Algorithms for Quantification Evaluation Criteria for the Effect of Integration of a Distribution System with Distributed Generation Units

Dr. Faisal Shaaban[*]
Dr. Tarek Kherbik[**]
Sinan Razouk[***]

(Received 24 / 2 / 2020. Accepted 17 / 5 / 2020)

□ ABSTRACT □

The expansion of electrical energy loads led to the expansion of the electricity network, and the increased transmitted capacity caused an increase in the losses of electrical energy as well as the difference in the voltage levels and this represents a permanent problem for the performance of the electrical distribution system that must be dealt with. In the distribution system, as well as maintaining the levels of effort when transferring a large amount of energy, one of these methods was the use of small energy sources (called distributed generation) which include renewable energy sources and others in distribution systems and are closer to the loads. Distributed generation has direct effects on the parameters of voltage and power flow when integrated with the network, and to verify these effects it was necessary to make adjustments to the traditional algorithms adopted in methods of analyzing power flow as the best tool to evaluate the technical performance of electrical networks with distributed generation in the steady state, this research begins Defining distributed generation, classifying its patterns and methods of integrating its units with the distribution system, then provides a full explanation of the quantitative evaluation criteria of the impact of distributed generation on the technical performance of the distribution system and explains the modifications in the technique of analyzing the power flow of distribution systems with the following D distributor, It also aims to find the best capacities and locations for distributed generators that will be applied to distribution systems to achieve the lowest electrical loss and improve the voltage by setting quantitative evaluation algorithms for the effect that the distribution system integrates with distributed generation units.

Keywords: distributed generation networks, renewable energy sources, load flow, effected distributed system, Algorithms for quantification evaluation criteria.

[*]**Professor, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
[**]**Professor, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
[***]**Postgraduate Student (Ph.D.), Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

خوارزميات التقويم الكمي للتأثير الذي يسببه تكامل نظام التوزيع مع وحدات التوليد الموزع

د. فيصل شعبان*

د. طارق خيربك**

سنان رزوق***

(تاريخ الإيداع 24 / 2 / 2020. قُبِل للنشر في 17/ 5 / 2020)

□ ملخّص □

أدى اتساع أحمال الطاقة الكهربائية إلى توسع شبكة الكهرباء، كما أن زيادة القدرة المرسلة تسببت في زيادة الضياعات في الطاقة الكهربائية وكذلك الاختلاف في مستويات الجهد وهذا يمثل مشكلة دائمة لأداء نظام التوزيع الكهربائي لابد من التعامل معها، وقد تم تجريب وتطوير أجهزة وتقنيات مختلفة لتقليل الفقد الكهربائي في نظام التوزيع، وكذلك الحفاظ على مستويات الجهد عند نقل كمية كبيرة من الطاقة، كانت إحدى هذه الطرق هي استخدام مصادر الطاقة الصغيرة (التي تسمى التوليد الموزع) والتي تشمل مصادر الطاقة المتجددة وغيرها في أنظمة التوزيع وتكون أقرب إلى الأحمال. التوليد الموزع له تأثيرات مباشرة على محددات الجهد وجريان الاستطاعة عند تكامله مع نظام التوزيع، للتحقق من هذه التأثيرات كان لابد من إجراء تعديلات على الخوارزميات التقليدية المعتمدة في طرق تحليل سريان الاستطاعة كأفضل أداة لتقويم الأداء الفني للشبكات الكهربائية ذات التوليد الموزع في الحالة الثابتة، قمنا في هذا البحث بتعريف التوليد الموزع وتصنيف أنماطه وطرق تكامل وحداته مع نظام التوزيع، ثم قدمنا شرحا وافيا عن معايير التقييم الكمي لأثر التوليد الموزع على الأداء الفني لنظام التوزيع وشرح التعديلات في تقنية تحليل سريان الاستطاعة لأنظمة التوزيع ذات التوليد الموزع، كما يهدف إلى إيجاد أفضل السعات والمواقع للمولدات الموزعة التي سيتم تطبيقها على أنظمة التوزيع لتحقيق أدنى فقد كهربائي وتحسين للجهد من خلال وضع خوارزميات التقويم الكمي للتأثير الذي يسببه تكامل نظام التوزيع مع وحدات التوليد الموزع.

الكلمات المفتاحية: شبكات التوليد الموزع – الطاقة المتجددة –سريان الحمولة – أنظمة التوزيع الفعالة – خوارزميات التقويم الكمي.

* **أستاذ – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

** **أستاذ – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

*** **طالب دراسات عليا (دكتوراه) – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

مقدمة:

يحول التوليد الموزع نظام التوزيع من نظام سلبي (غير فعالPassive) كما هو الحال في نظم التوزيع الكهربائية التقليدية، إلى نظام توزيع فعال (Active) نظرًا لأن الاستطاعة المحقونة في شبكة التوزيع يمكن أن تؤثر في نمط تدفق الطاقة فيها [1]، إن الإدارة المتقدمة لنظام التوزيع الفعال تتمثل بالقدرة على الحفاظ على موثوقية واستقرار وأمن مكونات النظام في ظل اضطرابات متوقعة في الجهد وانعكاس محتمل لتدفق السريان ناتج عن تشبيك أو عزل مصادر التوليد الموزع ذات تقنيات التوليد المختلفة وكذلك عشوائية الأحمال، وهذا ما لم ولن يكون باستطاعة أي شبكة توزيع تقليدية مواجهة هذا الأثر، فبالإضافة للتحديات التي تواجه إدارة منظومة التوزيع التقليدية كونها تمثل أنظمة واسعة ومعقدة صعبة التحكم والإدارة والتحليل فهي تصمم كشبكات حلقية بسيطة ولكن أثناء العمل يمكن أن تصبح شعاعية بسبب الأعطال أو عمليات الصيانة إضافة للتوضع المعقد للأحمال وغير المعلوم بشكل تام وصعوبة الحصول على قياسات في وقت واحد من جميع الأحمال، فإن التحديات المضافة لإدارة نظم التوزيع الفعالة تتمثل بالحفاظ على مستويات الجهد عند تشبيك موارد الطاقة الموزعة مع النظام وتفعيل برامج إدارة الطلب على الطاقة من جهة الأحمال لضمان التوازن بين الطاقة المولدة من مصادرها المختلفة والأحمال[2]. في هذا البحث سيتم التركيز على أدوات النمذجة والتحليل كأحد أهم العناصر الأساسية في الإدارة المتقدمة لنظم التوزيع الفعالة عبر نماذج رياضية محدثة بناء على خوارزميات حل أكثر دقة تهدف إلى تقييم أثر التوليد الموزع على محددات أداء الشبكة مثل الجهود، والتيارات، وتدفقات القدرة الفعلية والردية في نظام تحت ظروف تحميل معينة وذلك لضمان أن جميع شبكات الطاقة تعمل ضمن حدود التشغيل الخاصة بها وأن جهود البارات تكون ضمن الحدود المقبولة عند تكامل أنظمة التوزيع مع وحدات التوليد الموزع.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من خلال إعداد خوارزمية تلبي متطلبات حل معادلات سريان الاستطاعة لأنظمة التوزيع الكهربائية ذات التوليد الموزع وتعمل كأداة للحفاظ على موثوقية واستقرار وأمن مكونات نظام التوزيع في ظل اضطرابات متوقعة في الجهد وانعكاس محتمل لتدفق السريان ناتج عن تشبيك أو عزل مصادر التوليد الموزع، إذ صممت على نحو يمكن تطبيقها على أي نظام توزيع متعدد مستويات التوتر ولأجل تقنيات مختلفة للتوليد الموزع المتجدد، الأمر الذي يشكل قاعدة انطلاق لبناء حزمة برمجية تطبيقية متكاملة تتيح إمكانية تمثيل الشبكات الكهربائية ذات التوليد الموزع على الحاسب الالي ثم نمذجة سريان الحمولة عند تكاملها مع وحدات التوليد الموزع. كما تكمن أهمية هذا البحث في إعداد خوارزمية أخرى تعتمد مؤشرات التقويم الكمي في إيجاد أفضل السعات والمواقع للمولدات الموزعة التي سيتم تطبيقها على أنظمة التوزيع لتحقيق أدنى فقد كهربائي وتحسين للجهد.

يهدف هذا البحث إلى

- تحديد معايير ومؤشرات التقويم الكمي لأثر التوليد الموزع على أنظمة التوزيع الكهربائية وإنجاز الصيغ الرياضية لها.
- تطوير خوارزميات الحل التقليدية من أجل تحليل تدفق الطاقة للشبكات الكهربائية ذات التوليد الموزع كأفضل أداة لتقويم الأداء الفني للشبكات الكهربائية قبل وبعد التكامل مع وحدات التوليد الموزع.
- إعداد خوارزمية تمكن من العثور على المكان الأمثل والسعة المثلى للتوليد الموزع التي تضمن أفضل أداء فني لنظام التوزيع الكهربائي ذو التوليد الموزع.

طرائق البحث ومواده:

اعتمدت طريقة البحث على:

- إمكانية تطوير أنظمة توزيع الطاقة الكهربائية الحالية. حيث خضعت الدراسات الإضافية في هذا القسم إلى تعريف التوليد الموزع وتصنيف أنماطه وطرق تكامل وحداته مع نظام التوزيع ومراجعة بعض الأفكار الأساسية من قبل بعض الباحثين المهتمين بهذه التقنية.
- تطوير نماذج النظام وطريقة حساب سريان الحمولة باستخدام برمجيات قائمة للتحليل، طريقة (نيوتن–رافسون). مناقشة النظرية هنا حول حساب سريان الحمولة لأنظمة التوزيع الفعالة.
- الإدارة المتقدمة لأنظمة التوزيع الفعالة. حيث سيتم التركيز في هذا البحث على أدوات النمذجة والتحليل وهي نماذج رياضية محدثة بناء على خوارزميات حل أكثر دقة تلبي متطلبات الإدارة المتقدمة لشبكات التوليد الموزع.
- إعداد خوارزميات التقويم الكمي لأثر التوليد الموزع على الأداء الفني لأنظمة التوزيع المضيفة.

تعريف التوليد الموزع

لا يتوافر حاليًا إجماع على تعريف دقيق للتوليد الموزع. فمجموعة العمل المتخصصة بالتوليد الموزع للمؤتمر الدولي لأنظمة التوتر العالي الكبيرة (CIGRE) تعرفه بأنه يشمل وحدات التوليد ذات الاستطاعة من 100 Mw – 50التي ترتبط عادة بشبكة التوزيع والتي لا يجري التخطيط لها والتحكم بها مركزيًا[3] .

بينما تعد (IEEE) بدورها التوليد الموزع أنه التوليد الكهربائي من قبل وحدات هي أصغر بشكل كاف من محطات التوليد المركزية بحيث يمكن وصلها بأية نقطة في منظومة القدرة[4] . وفي كل الأحوال هناك سمات عامة للتوليد الموزع متفق عليها تتلخص باعتباره عملية توليد الطاقة الكهربائية، الحرارية أو الميكانيكية في الأماكن التي يتم استهلاكها وذلك باستخدام منابع الطاقات المتجددة ومنابع الطاقات المركبة الثنائية والثلاثية cogeneration)، (trigeneration باستطاعة توليد تبدأ من بضع Kw إلى عشرات الـ Mw غالبا ما تكون موصولة بنظام التوزيع.

مصادر الطاقة في التوليد الموزع

تشغل السياسة المتعلقة بأمن الطاقة حيزاً كبيراً من الأهمية في معظم بلدان العالم لما في ذلك تأثير كبير على مختلف جوانب الحياة في تلك البلدان، إذ إن معظم الموارد الطبيعية وخاصة الوقود الأحفوري يخضع لعملية تخطيط وترشيد في الاستهلاك كون هذه الثروة ملكا ليس فقط للجيل الحالي بل لأجيال متعاقبة، ومن هنا بدأ التخطيط ومنذ عشرات السنين للحفاظ على الثروات الباطنية وبالقدر الكافي لتستفيد منها الأجيال القادمة[5]. واتجهت الأبحاث نحو توليد الطاقة الكهربائية من مصادر الطاقة الطبيعية المتجددة ومنذ ما يقل عن عشر سنوات يشكل توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة نسبة % (30 – 10) من مجموع التوليد الكلي للطاقة الكهربائية في معظم البلدان. ونظرًا للانخفاض المتسارع في الكلفة وترافق ذلك مع النمو المضطرد في الإنتاج، من المتوقع أن يشهد العقدان القادمان تزايدًا سريعًا لتطبيقات توليد الكهرباء بواسطة نظم الخلايا الشمسية والمزارع الريحية على الصعيد العالمي سواء في الدول المتطورة أو في الدول النامية. النمو الأسرع في التكنولوجيا المتجددة هي تكنولوجيا طاقة الرياح إذ ازدادت الاستطاعة المركبة حول العالم من 12Gw عام 2000 إلى 93Gw عام 2007. ومن المتوقع أن تبلغ 364Gw حسب التوقعات المتشائمة و1129Gw حسب التوقعات المتفائلة. كما نمت تطبيقات نظم الخلايا الشمسية من 100MWp عام 2000 إلى 9.3GWp في نهاية عام 2007. كانت حصة النظم الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة العامة من الإجمالي قرابة 82% أي 7.6GWp [6],[7].

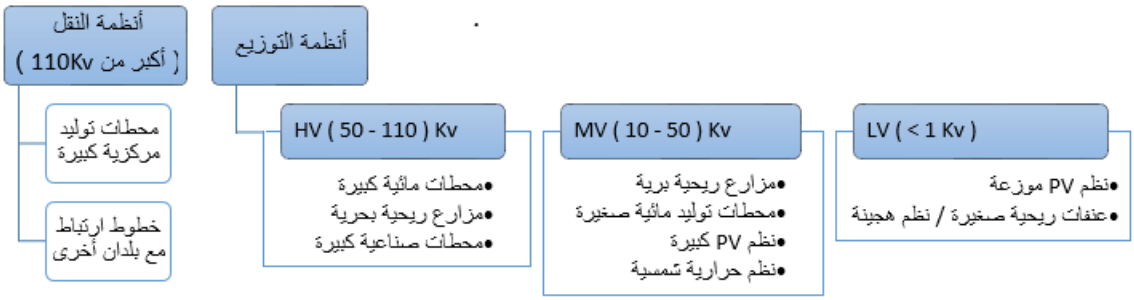
فيما ينمو إسهام التوليد المتجدد الموزع في ميزان قطاع الكهرباء، ربما تشكل تأثيراتها في تشغيل الشبكات المضيفة عائقا أمام التوسع المستقبلي لها إذا لم تعالج في الوقت المناسب، إذ أن التوليد من مصادر الطاقات المتجددة يعدّ المكون الرئيس للتوليد الموزع.

مستويات التوتر لنظام التوزيع

تربط معظم وحدات التوليد الموزع إلى شبكات التوزيع والتي يمكن تصنيفها حسب النظم العالمية من حيث مستوى التوتر إلى [8]:

- شبكة التوزيع عالية التوتر HV: مستويات التوتر النموذجية هي 50–110 kV
- شبكة التوزيع متوسطة التوتر MV: مستويات التوتر النموذجية هي 10–50 kV
- شبكة التوزيع منخفضة التوتر LV: مستويات التوتر الأقل من 1000 V

في الواقع تتغير مسميات مستويات التوتر وحدودها من بلد إلى آخر، يبين الشكل(1) مستويات التوتر لنظام توزيع كهربائي نموذجي ونقاط وصل المولدات الموزعة المتجددة.



الشكل(1): نقاط وصل المولدات الموزعة حسب مستويات التوتر لنظام القدرة الكهربائي.

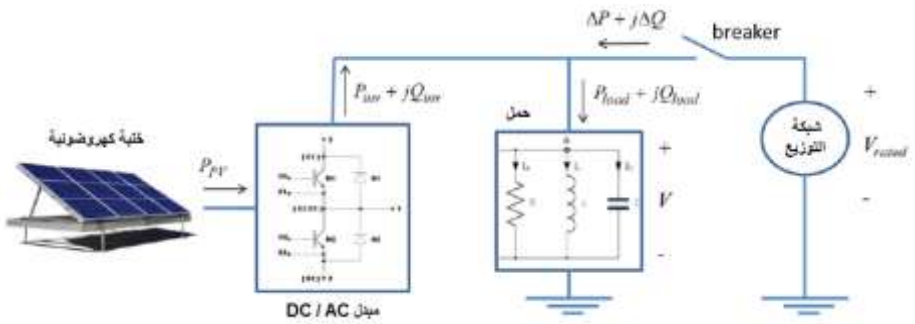
أنماط ربط وحدات التوليد الموزع مع الشبكة

يتم كهربائيًا ربط المولدات الموزعة المتجددة بنظام التوزيع إما بشكل مباشر كحالة ربط مولد تحريضي تقليدي إلى محول قدرة، أو بشكل غير مباشر عبر مبدل DC–AC (كما هو حال جميع أنظمة الطاقة الشمسية) أو مبدل AC–DC–AC (كحالة بعض المولدات الريحية).

الطاقة الفوتوفولتية أو الفوتوضوئية (PhotoVoltaic) أو اختصارا (PV) تستخدم في توليد الكهرباء بشكل مباشر وفيها تقوم الألواح الشمسية بتحويل ضوء الشمس إلى تيار كهربائي، تتكون بشكل عام من نظامين يشتركان فيما بينها بطريقة الوصل عبر مبدل مع شبكات التوزيع المحلية كما هو مبين بالشكل(2)، فيما تختلف بآلية عملها، فيما يلي نقدم شرحا مختصرا يوضح الفرق بين أنظمة عملها[9]:

1 – أنظمة طاقة فوتوفولتية متصلة بالشبكة (Grid–connected PV plants): يتم تغذية الطاقة المتولدة من الألواح مباشرة إلى شبكة التوزيع أو الأحمال عن طريق مبدل DC – AC. هذه المحطات لا تحوي على بطاريات لتخزين الطاقة الكهربائية فهي تعمل على توليد الطاقة نهارا فقط ونظرا لتغير الطاقة المتولدة من هذه المحطات طوال فترة النهار لا يتم عادة توصيلها مباشرة بالأحمال، حيث يتم قطع الطاقة المولدة من الألواح الشمسية في حال انقطاع الكهرباء في شبكة التوزيع. ويكون الاتصال بالشبكة إما على الجهد المنخفض(220 – 380V, 50Hz) ولا يكون هناك حاجة لتركيب محولات رافعة للجهد. أو على الجهد المتوسط Kv (66 – 11) من خلال محطات التحويل الفرعية التي تغذي شبكات التوزيع المحلي[. إذ أنه عندما تكون وسائل تجميع وتوليد الطاقة من مصادر متجددة موزعة

على مساحة كبيرة، مثلما نجد في حالة توزيع الألواح الشمسية بشكل كبير وواسع فوق أسطح المنشآت والمنازل مثلا، عندئذ يكون الهدف هو ربط مصادر التوليد الموزع مع شبكة التوزيع العامة بالقرب من مراكز التحويل، وبنفس الوقت ربط مصادر التوليد الموزع بشكل مباشر مع المستهلكين (الربط داخل كل منزل أو منشأة). عندئذ يمكن توقع أحد السيناريوهات التالية: 1–الطاقة الكهربائية المتولدة من المحطة تعادل الطاقة المطلوبة من الأحمال (حالة تعادل). 2 – الطاقة المتولدة أقل من الطاقة المطلوبة للأحمال (شبكة التوزيع تعطي طاقة كهربائية للأحمال). 3 – الطاقة المتولدة أكبر من الطاقة المطلوبة للأحمال (المحطة الفوتوفولتية تعطي طاقة كهربائية لشبكة التوزيع) عندها إما يتم تخزين الطاقة المولدة من الألواح الشمسية التي لايتم استخدامها بواسطة الأحمال في وسائل التخزين المختلفة أو يتم إعادتها إلى الشبكة. وفي أثناء الليل تقوم شبكة التوزيع بتزويد الأحمال بالطاقة الكهربائية المطلوبة. من مميزاته: التحول إلى اللامركزية في التوزيع، حيث ان الطاقة المنتجة بالقرب من أماكن الاستهلاك لها قيمة أعلى من تلك المنتجة في محطات الطاقة الكبيرة التقليدية، لأن ضياعات الطاقة حينئذ ستكون محدودة ومصروفات النقل الكبيرة للطاقة المرسلة من محطات التوليد المركزية سيتم تخفيضها. بالإضافة إلى ذلك، يسمح إنتاج الطاقة في الساعات المشمسة بخفض متطلبات الشبكة خلال النهار، أي في ساعات الذروة للطلب على الطاقة.

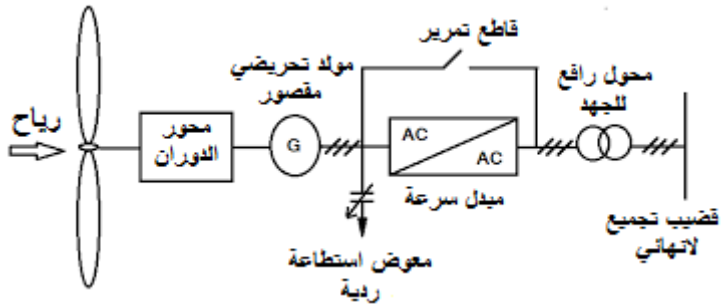


الشكل(2): ربط وحدات PV مع شبكة التوزيع – وصل عير مبدل.

2 – أنظمة طاقة فوتوفولتية غير متصلة بالشبكة (Off–grid PV plants): هي خلايا كهروضوئية غير متصلة بالشبكة وتتكون من وحدات PV ونظام تخزين يضمن توفير الطاقة الكهربائية عندما يكون الإمداد بالطاقة من شبكات التوزيع غير ممكن، هذه الخلايا مفيدة من الناحية الفنية والمالية لأنها يمكن أن تحل محل مجموعات المولدات الكهربائية عندما تكون الشبكة الكهربائية غير موجودة أو عندما يكون من الصعب الوصول إليها. تربط مباشرة مع الأحمال عبر مبدل دون الحاجة إلى محول مع وجود منظم شحن ينظم الجهد والتيار القادم من الألواح إلى البطارية.

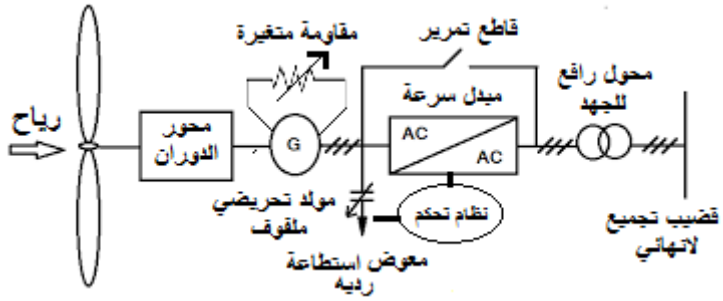
أما فيما يتعلق بالمولدات الريحية المستخدمة في إنتاج الطاقة الكهربائية فإنها تكون مرتبطة مع محور دوران السرعة العالية وتدور لتوليد الطاقة الكهربائية بتردد مساوي لتردد الشبكة الكهربائية. إذ تخرج الأسلاك من المولد الكهربائي وتمر عبر برج العنفة لتصل إلى المحول الكهربائي الرافع للجهد الذي يقوم برفع قيمة الجهد لتكون مساوية لجهد النقل. كما يرتبط المحول الكهربائي مع مركز التحويل الذي يربط عددا من العنفات مع بعضها البعض ويؤمن بدوره الربط مع الشبكة الكهربائية وبالتالي نقل الطاقة المنتجة من العنفات إلى الشبكة[10]. ونظرا لتعدد أنواع هذه المولدات الريحية وكذلك اختلاف طريقة ربطها مع الشبكة فإننا سنقدم تفصيلا موجزا عن أنماط ربط المولدات الريحية الأكثر انتشارا في النظم الكهروريحية[11]:

النمط الأول: ويدعى الصنف A: وهو عنفة ريحية ذات سرعة ثابتة ومولد تحريضي ذي قفص سنجابي مربوط مباشرة إلى الشبكة، كما هو مبين بالشكل(3) يتم تخفيض سرعة الدائر لأجل سرعات رياح منخفضة عبر منظم سرعة بسيط ميزات هذا النوع هي رخصه ومتانته أما مساوئه فتكمن في عدم إمكانية التحكم بالسرعة، بالإضافة إلى أن المولد يستهلك استطاعة رديه كبيرة بعد حصول عطل في الشبكة.



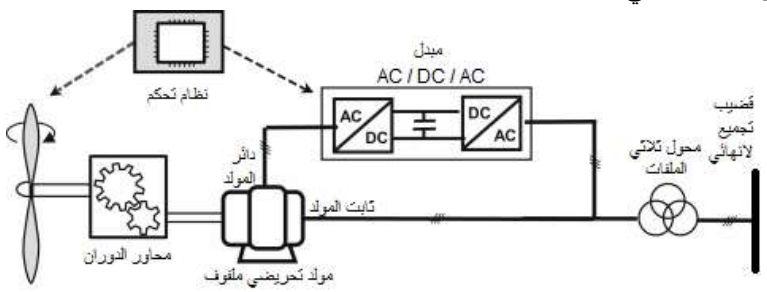
الشكل(3): مولد ريحي تحريضي ذو قفص سنجابي – وصل مباشر.

النمط الثاني: ويدعى الصنف B وهو عنفة ريحية ذات تحكم محدود بالسرعة ومولد تحريضي ذي دائر ملفوف مزود بمقاومة خارجية متغيرة مربوط مباشرة إلى الشبكة، كما هو مبين بالشكل(4) بتغيير مقاومة الدائر يمكن تعديل مميزة العزم وتخفيض الإجهاد الميكانيكي وتذبذب الاستطاعة الناتج عن تقلب سرعة الرياح.



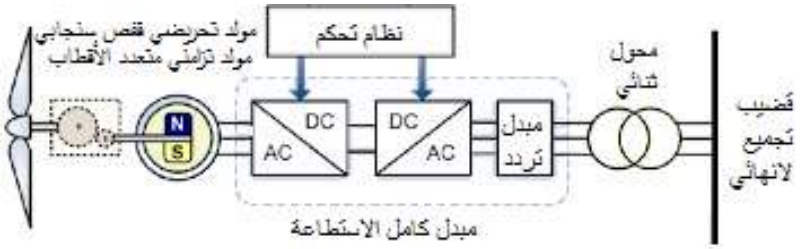
الشكل(4): مولد ريحي تحريضي ذو دائر ملفوف بمقاومة متغيرة – وصل مباشر.

النمط الثالث: ويدعى الصنف C وهو عنفة ريحية ذات تحكم بالسرعة ومولد تحريضي ذي دائر ملفوف معدل مربوط بطريقتين إلى الشبكة، الطريقة الأولى اتصال مباشر بين ثابت المولد والشبكة، الطريقة الثانية اتصال بين ملفات الدائر مع الشبكة عن طريق مبدل AC/DC/AC، كما هو مبين بالشكل(5) يتحكم المبدل بتيارات وتوترات الدائر قيمة وزاوية مما يتيح ضبط الاستطاعتين الفعلية والردية التي يقدمها ثابت المولد للشبكة بشكل مستقل عن سرعة الدوران. يربط هذا النمط مع الشبكة عبر محول ثلاثي الملفات.



الشكل(5): مولد ريحي تحريضي ذو دائر ملفوف معدل – وصل مباشر/ وصل عبر مبدل.

النمط الرابع: ويدعى الصنف D وهو عنفة ريحية ذات تحكم بالسرعة ومولد تحريضي ذي قفص سنجابي **أو** مولد تزامني متعدد الأقطاب دون علبة مسننات موصول مع الشبكة عن طريق مبدل لكامل الاستطاعة.



الشكل(6): مولد ريحي تحريضي ذو قفص سنجابي أو تزامني – وصل عبر مبدل.

تحليل سريان الاستطاعة في شبكات التوليد الموزع

تهدف دراسة سريان الحمولة إلى تحديد الجهد، التيار، الاستطاعة الفعلية والرديَّة، وعامل الاستطاعة في النقاط المختلفة من الشبكة الكهربائية تحت الشروط الموجودة والمتوقعة لحالة التشغيل الطبيعية، إن دراسات سريان الحمولة ضرورية لتخطيط تطور الشبكة أو النظام لأن التشغيل الجيد للنظام يعتمد على معرفة تأثير ارتباط النظام مع الأنظمة الأخرى، مع أحمال جديدة، محطات توليد جديدة، وخطوط نقل جديدة قبل إنشائها [12]، من المعلوم أن دراسة جريان الاستطاعة لا تجرى لمنظومة القدرة الكهربائية بأكملها دفعة واحدة. معظم الدراسات والمراجع تركز على جريان الاستطاعة لنظم النقل مع محطات التوليد المركزية المرتبطة به (الذي سنسميه في هذا البحث منذ الآن السريان التقليدي) وتقدم هذه المراجع النماذج الرياضية والخوارزميات التي أثبتت فعاليتها لتلك النظم والتي اعتمدت في حل هذه المسألة على تصنيف البارات إلى ثلاثة أصناف رئيسية مبينة بالشكل (7)، وذلك تبعا للمحددات المعلومة أو المطلوب حسابها أثناء التحليل[13]، حيث تمثل كل من المحددات P, Q الاستطاعتين الفعلية والردية المحقونة في البار، بينما تمثل المحددات V, Θ مطال الجهد للبار وزاوية الطور له على التوالي.

صنف البار		القيمة المحددة	القيمة المحسوبة
Slack Bus	بار مرجعي	$\|V\|,\ \theta$	P, Q
PV Bus	بار تحكم بالجهد	$P,\ \|V\|$	Q, θ
PQ Bus	بار حمولة	P, Q	$\|V\|,\ \theta$

الشكل(7): تصنيف البارات في خوارزميات حل مسألة سريان الحمولة التقليدي.

إن تحليل سريان الاستطاعة في شبكات التوزيع المتضمنة توليدًا موزعًا يختلف–إلى حد كبير–عن تحليل السريان في شبكات التوزيع التقليدية من حيث الخواص الفيزيائية لمركبات نظامي النقل والتوزيع الفعال وخاصة المولدات (تقليدية كبيرة في نظام النقل والتوليد المركزي وموزعة بتقنيات مختلفة في نظام التوزيع الفعال) لذلك يمكن القول بأن خوارزميات حل مسألة سريان الحمولة للأنظمة التقليدية لم تعد صالحة مع شبكات التوليد الموزع للاعتبارات التالية[14]:

- تشبيك مصادر التوليد الموزع ذات تقنيات توليد متنوعة وطرق ارتباط مختلفة مع الشبكة وتأثيرها الفوري على الجهد والسريان.

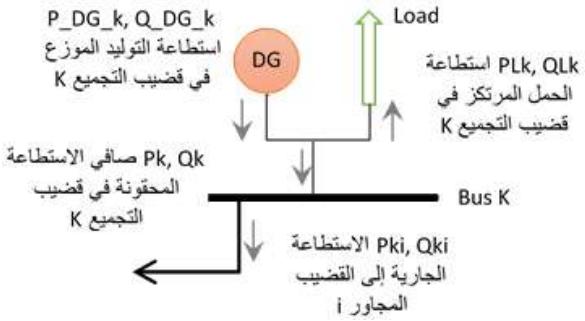
- هناك مزيج من الخطوط القصيرة (ذات الممانعات الصغيرة) مع الخطوط الطويلة (ذات الممانعات العالية) أي أن نسبة (مقاومة/مفاعلة) مرتفعة في خطوط التوزيع.
- التوليد حسب الحاجة، يجب تحقيق معادلة التوازن في ظل التغيرات الدائمة في الطلب والتوليد.

التعديلات المقترحة على خوارزمية تحليل السريان التقليدي

صممت أنظمة التوزيع الحديثة على أساس استقبال الاستطاعة الكهربائية من محولات الشبكة وتوزيعها على المستهلكين في مستوى توتر التوزيع المتوسط وعبر مراكز التحويل للمستهلكين في مستوى التوتر المنخفض. وهكذا فجريان الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية هو دائمًا من المستوى الأعلى للتوتر إلى المستوى الأدنى. بعض طرق الحل التي تعتمد على الخوارزميات المعروفة مثل غاوس سايدل (Gauss–Sidle Method) و نيوتن رافسون (Newton–Raphson Method) تعتمد على التقارب المقبول أثناء الحل التكراري من خلال الحاسب في حين تستفيد بعض تلك الخوارزميات مثل طريقة نيوتن رافسون ذات الفصل السريع Fast Decoupled Load Flow (FDLF) من النسبة الصغيرة (مقاومة/مفاعلة) لخطوط النقل لتفرض المصفوفتين الجزئيتين [J]و[N] من مصفوفة اليعقوبي مساوية للصفر، مما يعني أن نقل الاستطاعة الردية على خط النقل هو المسؤول الأكبر عن تغير قيمة التوتر عبر خط نقل أو جزء من نظام نقل القدرة في حين ينتج انزياح الطور بين التوترات بأغلبه من نقل الاستطاعة الفعلية. هذا الاستنتاج صحيح لخطوط النقل غير أنه خطأ تمامًا لنظام التوزيع حيث النسبة (مقاومة/مفاعلة) للكابلات أكبر من الواحد وللخطوط الهوائية تكون النسبة أقل من الواحد بقليل وذلك بسبب الأبعاد الصغيرة للأطوار التي تجعل المفاعلة كبيرة[15].

أما فيما يتعلق بالقضيب المرجعي (Slack Bus) في نظام النقل نختار عادة القضيب ذو وحدة التوليد الكبيرة كقضيب مرجعي. أما لأجل شبكة التوزيع فنختار عادًة كقضيب تجميع مرجعي القضيب الذي يربط شبكة التوزيع تحت الاختبار مع مستوى التوتر الأعلى ويدعى القضيب اللانهائي [16].

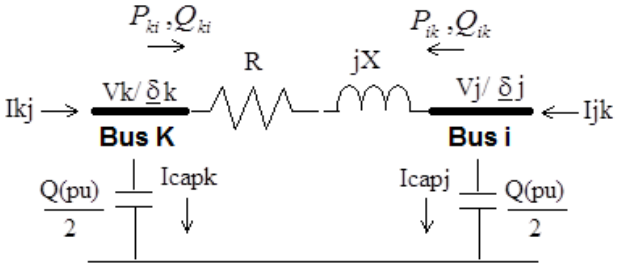
يعتمد النموذج الرياضي لجريان الاستطاعة في نظام التوزيع الفعال (شعاعيًا كان أم حلقيًا) على الهيكلية الجديدة له وعلى مبدأ توازن الاستطاعات الفعلية والردية المتعلقة بقضيب تجميع ما والذي يقضي بأن تكون الاستطاعة متوازنة عند كل قضيب في النظام. أي أن مجموع الاستطاعات المولّدة والمستهلكة في قضيب ما والاستطاعات المنتقلة من قضبان تجميع أخرى مجاورة وإليها عبر الخطوط والكابلات أو المحولات يجب أن يساوي الصفر[17]. يبين الشكل (8) مفهوم الاستطاعة الفعلية الصافية Pk والردية الصافية Qk المحقونة في قضيب ما K.



الشكل(8): توازن الاستطاعة على قضيب التجميع ذو التوليد الموزع K.

نظرًا لأن الاستطاعات الفعلية والردية تتوازن بشكل منفصل عن بعضها بعضًا يكون لدينا لأجل نظام توزيع مؤلّف من N قضيب تجميع وباعتبار القضيب اللانهائي هو القضيب المرجع حيث إن الجمع يشمل كل القضبان i الموصولة مباشرة بالقضيب k عبر خط أو كابل أو محولة، من جهة أخرى، وبملاحظة الشكل(9)، نجد:

$$P_{ki} = \mathrm{Re}(S_{ki}) = \mathrm{Re}(V_k I_k^*) \qquad Q_{ki} = \mathrm{Im}(S_{ki}) = \mathrm{Im}(V_k I_k^*) \qquad (1)\ ,\ (2)$$



الشكل(9): الترميز المستخدم في حساب الجريان بالفرع ki.

بالتعويض عن التيار بدلالة توتري القضيبين k و i وممانعة الفرع ki نجد أن:

$$\left.\begin{aligned} P_{ki} &= Y_{ki}V_k^2\ \cos(-\delta_{ki}) - Y_{ki}V_kV_i\ \cos(\theta_k - \theta_i - \delta_{ki}) \\ Q_{ki} &= Y_{ki}V_k^2\ \sin(-\delta_{ki}) - Y_{ki}V_kV_i\ \sin(\theta_k - \theta_i - \delta_{ki}) \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

وبسبب الضياعات الحاصلة في ممانعة الفرع فإن قيم الاستطاعات على طرفي الفرع غير متساوية، أي:

$$P_{ki} \neq P_{ik} \qquad Q_{ki} \neq Q_{ik}$$

من المعادلات السابقة نجد أن:

$$\begin{aligned} P_k &= P_{DG_k} - P_{Lk} = \sum_{i=1}^{N} Y_{ki}V_k^2\ \cos(-\delta_{ki}) - Y_{ki}V_kV_i\ \cos(\theta_k - \theta_i - \delta_{ki}) \\ Q_k &= Q_{DG_k} - Q_{Lk} = \sum_{i=1}^{N} Y_{ki}V_k^2\ \sin(-\delta_{ki}) - Y_{ki}V_kV_i\ \sin(\theta_k - \theta_i - \delta_{ki}) \end{aligned} \qquad (4)$$

المعادلات الأخيرة هي معادلات جريان الاستطاعة غير الخطية التي تشبه من حيث الشكل الرياضي معادلات جريان الاستطاعة لنظم النقل (الجريان التقليدي) وهي تربط الاستطاعة الفعلية والردية الصافية المحقونة في قضيب ما K مع قيمة التوتر وزاويته في القضيب ذاته وفي القضبان المجاورة. نظرًا لأنَّه يمكن كتابة معادلات مشابهة لكل قضيب من قضبان النظام N يكون لدينا 2N معادلة ولكن 4N متحول مجهول وهي: N استطاعة فعلية محقونة(P_k) ، N استطاعة رديه محقونة(Q_k) ، N مطال توتر(V_k) ، N زاوية توتر(δ_k) ، تمثّل المتحولات الأربعة (P_k, Q_k, V_k, δ_k) قضيب التجميع تمثيلا كهربائيا فريدا .ولكي تكون المعادلات (4) قابلة للحل يجب أن يكون متحولان من هذه المتحولات الأربعة معلومين لكل قضيب. كما أوضحنا سابقا يستخدم الجريان التقليدي ثلاثة أشكال لتجميع المتحولات المعلومة والمجهولة وبالتالي ثلاث نماذج لنمذجة القضبان جميعها. وهذه التجميعات مرتبطة بالطبع بالخصائص الفيزيائية لقضبان التجميع. وهنا يبرز الاختلاف الجذري بين جريان الاستطاعة لنظم النقل وجريان الاستطاعة في نظم التوزيع الفعالة. فبدلا من ثلاثة نماذج كانت كافية لنمذجة قضبان تجميع نظام النقل والتوليد، يلزم

للجريان التوزيعي نماذج جديدة ومعظمها يتعلق بنمذجة قضبان تجميع التوليد الموزع، فيما يلي نعرض النماذج الجديدة للبارات في تحليل سريان الحمولة لنظم التوزيع الفعالة.

أصناف بارات التوليد الموزع

يشترك جريان الاستطاعة التقليدي مع الجريان الموزع باعتماد نموذج قضيب الحمل (PQ bus) لتمثيل قضيب تجميع الحمل حيث الاستطاعة الفعلية والردية الصافية المحقونة في القضيب معلومة في حين قيمة التوتر وزاويته مجهولة. كما يشتركان جزئيًا باستخدام نموذج قضيب التجميع المرجعي (slack bus) حيث المعاليم هي قيمة التوتر وزاويته والمجاهيل هي الاستطاعتان الفعلية والردية المحقونة. بالطبع مع الاختلاف الكامن في تحديد أي قضيب تجميع يصلح كقضيب تجميع مرجعي كما سبق توضيحه. أما الفرق الجوهري فهو في كيفية نمذجة قضبان تجميع التوليد الموزع. تتم نمذجة قضبان تجميع التوليد الموزع في الخوارزمية بنماذج مختلفة تبعا لنوع المولد الموزع وطريقة ارتباطه مع الشبكة ونمط تشغيله. نميز الأصناف الآتية[18]:

1 – صنف بارات التحكم بالجهد PV bus: وهو صنف البارات المتصلة مع مولد استاتيكي عبر مبدل قدرة، ويعمل بنمط تشغيل (عامل استطاعة متغير) لأجل تنظيم التوتر. يمكن أن يمثل هذا الصنف بارات الشبكة المتصلة مع جميع أشكال وأنظمة الطاقة الشمسية على اعتبار أن الطاقة الملتقطة من الشمس تحول إلى طاقة فعلية فقط، بينما يتم التحكم بالطاقة الردية من أجل الحفاظ على سوية الجهد.

2 – صنف بارات الحمولة PQ bus: وهنا يمكن الإشارة إلى صنف البارات الجديد من خلال توضيح الفرق بين الصنفين التقليدي والمحدث لهذا النوع من البارات كما يلي:

- الصنف التقليدي: وهو صنف البارات الذي يتم فيه استهلاك الاستطاعة الفعلية والردية، عادة يمثل هذا الصنف بارات الشبكة ذات التحميل الفعلي والردي بقيم ثابتة ومعلومة مسبقا، بينما يتم تحديد مطال الجهد وزاوية الطور له أثناء إجراء حسابات سريان الحمولة. بالنسبة لبارات التوليد الموزع فإنه يتم تمثيلها بهذا الصنف في حالة ارتباط مولد موزع من النوع التحريضي الكلاسيكي بطريقة مباشرة مع الشبكة بفارق أنه هنا لابد من حساب الاستطاعة الردية المستهلكة من المولد التحريضي كتابع لقيمة جهد البار المتغيرة والمحسوبة أثناء العملية التكرارية لحسابات سريان الحمولة، إذ أن المولد التحريضي يقدم استطاعة فعلية ولكنه يستهلك استطاعة رديه يتم تحديدها أثناء الحساب. يشمل هذا الصنف جميع بارات التوليد الموزع المرتبطة مع أنظمة التوليد الريحية صنف A و B.

- الصنف المحدث: يمثل صنف بارات التوليد الموزع المرتبطة مع مولد عبر مبدل قدرة يعمل بنمط تشغيل (عامل استطاعة ثابت) مع تحقق الشرطين: 1–عدم تجاوز الاستطاعة الظاهرية للمبدل. 2–التحكم بإنتاج الاستطاعة الردية من أجل الحفاظ على قيمة ثابتة لعامل الاستطاعة. يمثل هذا الصنف بارات التوليد الموزع المرتبطة مع مولد ريحي تزامني متعدد أقطاب أو ذي قفص سنجابي عبر مبدل قدرة (نموذج C و D). حيث يتم حساب كمية الاستطاعة الردية المطلوب توليدها واعتبارها كحمل ردي سالب أثناء العملية التكرارية لحسابات سريان الحمولة.

معايير (مؤشرات) التقويم الكمي لتأثير التوليد الموزع المتجدد في أنظمة التوزيع الكهربائية

يتحدد التقويم الكمي لأثر التوليد الموزع على أداء نظام التوزيع من خلال معايير ومؤشرات تتبع لتقنية التوليد الموزع وطريقة ارتباطه مع الشبكة إضافة إلى سعة التوليد ومكانه، تؤثر هذه المؤشرات على منهجية تحليل سريان الاستطاعة من خلال تقييم محددات الجهد وتدفق الطاقة[19]. فيما يلي شرح عن هذه المؤشرات:

1 – مؤشر الاختراق (PI) Penetration Index:

مؤشر الاختراق (PI %) هو نسبة التوليد الموزع الإجمالي P_DG إلى الحمل الأعظمي لشبكة التوزيع المضيفة P_Load ويحسب من العلاقة:

$$PI_{\%} = \left(P_{DG} \middle/ P_{Load} \right) \times 100 \qquad (5)$$

لا يعني هذا المؤشر النسبة من أحمال المنظومة بل أحمال شبكة التوزيع المضيفة. إذا حوت المنظومة الكهربائية توليدًا مركزيًا فقط يكون مؤشر الاختراق 0% ويدلّ المؤشر 100% أن جميع أحمال شبكة التوزيع المضيفة تعوض بواسطة التوليد الموزع. المؤشر الأقل من 20% إلى 30% يعكس وجود عدم وجود محّفزات للقطاع الخاص لاستغلال الطاقة المتجددة، في حين المؤشر 50% يدل على وجود سوق ليبرالية لقطاع الكهرباء مع تعرفة محّفزة.

2 – مؤشر التوزع (التبعثر) (DI) Dispersion index:

مؤشر التوزع (DI %) هو نسبة عدد قضبان تجميع التوليد الموزع DG_buses إلى عدد قضبان تجميع الأحمال Load_buses ويحسب من العلاقة:

$$DI_{\%} = \left(DG_{buses} \middle/ Load_{buses} \right) \times 100 \qquad (6)$$

هذا المؤشر يركز على التوزع الجغرافي للمولدات الموزعة وليس استطاعتها، أيضًا يكون للأرقام 20%, 30%, 50%, 100% دلالات على وضع سوق الكهرباء والمحّفزات أو العوائق التي تصدر عن الجهة المشغلة فيما يتعلق باستغلال الطاقة المتجددة.

3 – مؤشر ارتفاع التوتر (VRI) Voltage rise index:

مؤشر ارتفاع التوتر لقضيب تجميع (VRI %) هو نسبة الفرق بين توتره بوجود التوليد الموزع في شبكة التوزيع (V+DG) وتوتره دون وجود التوليد الموزع (V−DG) إلى التوتر دون التوليد الموزع، ويحسب من العلاقة:

$$VRI_{\%} = \left(\frac{V_{+DG} - V_{-DG}}{V_{-DG}} \right) \times 100 \qquad (7)$$

عادة في الشبكات القوية، أي التي لها منحنى تغير توتر نظامي لا تسمح بتجاوز $VRI_{\%} = 2\%$، أما لأجل الشبكات الضعيفة فيبقى هذا المؤشر مفيدًا فقط للدلالة على مدى دعم التوليد الموزع للتوتر وحينها ولأجل تحديد الحد المسموح لارتفاع التوتر فإنه يتم مقارنة (V+DG) مع التوتر الاسمي للشبكة مع عدم السماح بتجاوز (5% −/+) أي في المجال pu(1.05 – 0.95) وحينئذ تصبح العلاقة السابقة بالشكل:

$$VRI_{\%} = \left(\frac{V_{+DG} - V_{n}}{V_{n}} \right) \times 100 \qquad (8)$$

4 – مؤشر الضياعات الفنية الكلية التراكبي (TLI_DG) Total DG Loss index:

يمكن تعريفه بأنه نسبة الاستطاعة الضائعة (فعلية أو رديه) الكلية في شبكة التوزيع المضيفة مع وجود التوليد الموزع إلى تلك القيم دون وجود التوليد الموزع، وهو مخصص لخطوط نقل الشبكة ويحسب من العلاقة:

$$TLI_{DG_P\%} = \left(\frac{p_{Loss+DG}}{p_{Loss-DG}} \right) \times 100 \quad , \quad TLI_{DG_Q\%} = \left(\frac{Q_{Loss+DG}}{Q_{Loss-DG}} \right) \times 100 \qquad (9)$$

هذا المؤشر يبين فعلا التحسن أو التردي الذي يطرأ على الضياع، ولكن لا يعطي فكرة مباشرة عن نسبة الضياع إلى الاستطاعة الكلية المولدة.

5 – مؤشر الضياعات الفنية الكلية (TLI) Total Loss index:

يختلف هذا المؤشر عن سابقه بأنه يعطي تصور مباشر ن نسبة الضياع إلى الاستطاعة الكلية المولدة (أي مجموع الاستطاعة المستجرة من الشبكة الأعلى توترًا والاستطاعة التي يعطيها التوليد الموزع) وهو مخصص لخطوط نقل الشبكة ويحسب من العلاقة:

$$TLI_{P\%} = \left(\frac{p_{Loss}}{p_i} \right) \times 100 \quad , \quad TLI_{Q\%} = \left(\frac{Q_{Loss}}{Q_i} \right) \times 100 \qquad (10)$$

حيث أن (Pi) مجموع الاستطاعة الفعلية التي تستجرها الشبكة المضيفة من الشبكة اللانهائية والاستطاعة الفعلية التي يحقنها التوليد الموزع في الشبكة المضيفة، (Qi) الاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة المضيفة من قبل الشبكة اللانهائية والتوليد الموزع (إن وجدت) مطروحًا منها الاستطاعة الردية التي يستهلكها التوليد الموزع تحديداً، أو بتعبير آخر هي الاستطاعة الردية المستجرة من قبل أحمال الشبكة المضيفة كافة.

6 – مؤشر التحميل الزائد (مؤشر الإرهاق) (OVI) Overloading index:

مؤشر الإرهاق ضروري لاكتشاف تأثير التوليد الموزع في تحميل الخطوط والمحولات. وهو مخصص لفروع الشبكة إذ أن التحميل لفرع ما هو نسبة التيار المار في الفرع إلى التيار الاسمي له ويحسب من العلاقة:

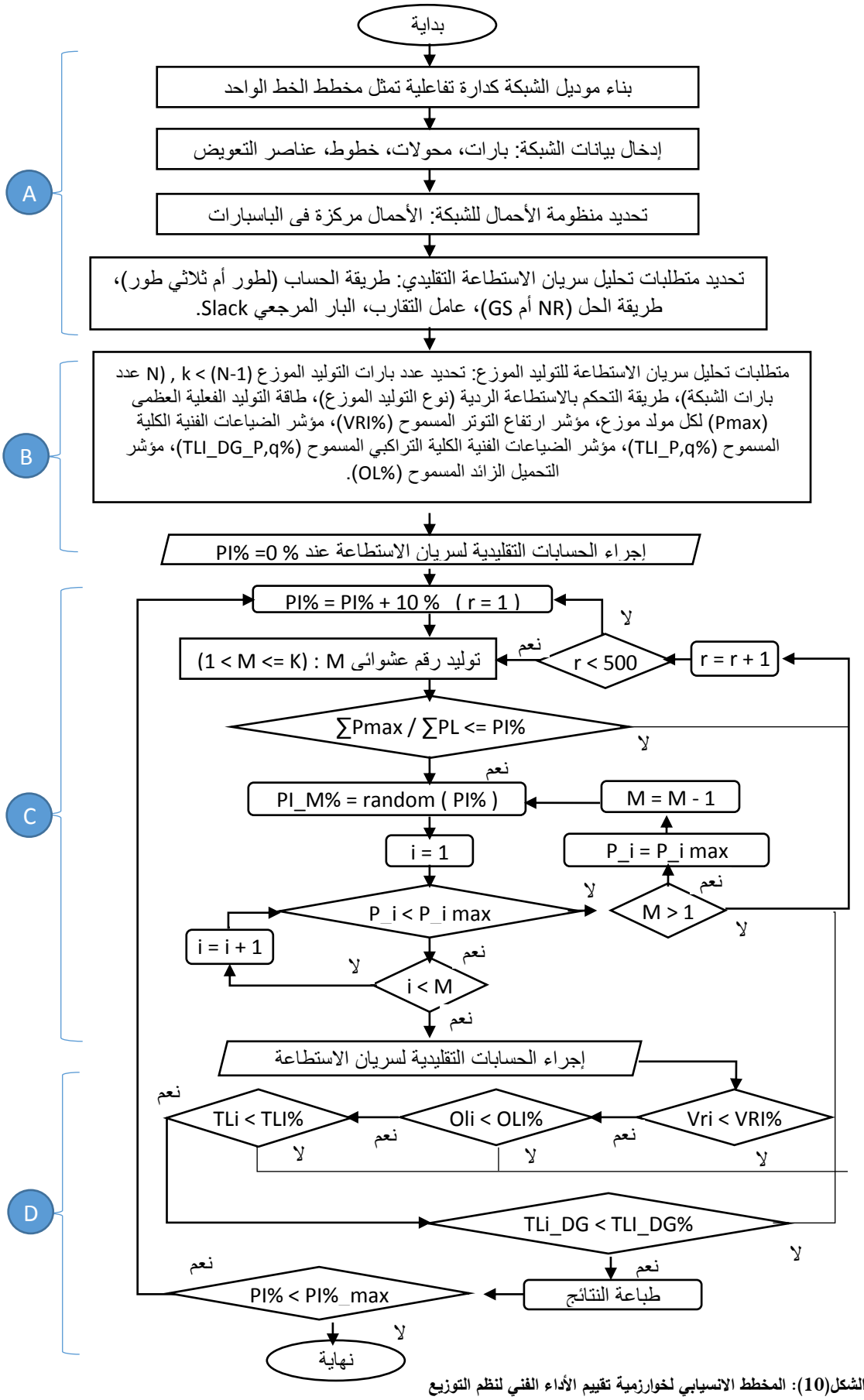
$$OVI_{P\%} = \left(\frac{I_{+DG}}{I_n} \right) \times 100 \qquad (11)$$

الخوارزميات المحدثة

بناء على الأسس الرياضية التي تم إنجازها في الفقرات السابقة فقد تم إعداد خوارزميتين يلخصهما المخطط الانسيابي المبين بالشكلين (10) و (11)، كل خوارزمية منهما صممت على نحو يمكن تطبيقهما على أي نظام توزيع متعدد مستويات التوتر ولأجل تقنيات مختلفة للتوليد الموزع المتجدد. الغاية الرئيسية من الخوارزمية الأولى هي التأكد من أن الاستطاعة المحقونة من مصادر التوليد الموزعة لن تخفض من مواصفات التزويد بالاستطاعة الكهربائية للمستخدمين الآخرين للشبكة، أما الخوارزمية الثانية فتهدف إلى إيجاد أفضل السعات والمواقع للمولدات الموزعة التي سيتم تطبيقها على أنظمة التوزيع لتحقيق أدنى فقد كهربائي وتحسين للجهد.

الخوارزمية الأولى: خوارزمية تقييم الأداء الفني لنظم التوزيع الفعالة عند قيم مختلفة لعامل الاختراق.

التوليد الموزع ذو تأثير واضح على الجهد الكهربائي وجريان الاستطاعة في الشبكة الكهربائية، هذا التأثير ممكن أن يكون إيجابي أو سلبي حسب عمل نظام التوزيع وخصائص المولدات المستخدمة في التوليد الموزع. تقدم هذه الخوارزمية حل لمسألة سريان الحمولة في شبكات التوليد الموزع يتيح إمكانية مقارنة الأداء الفني للشبكة عند حالات مختلفة لكمية الاختراق المطلوبة من مصادر التوليد الموزع وتقييم أثره على محددات جهد البارات ومفاقيد الطاقة الكلية في الشبكة.



الشكل(10): المخطط الانسيابي لخوارزمية تقييم الأداء الفني لنظم التوزيع

يتلخص عمل هذه الخوارزمية من خلال تكرار إيجاد حل واحد متاح على الأقل ذو عامل توزيع عشوائي أثناء التزايد التدريجي في كمية الطاقة البديلة المستجرة من مصادر التوليد الموزع، فيما يلي نقدم شرحا مفصلا لتعليمات هذه الخوارزمية المدرجة في الأقسام A, B, C, D المبينة في الشكل(10).

القسم A: تقوم التعليمات الموجودة في هذا القسم بمهمة الحساب التقليدي لسريان الحمولة قبل التكامل مع مصادر التوليد الموزع حيث يتطلب حل مسألة سريان الحمولة خطوتين رئيسيتين، الخطوة الأولى تشمل الصياغة الرياضية للمسألة عبر تمثيل أنظمة القدرة الكهربائية بكامل محدداتها وإدخالها إلى ذاكرة الحاسوب، في حين يعد تطبيق التقنية العددية لحل المسألة بمثابة الخطوة الثانية. في العادة، تحليل النظام الكهربائي ثلاثي الطور يبسط عن طريق افتراض توازن الاحمال بين الخطوط الثلاثة، وكذلك استقرار الحالة بدون أي تغير انتقالي في تدفق الطاقة او الجهد الكهربائي، وتردد كهربائي ثابت. للتبسيط أكثر يتم استخدام نظام الوحدة للتعبير عن الجهد الكهربائي وتدفق الطاقة والاحمال كمعيار يمثل النظام الحقيقي، نظام التمثيل احادي الخط يستخدم كأساس لبناء نظام رياضي للمولدات، الاحمال، وخطوط النقل والتوزيع.

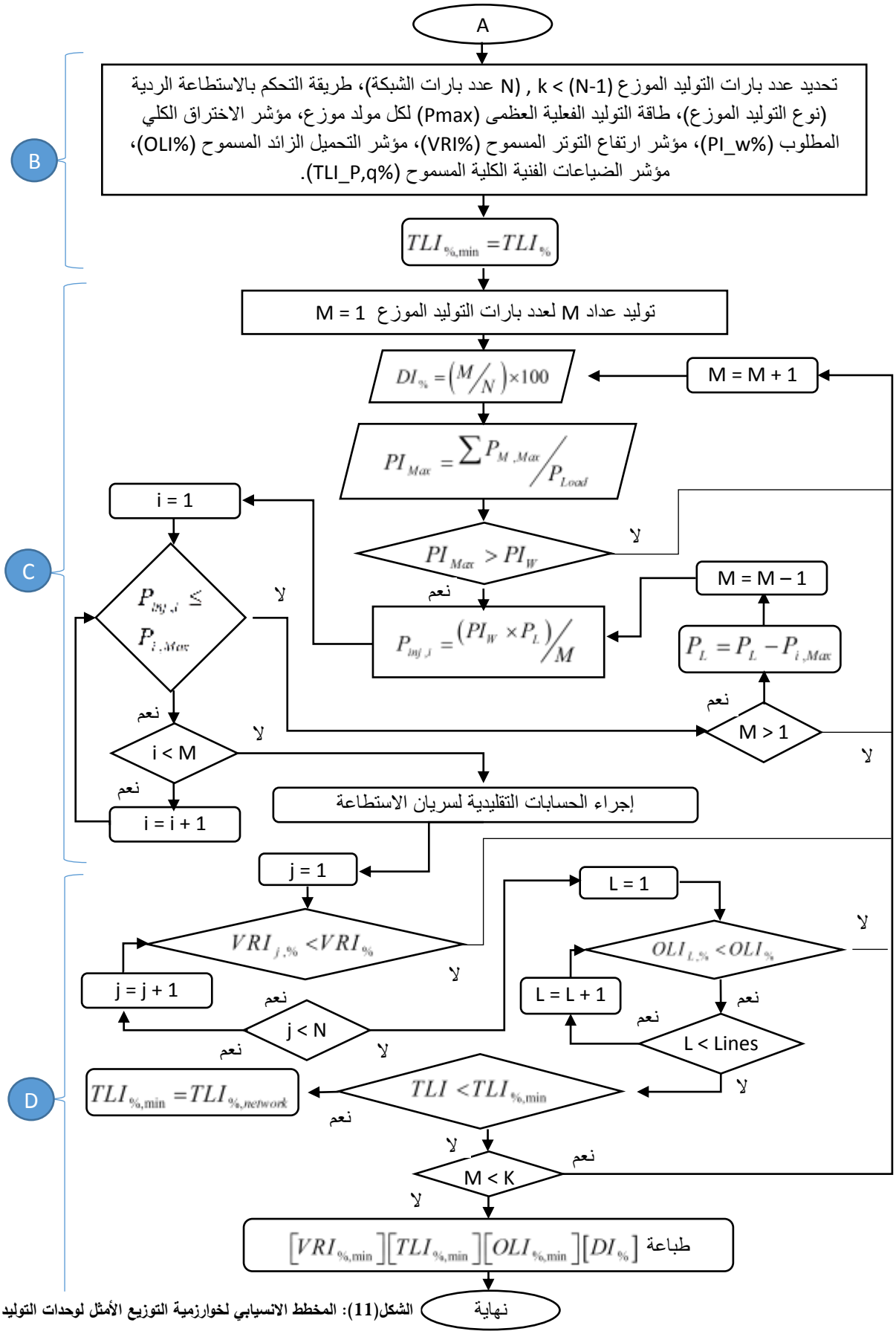
القسم B: تقوم التعليمات ضمن هذا القسم من الخوارزمية بتحديد معايير(مؤشرات) التقويم الكمي لتأثير التوليد الموزع المتجدد في التوتر وضياع الاستطاعة في شبكة التوزيع دون السماح في تحديد قيمة لمؤشر الاختراق وذلك لتحقيق إمكانية مقارنة الأداء الفني للشبكة في حال التكامل مع مصادر التوليد الموزع عند حالات مختلفة لكمية الطاقة البديلة المحقونة في الشبكة تتبع لخصائص ومواصفات كل عنصر من عناصر التوليد الموزع.

القسم C: تهدف تعليمات هذا القسم إلى موازنة الطلب الكلي على الطاقة من قبل أحمال الشبكة المتركزة على البارات مع كمية الطاقة المولدة من مصادرها المتنوعة (التوليد المركزي – الموزع) في كل مرة يتم فيها زيادة عامل الاختراق وفق قيمة ثابتة. دون الأخذ بعين الاعتبار قرب أو بعد مصادر التوليد الموزع عن الأحمال، إذ تقوم تعليمات هذا القسم باختيار عشوائي لعامل التوزيع بحيث يضمن تعويض النسبة المحددة من صافي حمل الشبكة بالطاقة البديلة أثناء العملية التكرارية حيث يوجد قيمة محددة لعامل الاختراق متغيرة مع كل مرحلة تكرارية يتم فيها توزيع حصة الطاقة المستجرة من كل مصدر موزع بشكل عشوائي مع مراعاة حدود الطاقة الممكن استجرارها من كل مصدر توليد موزع ونوع هذا المولد.

القسم D: الغاية من التعليمات الموجودة في هذا القسم هي تقديم خيار واحد عشوائي لحل معادلات سريان الحمولة عند تكامل الشبكة تدريجيا مع مصادر التوليد الموزع بحيث يحقق الشروط المسموحة لعمل نظام التوزيع المحددة من خلال تعليمات القسم B دون الأخذ بعين الاعتبار إمكانية وجود حل لنفس المسألة يضمن الأداء الفني الأفضل لنظام التوزيع.

الخوارزمية الثانية: إيجاد التوزيع الأمثل لوحدات التوليد الموزع عند عامل اختراق محدد.

قد تكون هناك اعتبارات خاصة من مشغلي شبكات التوليد الموزع تتعلق بكلفة إنتاج الطاقة من التوليد المركزي أو بسبب تقلبات الطقس التي تفرض قيود على كمية الطاقة الممكن استجرارها من مصادر التوليد الموزع، لذلك يتم اللجوء إلى تعويض نسبة محددة من أحمال الشبكة المركزية من قبل مصادر التوليد الموزع، هذه النسبة تكون متقلبة خلال ساعات اليوم الواحد.



الشكل(11): المخطط الانسيابي لخوارزمية التوزيع الأمثل لوحدات التوليد الموزع.

تعتمد هذه الخوارزمية على مبدأ موازنة الطاقة المولدة من كلا مصدري الطاقة المرجعي (التوليد المركزي) والموزع (مصادر الطاقة البديلة) من جهة، ومن جهة أخرى الطلب على الطاقة المتمثل بالأحمال المتركزة على بارات الشبكة المدروسة، مع الأخذ بعين الاعتبار مدى قربها أو بعدها عن مصادر التوليد الموزع. مما يعني إمكانية تحديد التموضع الأمثل لوحدات التوليد الموزع، إضافة إلى معرفة السعات المثالية لها، من خلال تحديد الحل الموافق لمعادلات سريان الحمولة من بين مجموعة الحلول المتاحة والمتعلقة بعوامل توزيع مختلفة وفق معايير الأداء الأمثل لنظام التوزيع الفعال التي تضمن الوصول إلى الحد الأدنى لكل من مفاقيد الطاقة الكهربائية الكلية في الشبكة، المعدل الوسطي لارتفاع التوتر على جميع بارات الشبكة، ومعدل التحميل العام على خطوط نقل الطاقة في الشبكة.

قمنا بتقسيم الخوارزمية إلى الأقسام A, B, C, D مبينة بالشكل(11)، كل قسم يحوي مجموعة من التعليمات تؤدي غرض محدد سيتم شرحه بشكل وافي في الفقرات اللاحقة، كما هو مبين بالشكل فقد قمنا اختصارا بتسمية التعليمات الواردة في القسم A للخوارزمية السابقة على هذه الخوارزمية لأنها تحوي نفس التعليمات التي تمت الإشارة إليها في الفقرة السابقة، وعلى الرغم من تشابه معظم تعليمات القسم B للخوارزمية السابقة مع تعليمات القسم B لهذه الخوارزمية إلا أننا قمنا بإدراج هذا القسم بهدف الإشارة إلى الاختلاف الجوهري بين الخوارزميتين الأولى و الثانية والمتمثل في التباين بأسلوب تحديد قيمة لعامل الاختراق المطلوب. في هذه الخوارزمية لابد بداية من تحديد قيمة مطلوبة لمؤشر الاختراق (أو مرغوبة) ليصار في سياق التعليمات اللاحقة للأقسام التالية من الخوارزمية إلى معرفة إمكانية من عدم إمكانية الوصول إلى القيمة الهدف لعامل الاختراق، وفي حال الوصول سيصار إلى عرض الحل الأمثل لعمل نظام التوزيع وفق المعايير المشار إليها أعلاه والتي تحدد أفضلية هذا الحل دون بقية الحلول الأخرى.

القسم C: مهمة التعليمات في هذا القسم هي موازنة الطلب الكلي على الطاقة المتمثل بأحمال الشبكة المتركزة على البارات من جهة مع التوليد من مصادره المتنوعة (المركزي والموزع) من جهة أخرى، مع إيجاد التموضع الأمثل لوحدات التوليد الموزع بهدف تحسين الأداء الفني للشبكة من خلال التقليل من مفاقيد الطاقة عند نقلها عبر مسافات طويلة، يتم بداية من خلال تعليمات هذا القسم حساب الطاقة الفعلية الكلية الممكن استجرارها من مصادر التوليد الموزع عند الحدود الدنيا لقيم عامل التوزيع المحتملة والمحققة لقيمة الاختراق المطلوبة، ثم موازنة الطاقة في كل حالة سيتم فيها الاستجرار المطلوب من كل مصدر توليد موزع على حدا أو عبر توزيع الطاقة المطلوبة بشكل متساوي بين مصادر التوليد الموزعة على البارات المشمولة لعامل التوزيع الموافق لكل مرحلة تكرارية، مع الأخذ بعين الاعتبار الحدود المسموحة للاستجرار من كل مصدر ونوعه، الغاية من التقسيم المتساوي لعامل الاختراق بين مصادر التوليد الموزع أثناء الحسابات هو البحث عن السعات المثالية لوحدات التوليد الموزع عبر حل معادلات سريان الحمولة للشبكة عند كل الاحتمالات الممكنة بدءا من تحليل السريان عند استخدام كامل الطاقة الفعلية المتوفرة لمصدر توليد موزع وحيد أو عند اشتراك مصدرين أو أكثر، أي بمعنى آخر، تحليل أداء الشبكة عند الحالات التي يكون فيها التوليد الموزع بقيم أعظمية قرب الأحمال أو بقيم موزعة بين مجموعة من المصادر المشتركة في تعويض تلك الأحمال.

القسم D: يتضمن تعليمات الغاية منها تحديد الحل الذي يضمن الأداء الفني الأمثل لنظام التوزيع الفعال من خلال المقارنة بين معايير الأداء الأمثل–المشار إليها أعلاه– لمجموعة الحلول الممكنة ذات عوامل التوزيع المختلفة والمقدمة من خلال القسم السابق للخوارزمية، يمكن تقسيم مراحل عمل تعليمات هذا القسم من الخوارزمية إلى مرحلتين، في المرحلة الأولى يتم تقييد مصطلح (حل ممكن) والذي كان يعبر بالنسبة للقسم السابق C من الخوارزمية عن إيجاد توزيع ما يتم فيه حقن الطاقة البديلة في الشبكة لتعويض نسبة مئوية محددة مسبقا من صافي حمل الشبكة، هذا التوزيع

قد يكون باحتمالات مختلفة من نسبة الاختراق لكل مولد موزع على حدا أو مشتركة مع بعضها، أما في هذا القسم من الخوارزمية سيتم تسمية الحل بمصطلح (حل ممكن) عندما يحقق أحد الحلول المقدمة عبر القسم السابق الشرطين: 1- أن لا يتجاوز مؤشر ارتفاع التوتر لكل بارات الشبكة القيمة المسموحة والمحددة مسبقا بالقسم B. 2- أن لا يتجاوز مؤشر التحميل الأعظمي لكل خطوط نقل الشبكة القيمة المسموحة والمحددة مسبقا في القسم B. أما المرحلة الثانية سيتم فيها مقارنة الحدود الدنيا لمؤشر ضياع الاستطاعة الكلية في خطوط نقل الشبكة (PLI_P,q%) لكل حل ممكن مقدم من خلال المرحلة الأولى في هذا القسم مع مثيلاته من الحلول الأخرى، ليصار في النهاية إلى طباعة تقرير بنتائج تحليل سريان الحمولة للحل الذي يمثل أفضل تموضع ممكن لوحدات التوليد الموزع مع تحديد أفضل توزيع لسعات الاختراق بين هذه الوحدات العاملة مع التوليد المركزي من أجل موازنة الطلب الكلي على الطاقة بما يؤمن خفض الضياعات الفنية الكلية في الشبكة إلى حدها الأدنى بغض النظر عن انخفاض أو زيادة قيمها عما كانت عليه في الشبكة قبل التكامل مع مصادر التوليد الموزع، وذلك ضمن قيود محددة لأجل ارتفاع التوتر على بارات الشبكة أو زيادة التحميل على خطوط نقل الطاقة فيها.

الاستنتاجات والتوصيات:

- تحديد سريان الاستطاعة وتوترات البارات في أنظمة التوزيع بوجود التوليد الموزع لا يتم من قبل الأحمال فقط بل من قبل المولدات والأحمال معًا.
- لن تتقارب طريقة الحل التي تعتمد خوارزمية نيوتن رافسون ذات الفصل السريع إذا استخدمناها لحل معادلات سريان الاستطاعة لأنظمة التوزيع الفعالة.
- تستخدم طريقة نيوتن رافسون التقليدية في حل مسألة سريان الاستطاعة لأنظمة التوزيع الفعالة بعد تعديل النموذج الرياضي للنظام على نحو كيفي يتضمن أصناف البارات الجديدة التي تمثل الخصائص الفيزيائية للمولدات الموزعة.
- تعتبر مؤشرات التقويم الكمي لأثر التوليد الموزع وسيلة تكاد تكون وحيدة لإعداد خوارزميات محدثة تلبي متطلبات الإدارة المتقدمة لأنظمة التوزيع الفعالة عند تكاملها مع خوارزميات الحل التقليدية.
- تصميم خوارزمية التقويم الكمي لأثر التوليد الموزع على محددات الجهد الكهربائي وجريان الاستطاعة كوسيلة يمكن من خلالها تحديد الأثر الحتمي الإيجابي أو السلبي عند إشراك مصادر التوليد الموزع في شبكة توزيع ذات أحمال متغيرة بشكل عشوائي وتحوي مزيج من الخطوط القصيرة والطويلة.
- تصميم خوارزمية التوزيع الأمثل كوسيلة لإيجاد أفضل السعات والمواقع للمولدات الموزعة التي سيتم تطبيقها على أنظمة التوزيع لتحقيق أدنى فقد كهربائي وتحسين للجهد.

References:

1- LOPEZ, J. A. ; HATZIARGYRIOU, N. ; MUTALE, J. N. *Integrating distributed generation into electric power system: A review of drivers, challenges and opportunities*. 1^{nd}.ed, Electric Power Systems Research, India, 2000, 77.

2 – LUND, T. *Analysis of distribution systems with a high penetration of distributed generation* , PhD Thesis at Technical University of Denmark, Denmark, September 2007.

3 – RONILAYA, F. *Distribution Systems and Dispersed Generation*. CIGRE SC C6 COLLOQUIUM, Yokohama, 2013.

4 – LI, H.Y ; LEITE, H. *Increasing distributed generation using automatic voltage reference setting technique*. IEEE power and energy society general meeting, USA, 2008.
5 – HAMMONS, T. J. *Dispersed generation and its impact in europe on power system structure and secure power system operation*. $\mathbf{2^{nd}}$. ed., Upec, London, 2007, 430.
6 – YUKSEL, I. *Renewable Energy Status of Electricity Generation and Future Prospect Hydropower in Turkey*. $\mathbf{1^{nd}}$.ed., Sakarya University Turkey, Turkey, 2012, 570.
7 – ELTAMALY, A.M. ; AMER NASR ELGAFFAR, A. *Techno-Economical Study of Using Nuclear Power Plants for Supporting Electrical Grid in Arabian Gulf*. $\mathbf{1^{nd}}$.ed., technol econ smart grids sustain energy, MINIA University, 2017, pp 2: 14.
8 – HEYDT, G.T. *The Next Generation of Power Distribution Systems*. 1^{nd}.ed., IEEE Trans on Smart Grid, Inc New Jersey, 2015, pp 225-235.
9 – SHICHAO, L. ; PETER, X. ; XIAOYU, W. *Stochastic Small-Signal Stability Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems*. IEEE London, vol.63, issue 2, 2015, 65-69.
10 – WAGNER, H. J. *Introduction to wind energy systems*, The European Physical Journal Conferences, Chine, 2017, 210.
11 – Gary, L. J. *Wind Energy Systems*. $\mathbf{1^{nd}}$.ed., Electronic Edition, Manhattan USA, 2006, pp 45 : 53.
12 - BADRUL, H. C. *Load Flow Analysis in Power System*. $\mathbf{1^{nd}}$.ed., University of Missouri Rolla, Turkey, 2004, 139.
13 - ZHANG, H. ; YANG, H. ; LI, T. *Optimal Power Flow Calculation and Analysis*. 2^{nd}.ed., Tiangjin University of Technology, China, 2013, 342.
14 – Zahlay, D. ; Strategies, F. *Methods and Tools for Solving Long-term Transmission Expansion Planning in Large-scale Power Systems*, Ph.D. Thesis, Spain, 2016.
15 – Panosyan, A. ; Oswald, B.R., *Modified Newton-Raphson load flow analysis for integrated AC/DC power systems* 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004, pp. 1223-1227.
16 – Ozyon S., *The application of genetic algorithm to some environmental economic power dispatch problems*, Msc. Thesis, Dumlupınar University, Kütahya, 2009.
17 – SAABAN F.; KHERBEK T.;RAZOUK S. *Integration of traditional electric power networks operation system with renewable energy resources,* Tishreen University Journal For Research and scientific studies, Vol.41,no3,2019
18- HAMZEH, A. *Evalautingthe effect of distributed renewable generation on voltage and power losses in electrical distribution networkm*, Damascus. University Journal For Research and scientific studies, Vol.25,no1,2009,356-358.
19 – Darabadi, M. ; Hashemi, F. ; Ghadimi, N. and Ataei, A.*Newton-raphson load flow with consideration of the fuzzy load and in the presence of the distributed generations in distribution network*, (EEEIC) International Conference, 2011, pp. 1-5.