حلول المرونة من خلال المشروعات التجريبية والمشاريع التي تثبت صحة الفكرة

5.4 العنصر الرئيسي الرابع: رقمنة ووضع نظام قرارات لقطاع الطاقة قائم على البيانات

إن المستقبل ليس كهربائياً فقط، وانما هو رقمي أيضاً. تشتمل أنظمة الطاقة الكهربائية الحديثة على كمية كبيرة من البيانات المنتجة والمجمعة. تتيح حلول تكنولوجيا المعلومات والاتصال عمليات المراقبة والجمع المستمرة لكمية مهولة من خصائص نظام الطاقة الكهربائية. قد تشتمل المعلومات على بيانات الأحمال والإنتاج، وفيديوهات المراقبة، واختبارات وعينات من المعدات، وقياسات لتدفقات الطاقة الكهربائية ودرجات الحرارة في خطوط النقل، والفولتية في النظام، وبيانات الأرصاد الجوية.

ستتيح هذه الحلول التكنولوجية المزيد من الديناميكية، والكفاءة، والموثوقية، والاستدامة لنظم الطاقة الكهربائية، على النحو الذي بينته الوكالة الدولية للطاقة في مبادرتها (DEN3) "شبكات الطاقة الرقمية المستندة إلى الطلب". [7] . يوفر التحول الرقمي العديد من الفوائد وقد أصبح من الأدوات الهامة والمتطلبات للحفاظ على أمن الإمداد، وضمان المرونة، وإتاحة الحلول الاقتصادية لأنظمة الطاقة في المستقبل.

كلما ازداد تطور أنظمة الطاقة، وزادت اللامركزية، وزاد التحول الرقمي، زاد معها جمع البيانات وقد يتيح الاستخدام النشط للبيانات للموظفين الفنيين اتخاذ قرارات أفضل فيما يتعلق بالتخطيط والتشغيل، وبالتالي الاستخدام الأمثل لإمكانات الشبكة القائمة. ومن الأمثلة لذلك ما يلي:

- بإمكان الصيانة التنبؤية والكشف عن الأعطال المستندة إلى تحليل البيانات المستقاة من أجهزة قياس متقدمة أن تحسن مستوى الأمان في نظام الطاقة الكهربائية.
- قد يسمح جمع واستخدام البيانات المتعلقة بالإنتاج والاستهلاك، مقرونة مع البيانات المستندة إلى تنبؤات الطاقة المتجددة، للمشغلين بتحسين أنشطة حقن الطاقة في الشبكة وجدولتها.
- من الممكن لقياسات حرارة خطوط شبكة النقل مقرونة مع تاريخ سريان الطاقة الكهربائية فيها وقياسات الظروف المحيطة، أن تساعد على تحديد وتوقع سعة خطوط شبكة النقل بصورة أكثر دقة.

بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام حلول اللوغاريتمات والذكاء الاصطناعي قد يساعد في تحسين الجهود وأتمتها لزيادة الفائدة من الكمية الكبيرة من البيانات التي يمكن جمعها من أنظمة الطاقة الكهربائية. قد تحتاج مرافق الكهرباء، لصياغة حلول مناسبة، إلى التعاون مع شركاء التكنولوجيا الذين هم ليسوا، في العادة، جزءاً من قطاع الكهرباء، ولكنهم يتمتعون بالخبرات في مجالات الحساسات، والمحركات، والذكاء الاصطناعي، وإدارة البيانات.

على واضعي السياسات عمل ما يلي:

- وضع سياسات للتحول الرقمي على المدى الطويل تشمل قطاع الكهرباء
- تسهيل قيام منصات رقمية وبرامج مشتركة بين القطاعات
- دعم البحوث ومجهودات التطوير

يجب على المنظمين أو مشغلي النظام عمل ما يلي:

- وضع المعايير لتنفيذ واستخدام المنصات الرقمية في قطاع الكهرباء
- تقييم وتقديم الأنظمة الحاسوبية والمعدات اللازمة
- المراجعة والمراقبة المستمرة لمتطلبات معدات مراقبة البيانات وحلول تكنولوجيا المعلومات والاتصالات بالنسبة للتوصيلات الجديدة
- مواصلة التعاون الوثيق والجهود المشتركة مع قطاع تكنولوجيا المعلومات والاتصالات بالإضافة لقطاع الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات

[7] أطلقت الوكالة الدولية للطاقة مبادرة مشتركة بين الوكالات تمتد لأربعة أشهر، شبكات الطاقة الرقمية المستندة إلى الطلب (3DEN). تعمل مبادرة 3DEN على تسريع التقدم في عملية تحديث نظم الطاقة والاستفادة المثلى من مصادر الطاقة المتجددة الموزعة في مناطق استهلاكها، وذلك من خلال السياسات واللوائح والارشادات بشأن التكنولوجيا والاستثمار.
https://www.iea.org/areas-of-work/promoting-digital-demand-driven-electricity-networks

6 المراجع

جياكومو فالشيتا، ن س -ج (8 يوليو، 2021). منصة M-LED: تحسين تقييم الطلب على الكهرباء في المجتمعات التي تعيش في فقر كهربائي. *أوراق في البحث المناخي، المجلد 16، رقم 7 (IOP للنشر المحدودة).*

هابوستاد، ل ف (2021). *تقييم التشكيلة المثالية من كهرباء الطاقات المتجددة المتغيرة التي ستدمج في نظام الطاقة - دراسة حالة زامبيا*. تروندهايم: الجامعة النرويجية للعلوم والتكنولوجيا.

مبادرة القرن الأفريقي. (فبراير 2021). *وصف للمشاريع ذات الأولوية والجهوزية*. مبادرة القرن الأفريقي.

الوكالة الدولية للطاقة (مايو 2019). *موقف تحول أنظمة الطاقة 2019: المرونة في نظم الطاقة*. الوكالة الدولية للطاقة.

الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (2020). *تلخيص لوضع الابتكار: قياس الحمولة القصوى للخط (*dynamic line rating*)* أبو ظبي: الوكالة الدولية للطاقة المتجددة

الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (2020). *خطوط الطاقة الافتراضية*. أبو ظبي: الوكالة الدولية للطاقة المتجددة.

الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (2021). *التخطيط وآفاق الطاقة المتجددة: الشرق والجنوب الأفريقيين*. أبو ظبي: الوكالة الدولية للطاقة المتجددة.

الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (نوفمبر 2018). *مرونة أنظمة الطاقة من اجل تحول الطاقة. الجزء الأول: نظرة عامة لواضعي السياسات*.

ميركادوس أ، ي - بريدج، وريف - ي (2015). *تحديد التوليد الأمثل ومعايير الكفاية في نظام الطاقة لسوق الطاقة الكهربائية الدولي*. بروكسل: المفوضية الأوروبية، الإدارة العامة للطاقة، السوق الداخلية للطاقة.

مجموعة أكسفورد للأعمال وOCP . (ابريل 2021). *الزراعة في أفريقيا 2021*. مجموعة أكسفورد للأعمال.

الطاقة في افريقيا (2018). *خارطة طريق نقل الطاقة في أفريقيا*.

بروبها كوندور، ج ب (مايو، 2004). تعريف وتصنيف استقرار نظام الطاقة، فريق عمل مشترك من جمعية منهدسي الكهرباء والالكترونيات واللجنة الإقليمية لنظم الطاقة الكهربائية IEEE/CIGRE حول مصطلحات وتعريفات الاستقرار. معاملات جمعية منهدسي الكهرباء والالكترونيات حول أنظمة الطاقة، المجلد 19، رقم 2.

راووفي ه، فاهيديناساب، ف، ومهران، ك (نوفمبر 2020). *قياسات الدرة على التكيف لأنظمة الطاقة: استعراض شامل للتحديات والتوقعات*. الناشر MDPI، الاستدامة 2020، 12، 9698.

روميرو س م، وهيوز و (فبراير 2015). رفع مستوى الطاقة المتجددة المتغيرة - خيارات لدمج الشبكة باستخدام الغاز الطبيعي وتخزين الطاقة، تقرير فني 15/006. برنامج المساعدة الإدارية لقطاع الطاقة (ESMAP).

سبولدينغ - فيشر، ر، جويس، ب، وونكلر ه (2017). *تغير المناخ والطاقة الكهرومائية في مجمع الطاقة بالجنوب الأفريقي وحوض نهر الزامبيزي: التأثيرات على مستوى النظم وانعكاسات السياسة*. سياسات الطاقة، المجلد 103، الصفحات 84 - 97.

برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) (16 أكتوبر 2018). *أكثر من مجرد طاقة نظيفة: طاقة الرياح والطاقة الشمسية في الصحراء قد تزيد نسب هطول الأمطار في الساحل*. تم استرجاعه من الموقع الالكتروني:
https://www.unep.org/news-and-stories/story/more-just-clean-energy-wind-and-solar-sahara-could-increase-rainfall-sahel

شعبة الإحصاء بالأمم المتحدة - قسم إحصاءات الطاقة. (فبراير 2021). *قاعدة بيانات إحصاءات الطاقة 2018: ملاحظات حول المصادر*. نيويورك

شعبة الإحصاءات بالأمم المتحدة (أغسطس 2021). بيانات الأمم المتحدة/عرض السجل/ اجمالي الكهرباء (الكهرباء - الاستهلاك الكلي للطاقة). تم استخلاصه من الموقع الالكتروني "data.un.or :"
http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3aEL%3btrID%3a12

شعبة الإحصاءات بالأمم المتحدة (أغسطس 2021). بيانات الأمم المتحدة. تم استخلاصه من الموقع الالكتروني data.un.org :http://data.un.org/Default.aspx

شعبة الإحصاءات بالأمم المتحدة (أغسطس 2021). بيانات الأمم المتحدة /عرض السجل/ اجمالي الكهرباء (الطلب الإجمالي على الكهرباء). تم استخلاصه من الموقع الالكتروني data.un.org:
http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=cmID%3aEL%3btrID%3aGA

البنك الدولي (2021). *امكانية الحصول على خدمة الكهرباء (النسبة المئوية من السكان) بيانات* تم استخلاصها من الموقع الالكتروني data.worldbank.org:
https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?end=2019&start=1990

وو، ف. وكوماغاي، س. (1982). *حالات الأمان الثابتة لمناطق أنظمة الطاقة*. معاملات جمعية مهندسي الكهرباء والالكترونيات حول الدوائر والأنظمة، المجلد 29 رقم 11، الصفحات 702 - 711.

Appendix A البيانات التي تم استخدامها في تصنيف الدول

يشتمل الجدول أدناه على البيانات التي تم استخدامها كخلفية لاختيار الدول في الفئات التي اقترحت لها. البيانات تسري لعام 2018، حيث أنها أحدث بيانات مكتملة. البيانات تم جمعها من قاعدة بيانات البنك الدولي حول انتشار خدمات الكهرباء حول العالم, (World Bank, 2021) وشعبة الإحصاءات بالأمم المتحدة (data.un.org) (United Nations Statistics Division - Energy Statistics Section, February 2021).

الدولة	نسبة انتشار خدمات الكهرباء	نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء [kWh]	نسبة الطاقات المتجددة%	السكان (‘1000)	إجمالي استهلاك الكهرباء [TWh]
مدغشقر	26 %	69	25 %	27691	1,92
موريشيوس	99 %	2083	16 %	1272	2,65
سيشل	100 %	4854	6 %	98	0,476
جزر القمر	82 %	68	0 %	870	0,0593
ليبيا	67 %	2562	0 %	6871	17,6
جنوب أفريقيا	85 %	3464	12 %	59309	205,4
مصر	100 %	1618	7 %	102334	165,6
تونس	100 %	1396	8 %	11819	16,50
بوتسوانا	68 %	1364	0 %	2352	3,21
ايسواتيني	74 %	1141	*38 %*	*1160*	*1,32*
ناميبيا	54 %	1641	76 %	*2541*	*4,17*
ليسوتو	47 %	377	99 %	*2142*	*0,807*
أنغولا	45 %	308	54 %	*32866*	*10,1*
السودان	52 %	312	49 %	*43849*	*13,7*
زمبابوي	41 %	572	45 %	*14863*	*8,51*
زامبيا	40 %	702	83 %	*18384*	*12,9*
الكونغو الديمقراطية	19 %	111	95 %	*89561*	*9,97*
كينيا	61 %	162	57 %	*53771*	*8,70*
تنزانيا	35 %	107	37 %	*59734*	*6,37*
موزامبيق	31 %	407	83 %	*31255*	*12,7*
اثيوبيا	45 %	*79*	*98 %*	*114964*	*9,09*
رواندا	35 %	52	53 %	*12952*	*0,668*
أوغندا	43 %	67	80 %	*45741*	*3,07*
الصومال	34 %	22	0 %	*15893*	*0,35*
جنوب السودان	6 %	40	9 %	*11194*	*0,446*
اريتريا	49 %	114	9 %	*3546*	*0,404*
ملاوي	18 %	79	68 %	*19129*	*1,51*
جيبوتي	61 %	475	0 %	*988*	*0,469*
بوروندي	11 %	23	76 %	*11891*	*0,276*
مصدر البيانات	*البنك الدولي*	*الأمم المتحدة*	*الأمم المتحدة*	*الأمم المتحدة*	*الأمم المتحدة*

CONTACT INFORMATION

Suite 201

First Floor Warrens Court

48 Warrens Industrial Park

Warrens

St. Michael, Barbados

T - +1-246-622-1783

hello@cpcs.ca

www.cpcs.ca