

Improving the Behavior of Loss Of Mains Protection in Electrical Distribution Networks with Distributed Generation by Using of Performance Curves

Dr. Fouad SALHA*

(Received 7 / 11 / 2021. Accepted 4 / 1 / 2022)

□ ABSTRACT □

Loss-Of-Mains protection (LOM) is a requirement for connecting the generation units to the distribution network. This protection, which is based on the instantaneous reading of the frequency of the distribution network, disconnects the distributed generator only when the mains supply is cut off. Frequency change due to other reasons other than the loss of the main supply, usually, causes a failure in the work of these protections and therefore the false disconnection of the distributed generators. This paper presents a method to avoid this false disconnection by, first, deducing and drawing the performance curves of the ROCOF (Rate of Change Of Frequency) used to protect against loss of mains. Second, boundary conditions were proposed to place the performance curves between two boundary curves that confine an area representing the work area of these relays. Modeling and simulation were done using MATLAB for an electrical system consisting of a synchronous distributed generator, connected to the electrical system via a power distribution line, in addition to a set of loads.

Keywords: Distributed Generation, electric synchronous generator, Loss of Mains protection, Rate Of Change Of Frequency.

* Assistant Professor, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Electrical Power Engineering Department, University of Damascus, Damascus, Syria. fouad.salha@yahoo.com

تحسين سلوك الحماية من فقدان التغذية الرئيسية في شبكات التوزيع الكهربائية بوجود التوليد الكهربائي الموزع باستخدام منحنيات الأداء

د. فؤاد صالحه*

(تاريخ الإيداع 7 / 11 / 2021. قُبِلَ للنشر في 4 / 1 / 2022)

□ ملخص □

تعد الحماية من فقدان التغذية الكهربائية الرئيسية (LOM) (Loss Of Mains) شرطاً أساسياً لربط التوليد الكهربائي الموزع مع شبكة التوزيع الكهربائية. تقوم هذه الحماية، التي تعتمد على القراءة اللحظية لتردد شبكة التوزيع، بفصل المولد الموزع فقط عند انقطاع التغذية من الشبكة الرئيسية. إن تغير التردد نتيجة أسباب أخرى مختلفة عن فقدان التغذية الرئيسية لشبكة التوزيع عادةً ما يسبب فشل في عمل هذه الحماية وبالتالي الفصل الخاطئ للمولدات الموزعة. يقدم هذا البحث طريقة تجنب هذا الفصل الخاطئ عن طريق؛ أولاً، استنتاج ورسم منحنيات الأداء لحواكم الحماية (Rate Of Change Of Frequency) (ROCOF) المستخدمة للحماية من فقدان التغذية الكهربائية الرئيسية. ثانياً، اقتراح شروط حدية لتوضع منحنيات الأداء بين منحنيين حديين يحصران منطقة تمثل منطقة العمل لهذه الحواكم. تمت النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج MATLAB لنظام كهربائي مؤلف من مولد موزع تزامني متصل مع النظام الكهربائي عبر خط توزيع قدرة كهربائية للتوتر المنخفض بالإضافة إلى عدد من الأحمال.

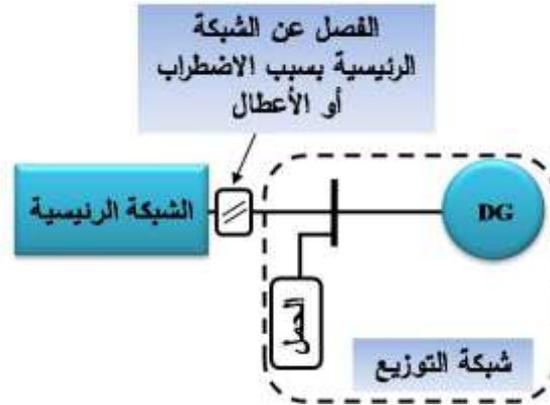
الكلمات المفتاحية: التوليد الكهربائي الموزع، المولد الكهربائي التزامني، حمايات فقدان التغذية الرئيسية، معدل تغير التردد بالنسبة للزمن.

* مدرس-قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية- جامعة دمشق-دمشق-سورية.

Fouad.salha@yahoo.com

مقدمة:

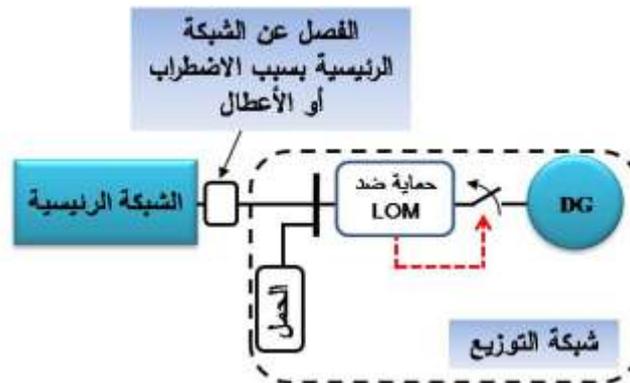
شهد النظام الكهربائي في الآونة الأخيرة تطوراً كبيراً في هيكليته. تمثل هذا التطور بإدماج أعداد كبيرة من وحدات التوليد الكهربائي ضمن شبكات التوزيع الكهربائية بمختلف مستويات توتراتها [1]. تدعى وحدات التوليد المدمجة ضمن شبكات التوزيع الكهربائي والقريبة من مناطق الأحمال الكهربائية بالمولدات الكهربائية الموزعة (Distributed Generators (DG) [2] [3] [1]. إن الإدماج المتزايد لوحدات التوليد الموزع DG يضيف على النظام الكهربائي ميزات عديدة منها، زيادة الموثوقية، تحسين جودة التغذية الكهربائية، إزالة الضوابط التنظيمية لأسواق الطاقة، بالإضافة إلى تقليل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون [4]. على الرغم من المنافع المتعددة للتوليد الموزع إلا أنه يمكن أن يسبب بعض التأثيرات السلبية على شبكة التوزيع. نذكر من هذه المشاكل، إعادة ضبط نظام الحماية ومشاكل الاستقرار والتشغيل [5]. تعد مسألة حماية شبكة التوزيع الكهربائية بوجود التوليد الكهربائي الموزع مجالاً هاماً للبحث والتطوير. إن عملية الفصل غير المخطط له لشبكة التوزيع بوجود (DG) عن الشبكة الرئيسية، بسبب الأعطال أو فصل القواطع الآلية، تعد من القضايا الهامة التي لا بد من بحثها ومعالجتها لما لها من آثار سلبية على المولدات الموزعة و الأحمال على حد سواء. تسمى عملية فصل شبكة التوزيع هذه بحالة التجزّر (Islanding) أو فقدان التغذية الرئيسية (LOM) (Loss Of Mains). تم في [5] تعريف حالة الـ (LOM) بأنها عملية فصل جزء من نظام التوزيع عن النظام الكهربائي الرئيسي مع بقاء هذا الجزء مغذى بالطاقة الكهربائية عبر واحدٍ أو أكثر من المولدات الموزعة (DG). (انظر الشكل (1) للتوضيح).



الشكل (1) رسم تخطيطي يبين مبدأ حالة التجزّر للمولد الموزع

تسبب حالة التجزّر مخاطر تتعلق بسلامة العنصر البشري العامل ضمن قطاع شبكة التوزيع كما تسبب نقصاً في تغذية الأحمال بالطاقة الكهربائية، بالإضافة إلى التسبب في أضرار تتعلق بالمولد الموزع (DG) والأحمال على حد سواء. في محاولة لتقليل هذه المخاطر فإن العديد من الإرشادات الفنية (Technical Guides) توصي بفصل المولدات الموزعة تلقائياً بعد حدوث (LOM) حتى يتم استعادة التغذية من الشبكة الرئيسية [5][6][7]. كما نعلم أن نظام الحماية لشبكات التوزيع الكهربائية مزود بوحدات إعادة الإغلاق الآلية (AR) (Automatic Recloser) التي تقوم بعملية الفصل و الوصل المتكرر بتأخيرات زمنية متلاحقة عند حدوث عطل مؤقت. تظهر المشكلة الرئيسية في وجوب فصل المولد الموزع في لحظة فصل معيدات الإغلاق الآلية (AR) التي تستغرق فترة زمنية 300ms لإعادة الوصل. عندئذٍ لا بد للمولد الموزع أن يكتشف حالة التجزّر و بالتالي فصله عن شبكة التوزيع قبل إعادة الإغلاق من

قبل معيد الإغلاق الآلي (AR) وذلك تجنباً للإخلال بشروط ربط منابع التغذية مع بعضها البعض [4]. يبين الشكل (2) مكان توضع الحماية ضد فقدان التغذية الرئيسية.



الشكل (2) مكان توضع الحماية ضد فقدان التغذية الرئيسية

عادةً، لا بد من كشف حالة (LOM) في غضون فترة زمنية من رتبة الملي ثانية تقدر بالمجال من 200 ms إلى 400 ms [8]. لتحقيق هذه الغاية لا بد من تزويد كل مولد موزع بجهاز لكشف (LOM). هناك تقنيات عديدة استخدمت في كثير من الأبحاث لتحقيق عملية الكشف الصحيح بأقل قدر ممكن من الكشف الخاطئ. تصنف تقنيات كشف فقدان التغذية الكهربائية الرئيسية إلى تقنيات فعالة وأخرى غير فعالة. تعتمد التقنيات غير الفعالة على القياس المباشر لمحددات الشبكة الكهربائية كالتوتر، التيار والتردد وعند تجاوزها لعتبة محددة يشير ذلك لبدء حدوث الفصل عن الشبكة الرئيسية. من هذه التقنيات، تقنية (ROCOF) (Rate Of Change Of Frequency) التي تعتمد على قياس معدل تغير التردد بالنسبة للزمن كما في [1] [3] [9] [10]. بالإضافة إلى تقنيات أخرى تعتمد على قياس تغير في زاوية فرق الطور للتوتر الكهربائي قدمت في [1] [9]. يقدم [4] طريقة تعتمد على قياس معدل تغير الاستطاعة الرديئة لحظة حدوث الفصل عن الشبكة الرئيسية. بالنسبة إلى التقنيات الفعالة، فهي تعتمد على حقن إشارة خارجية على إحدى محددات الشبكة ومراقبة تغير الإشارة الناتجة لتحديد مدى حدوث الفقدان في التغذية الكهربائية لشبكة التوزيع [3].

إن أنظمة حماية المولد الموزع التزامني تحتوي على حماية ترددية ضد ارتفاع أو انخفاض التردد في النظام الكهربائي الرئيسي، تقوم الحماية الترددية (O/U-F) (Over/Under Frequency) بفصل المولد الموزع تجنباً لحدوث ضرر في عمل المولد. تحدد قيم ترددات الفصل العليا والدنيا من قبل مشغلي النظام الكهربائي بالإضافة إلى الشركات المصنعة لوحدات التوليد الموزع. إن أهداف نظام حماية المولد الموزع (O/U-F) هي: حماية المولد الموزع والأحمال الكهربائية بالإضافة إلى التجهيزات الأخرى من العمل تحت الترددات غير النظامية بالإضافة إلى اكتشاف مدى مقدرة المولد الموزع على دعم الشبكة الكهربائية عند العمل تحت الشروط غير النظامية [1]. كما تتضمن الحماية الترددية للمولد الموزع التزامني على حماية أخرى مهمتها الوحيدة هي كشف فقدان التغذية الرئيسية لشبكة التوزيع (LOM).

كما نعلم أن قيمة التردد في نظام التوزيع الكهربائي تتعلق بمقدار توازن الاستطاعة الفعلية بين التوليد والأحمال عند حدوث (LOM). إن حدوث (LOM) قد يسبب عدم توازن في الاستطاعة الفعلية (Active Power Imbalance) (API) ما يؤدي إلى تغير لحظي للتردد تتعلق قيمته بمقدار عدم التوازن في هذه الاستطاعة. إن المنحنيات التي تعبر عن العلاقة بين API وزمن كشف LOM تسمى بمنحنيات الأداء.

تواجه حماية كشف LOM مشكلة أساسية وهي الفصل الخاطئ للمولد الموزع عند حدوث تغيرات في التردد ناجمة عن اضطرابات شديدة في الشبكة الكهربائية الرئيسية دون حدوث LOM. أي ظهور تعارض بين عمل الحماية ضد LOM مع عمل حمايات (O/U-F) Over/Under Frequency.

أهمية البحث وأهدافه:

عادةً، تعالج حماية المولدات الموزعة التزامنية (O/U-F) وحماية الكشف عن (LOM) بشكل منفصل عن بعضهما البعض. سنقوم في هذا البحث بمقاربة ترابط القضيتين السابقتين ومدى تأثيرهما على بعضهما البعض واستنتاج طريقة محددة لتحديد شروط عمل كلا نوعي الحماية السابقتين. يقدم هذا البحث إضافة أخرى من ناحية أخذه بعين الاعتبار شبكات التوزيع ذات التوتر المنخفض التي تشكل البنية الأساسية لإقامة الشبكات الميكروية (MicroGrids) في نظم التوزيع الكهربائية.

طرائق البحث و موادّه:

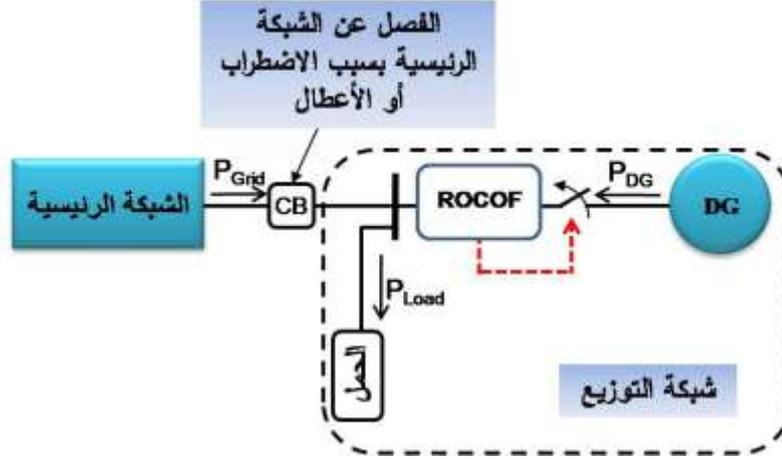
- 1- تم استخدام بيئة المحاكاة MATALAB/Simulink و MATALAB/Stateflow لنمذجة حاكمة الحماية (ROCOF) ضد فقدان التغذية الرئيسية (LOM) و حاكمة (O/U-F).
- 2- تم استخدام بيئة المحاكاة MATALAB/SimPowerSystems لنمذجة النظام الكهربائي المدروس المكون من شبكة لانهائية الاستطاعة متصلة مع مولد موزع تزامني عبر خط توزيع للقدره الكهربائيه بالإضافة إلى مجموعة من الأحمال الكهربائية المنتشرة على طول هذا الخط.
- 3- تم استنتاج منحنيات الأداء لحواكم الحماية (ROCOF) و (O/U-F) باستخدام النمذجة الديناميكية المتكررة عند قيم مختلفة لعدم توازن الاستطاعة الفعلية (API) في نظام التوزيع المدروس بعد حدوث (LOM). حيث تم تغيير الاستطاعة الميكانيكية على دخل المولد الموزع (DG) للحصول على قيم متدرجة و متزايدة لـ (API) ومن ثم استنتاج أزمته التشغيل لحواكم (ROCOF) و (O/U-F).

مبدأ الحاكمة ROCOF:

يبين الشكل (3) رسم تخطيطي للمولد الموزع المزود بحاكمة ROCOF والعامل على التوازي مع الشبكة الرئيسية. إن الفرق بين الاستطاعة الفعلية P_{DG} المغذاه من قبل المولد التزامني (DG) و تلك المستهلكة من قبل الحمل P_{Load} تعوّض من قبل الشبكة الرئيسية P_{Grid} . بالتالي فإن تردد الشبكة يبقى ثابتاً طالما بقي هذا التوازن في الاستطاعة الفعلية قائماً. عند فتح القاطع الآلي (CB) (Circuit Breaker) بسبب عطل ما، فإن نظام التوزيع المؤلف من المولد الموزع التزامني والحمل يعمل في حالة تسمى التجزّر (Islanding).

في هذه الحالة ينشأ عدم توازن لحظي في الاستطاعة الفعلية (API) بسبب فقدان استطاعة الشبكة الرئيسية P_{Grid} . تسبب (API) حالة عابرة في نظام التوزيع المفصول عن الشبكة الرئيسية و يبدأ التردد عندها بالتغير بشكل ديناميكي. سوف نستخدم هذا السلوك لنظام التوزيع في هذه الحالة لكشف حالة فقدان التغذية الرئيسية (LOM). في حال كان مقدار عدم توازن الاستطاعة الفعلية (API) في نظام التوزيع المفصول عن الشبكة الرئيسية ذا قيمة صغيرة،

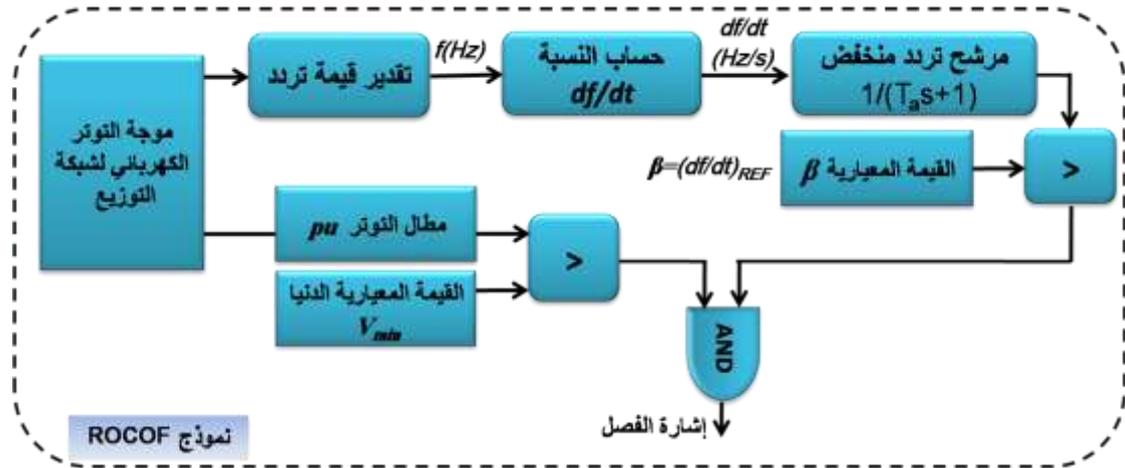
سيغير التردد بشكل بطيء. لذلك يمكن للقيمة (df/dt) أن تستخدم لكشف الفصل عن الشبكة الرئيسية بشكل أسرع من استخدام قيمة التردد f [1].



الشكل (3) رسم تخطيطي للمولد الموزع المزود بحاكمة ROCOF و العامل على التوازي مع الشبكة الرئيسية

نموذج المحاكاة لحاكمة ROCOF:

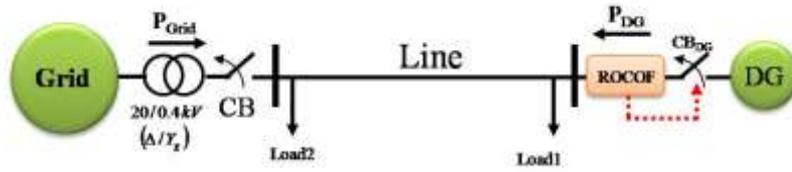
تقيس حاكمة ROCOF معدل تغير التردد بالنسبة للزمن خلال فترة زمنية مقدارها عدة مرات من دور موجة التوتر وعادة ما تكون من 2 إلى 50 دورة [9] [11]. تعالج الإشارة الناتجة بواسطة مرشح من الدرجة الأولى ثم تستخدم الإشارة الناتجة لكشف عملية فصل الشبكة الرئيسية. عند تجاوز قيمة معدل تغير التردد بالنسبة للزمن (df/dt) قيمة مرجعية $(df/dt)_{REF}$ ، تُرسل إشارة من ROCOF إلى القاطع الآلي لفصل المولد الموزع عن شبكة التوزيع. يبين الشكل (4) المخطط الصندوقي لمكونات الحاكمة ROCOF المستخدمة لكشف فقدان التغذية الرئيسية عن شبكة التوزيع. يستخدم مرشح حزمة التمرير المنخفضة $(1/(T_a s + 1))$ للتخلص من الحالات العابرة للتردد، حيث T_a يعبر عن الثابت الزمني للمرشح. لتجنب تفعيل الحاكمة عند حدوث الأعطال أو عند إقلاع المولد تم إضافة تابع إغلاق لإشارة الخرج باستخدام القيمة الصغرى لتوتر الشبكة V_{min} .



الشكل (4) المخطط الصندوقي لمكونات الحاكمة ROCOF

النموذج الرياضي لتحديد أداء حواكم ROCOF:

يبين الشكل (5) النظام الكهربائي المدروس. يتألف هذا النظام من نظام توزيع كهربائي للتوتر المنخفض متصل مع الشبكة الرئيسية عبر محولة (20/0.4 kV). يتم تغذية مجموعة من الأحمال السكنية المركزة والممتلئة بـ Load_{1,2} من الشبكة الرئيسية ومن المولد الموزع DG عبر خط توزيع كهربائي (Line). يزود المولد الموزع بحاكمة ROCOF لكشف عملية فصل التغذية من الشبكة الرئيسية وبالتالي فصل المولد DG باستخدام القاطع الآلي CB_{DG}. معظم الدراسات السابقة لم تدرس نظام التوزيع ذي التوتر المنخفض الذي يتميز بوجود تغيرات عابرة للتردد ذات مطالات كبيرة عند حدوث LOM. نركز في بحثنا هذا على نظام التوزيع للتوتر المنخفض الذي يؤسس لتكوين الشبكات الميكروية. المولد الموزع المستخدم في هذه الدراسة هو مولد تزامني. تم اعتبار الأحمال ذات استطاعة ثابتة والمولد التزامني ممثل بالنموذج المبسط.



الشكل (5) رسم تخطيطي للمولد الموزع المزود بحاكمة ROCOF والعامل على التوازي مع الشبكة الرئيسية

في ظروف تشغيل الحالة الثابتة هناك توازن بين الاستطاعة الفعلية المحقونة من المولد الموزع (P_{DG}) وتلك المحقونة من قبل الشبكة الرئيسية إلى نظام التوزيع (P_{Grid}) مع الاستطاعة الفعلية المستهلكة من قبل الحمل (P_L). السرعة الزاوية للمولد الموزع التزامني ω بالتالي الزاوية δ تبقى ثابتة. عند فتح قاطع الآلي CB بفعل الاضطرابات أو الأعطال في الشبكة الكهربائية فإن المولد الموزع سيعمل في نظام مفصول عن الشبكة الرئيسية. في لحظة الفصل هذه، يختل التوازن في الاستطاعة الفعلية بين التوليد الموزع والشبكة الرئيسية من جهة والحمل من جهة أخرى بفعل غياب الاستطاعة الفعلية المحقونة من الشبكة الرئيسية P_{Grid} . يمكن لمقدار عدم توازن الاستطاعة الفعلية (ΔP) أن يسبب حالة عابرة في سلوك المولد الموزع التزامني. يمكننا دراسة سلوك المولد الموزع الديناميكي بدراسة معادلة التآرجح الموضحة في [12]، [13] و [14].

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_M - P_{Load} = -P_{Grid} = \Delta P \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega_0 - \omega$$

حيث H ثابت العطالة للمولد التزامني. $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ السرعة الزاوية للمولد، f_0 التردد الاسمي للنظام P_M الاستطاعة الميكانيكية المقدمة للمولد. بحل المعادلة (1) يمكن إيجاد علاقة معدل تغير التردد بالنسبة للزمن.

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\omega}{dt} = \frac{f_0}{2H} \Delta P \quad (2)$$

تبين المعادلة (2) أن معدل تغير التردد بالنسبة للزمن تتناسب طردياً مع مقدار عدم توازن الاستطاعة الفعلية في نظام التوزيع عند حدوث (LOM). وباعتبار أن الحمل معبر عنه بقيمة استطاعة ثابتة فإن ΔP تبقى ثابتة. إن إشارة (df/dt) المحسوبة في نموذج ROCOF المبين في الشكل (4) تمت معالجتها بواسطة مرشح الترددات المنخفضة من الدرجة الأولى، لذلك يمكن حساب الإشارة الناتجة عن الحاكمة ROCOF حسب المعادلة التالية و بالاعتماد على المعادلة (2):

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0 \Delta P}{2H} \frac{1}{T_a s + 1} \quad (3)$$

حيث s هو متحول لابلاس. و بالإرجاع إلى المستوي الزمني:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0 \Delta P}{2H} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right) \quad (4)$$

يمكن لحاكمة ROCOF أن تقلع عندما تتجاوز قيمة معدل تغير التردد بالنسبة للزمن المبينة في المعادلة (4) القيمة العيارية المثبتة ضمن إعدادات الحاكمة و التي سميناها β في الشكل (4). بالتالي قبل إقلاع الحاكمة لابد للإشارة β أن تساوي الإشارة المحسوبة بالمعادلة (4) و يمكننا كتابة هذه المعادلة بالشكل التالي لتحديد القيمة المعيارية لإعدادات الحاكمة:

$$\beta = \frac{df}{dt} = \frac{f_0 \Delta P}{2H} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right) \quad (5)$$

يمكن من المعادلة السابقة حساب القيمة β إذا علمنا زمن الكشف عن (LOM) والقيمة الأصغرية لمقدار عدم توازن الاستطاعة الفعلية ΔP . يمكن حل المعادلة (5) لحساب زمن اكتشاف (LOM) من أجل قيمة محددة لـ β

$$t_d = -T_a \ln \left(1 - \frac{2H}{f_0 \Delta P} \beta \right) \quad (6)$$

يمكن من خلال هذه المعادلة حساب زمن الكشف عن (LOM) إذا علمنا القيمة β و قيمة ΔP .

منحنيات الأداء لحواكم ROCOF:

إن سلوك الحاكمة ROCOF يتعلق بشكل كبير بمقدار عدم توازن الاستطاعة الفعلية ΔP في نظام التوزيع بعد حدوث (LOM). من أجل قيمة كبيرة لـ ΔP فإن عملية الكشف عن (LOM) تكون سريعة بما يكفي من أجل قيمة محددة لـ β . يمكن ملاحظة هذه الحقيقة من وجود ΔP في المقام في المعادلة (6) و بالتالي إن أكبر قيمة لـ ΔP تجعل الكسر أصغر ما يمكن و قيمة اللوغاريتم، بالتالي، قريبة من الصفر (أو أصغر ما يمكن) و بالتالي قيمة t_d صغيرة جداً. من ناحية أخرى، فإن القيمة الصغيرة لـ ΔP يمكن أن تسبب زمن كشف عن (LOM) كبير أو يمكن أن تصادف حالة عدم كشف عن فقدان التغذية من الشبكة الرئيسية. إن المنحنيات المعبرة عن العلاقة بين t_d و ΔP تسمى بمنحنيات الأداء لحواكم ROCOF [8] [9] [11]. يمكن رسم هذه المنحنيات بالاعتماد على العلاقة (6) كما يمكن استنتاج هذه المنحنيات من أجل النظام الكهربائي المبين في الشكل (5) بتكرار عملية النمذجة الديناميكية للنظام الكهربائي المدروس و ذلك بإعطاء قيم متغيرة لـ ΔP و تسجيل قيم t_d المقابلة لها من أجل كل قيمة مختارة لـ β .

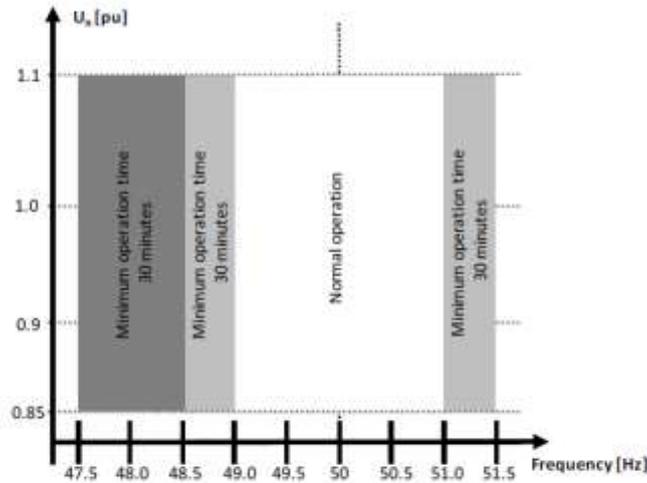
إعدادات حواكم التردد في شبكة التوزيع بوجود التوليد الكهربائي الموزع:

تحدد المواصفات القياسية العالمية زمن كشف حدوث LOM وكذلك حدود ترددات التشغيل كما هو مبين في الجدول (1).

جدول (1) زمن كشف LOM و مجال التردد و التوتر لأنظمة قياسية عالمية متنوعة [15]

Standard	Quality factor	Island detection time, t (ms)	Range of frequency	Voltage range
IEEE 1547	1	$t < 2000$	$59.3 \leq f \leq 60.5$	$88\% \leq V \leq 110\%$
IEC 62116	1	$t < 2000$	$f_0 - 1.5 \text{ Hz} \leq f \leq f_0 + 1.5 \text{ Hz}$	$85\% \leq V \leq 115\%$
Korean standards	1	$t < 500$	$59.3 \leq f \leq 60.5$	$88\% \leq V \leq 110\%$
UL 1741	≤ 1.8	$t < 2000$	Setting value	Setting value
VDE 0126-1-1	2	$t < 200$	$47.5 \text{ Hz} \leq f \leq 50.2 \text{ Hz}$	$80\% \leq V \leq 115\%$
IEEE 929-2000	2.5	$t < 2000$	$59.3 \leq f \leq 60.5$	$88\% \leq V \leq 110\%$
AS47773-2005	1	$t < 2000$	Setting value	Setting value

نلاحظ من الجدول أن هناك زمن أعظمي لكشف حالة فقدان التغذية الرئيسية لشبكة التوزيع عند قيم عليا ودنيا للتردد التي تحدد مجال العمل الطبيعي لشبكة التوزيع الكهربائية بوجود التوليد الكهربائي الموزع. إن قيمة حدود مجال ترددات العمل الطبيعية بالنسبة للنظام الدانماركي (على سبيل المثال) موضحة بالشكل (6).



الشكل (6) القيم الصغرى للترددات الزمنية التي يمكن للمولد العمل بها بدون الفصل عن الشبكة [16]

نلاحظ من الشكل السابق وجود قيمتين تحددان مجال تردد العمل الطبيعي للمولد هما 49-51 Hz. في أنظمة كهربائية أخرى تحدد ترددات العمل الطبيعي بالمجال (49.9-50.1 Hz) كما في النظام المحلي (انظر الجدول (2)). ضمن مجال ترددات العمل السابقة يمكن لنظام التحكم الأولي بالتردد في محطات التوليد بالقيام بتصحيح انحراف التردد عن القيمة الطبيعية. يبين الجدول (2) مجال تردد التشغيل اللازم لتدخل عملية التحكم الثانوي في نظام القدرة الكهربائي حيث يحدد هذا المجال بالقيم (49.5-50.5 Hz). يمكن لنظام الحماية الترددية أن يعمل و بتأخير زمني عند انخفاض قيمة التردد عن القيمة 49.5 Hz كما يجب أن يعمل نظام الحماية الترددية لحظياً عند الانخفاض إلى قيمة دون الـ 47 Hz .

الجدول (2) المجالات الترددية عند حالات عمل مختلفة لنظام القدرة المحلي [17]

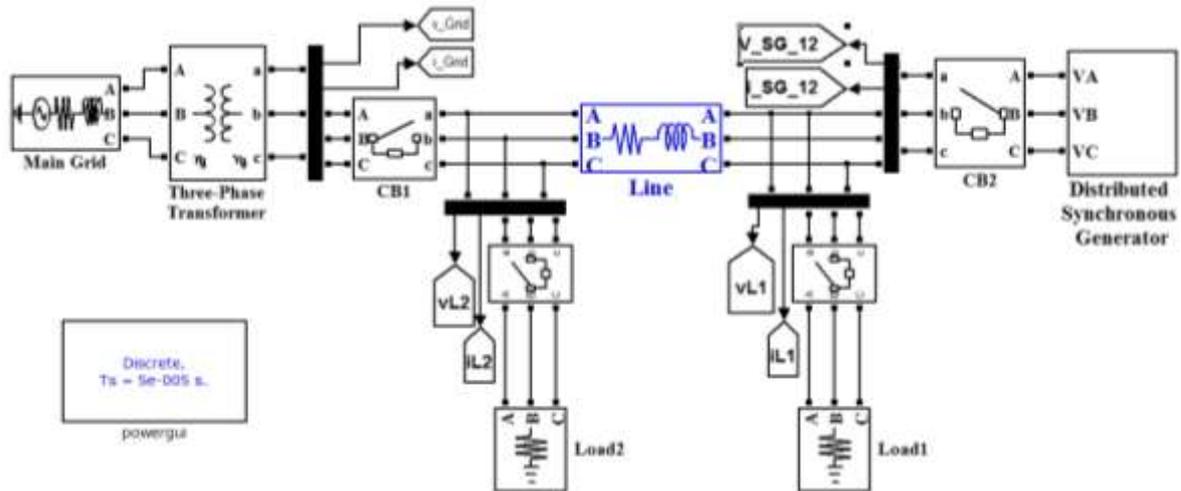
مجال التردد الموافق [Hz]		حالات التشغيل
كثافة مئوية	كثافة	
50±0.2%	49.9-50.1	حالة التشغيل الطبيعية
50±1%	49.5-50.5	حالة تغير في الحمولة
50+2%	47.0-51	حالة خروج مولد واحد
50-6%		
50±6%	47.0-53	حالات طوارئ أخرى

عادة، تتأثر شبكة التوزيع الكهربائية بتغيرات التردد الناتجة عن الاضطرابات في النظام الكهربائي كالاختناقات أو خروج وحدات توليد كبيرة عن الخدمة. إن هذه التغيرات تسبب خللاً في عمل حواكم ROCOF باعتبارها تعتمد على قياس التردد أيضاً. لتجنب هذا الخلل سنقوم بأخذ مجال العمل الطبيعي للتردد بعين الاعتبار في اختيار توضع منحنيات الأداء لحواكم ROCOF. نفترض في هذه الدراسة توضع منحنيات الأداء لهذه الحواكم ضمن المنطقة المحددة بثلاثة منحنيات: الأول هو منحنى الزمن الأعظمي لكشف حدوث LOM ، الثاني هو منحنى الحد الأدنى للتردد الطبيعي (49.5 Hz)، المنحنى الثالث هو منحنى الحد الأدنى لعمل حواكم التردد الأصغري للخطية (47Hz). بالاعتماد على هذه الفرضية نضمن عمل حواكم ROCOF فقط عند حدوث LOM وتجنب عملها عند حدوث اضطرابات طبيعية للتردد.

النتائج والمناقشة:

- استنتاج منحنيات الأداء:

يبين الشكل التالي النظام الكهربائي المدروس، كما يبين الجدول (2) معطيات عناصر هذا النظام.



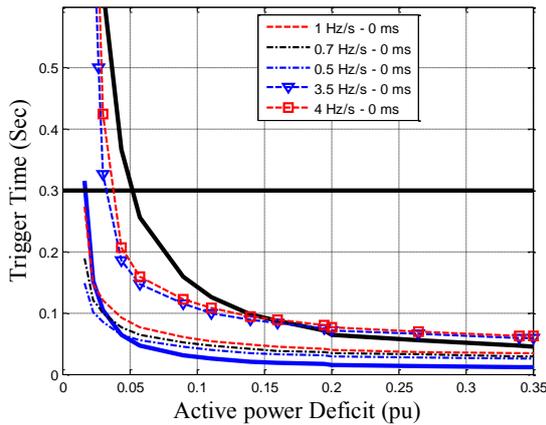
الشكل (7) النظام الكهربائي المستخدم لاستخراج منحنيات الأداء

تم استخدام آلة متوافقة كمولد موزع متصل مع الشبكة الرئيسية عبر خط توزيع قدرة. تم تزويد المولد المتوافق بألية تحكم بالجهد عبارة عن مصحح من نوع تناسبي تفاضلي.

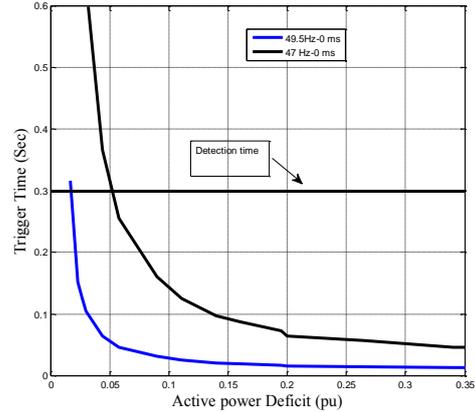
جدول (2) معطيات النظام الكهربائي المستخدم

400 V, 50 Hz	التوتر
85 KVA/cosφ=0.85	استطاعة المولد التزامني
10mH	مفاعلة خط التوزيع
1.2Ω	مقاومة خط التوزيع
20/0.4kV	المحول
16.225 kW	Load1
9 kW	Load2

تم رسم منحنيات الأداء المعبرة عن علاقة التردد بدلالة عجز الاستطاعة الفعلية (ΔP) للنظام المدروس باستخدام النمذجة الديناميكية المتكررة. تم تطبيق استطاعة ميكانيكية ثابتة عند كل مرحلة نمذجة من أجل الحصول على القيم المعبرة عن المحور الأفقي الممثل لعجز الاستطاعة الفعلية في النظام المدروس بعد حدوث LOM. تم في لحظة محددة من النمذجة فصل تغذية الشبكة الرئيسية عن طريق فتح القاطع CB1 (انظر الشكل 7). تم أخذ قراءات التردد في شبكة التوزيع المفصولة عند القيمتين 49.5 Hz و 47Hz عند كل مرحلة نمذجة. بالاعتماد على القراءات السابقة تم رسم المنحنيات المبينة في الشكل (8). تم اعتبار (300ms)، الممثل بخط مستقيم، كزمن أعظمي لكشف فصل الشبكة الرئيسية (انظر الشكل 8). باتباع نفس الطريقة تم إنشاء منحنيات الأداء المعبرة عن علاقة زمن تشغيل حواكم ROCOF بدلالة العجز في الاستطاعة الفعلية بعد حدوث LOM عند قيم متعددة لإعدادات الحاكمة (0.5-4 Hz/s) (انظر الشكل 9). إن تموضع المنحنيات السابقة فوق المنحني المعبر عن قيمة التردد (49.5 Hz) تعني أن الحاكمة ROCOF لن تقلع (لن تصل إلى العتبة df/dt الخاصة بها) إلا بعد هبوط التردد عن القيمة (49.5 Hz) أي خروجه عن مجال العمل الطبيعي بعد حدوث LOM. إذا فرضنا وقوع أحد منحنيات الأداء (ليكن منحنى $df/dt=1\text{Hz/s}$) تحت منحنى (49.5 Hz)، عندئذ من أجل أي اضطراب يقع خارج شبكة التوزيع و بدون حدوث LOM سيقلع الحاكم ROCOF ويعطي الأمر بفصل خاطئ للمولد الموزع بالرغم من أن التردد لم يخرج من حدود مجاله الطبيعي (أكبر من 49.5 Hz).

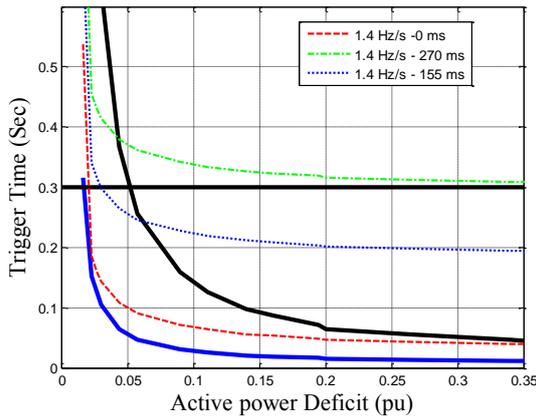


الشكل (9) منحنيات الأداء لحواكم ROCOF عند إعدادات مختلفة

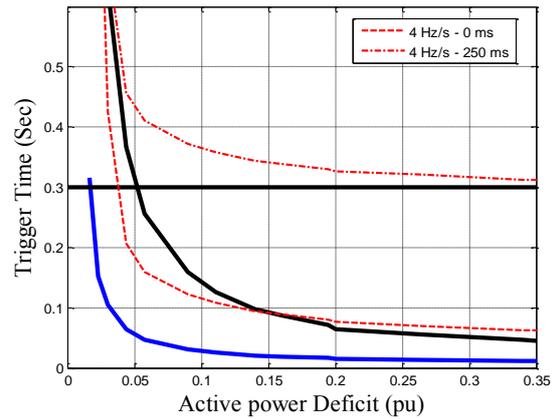


الشكل (8) منحنيات الأداء الموافقة لقيم 49.5 Hz و 47Hz

عادة، يمكن التحكم بزمن إقلاع ROCOF لتحقيق تنسيق فعال بين مختلف الحواكم بإعطاء تأخير زمني لإقلاع الحاكمة. يجب الانتباه إلى أن التأخير الزمني غير المدروس يمكن أن يضع منحنى الأداء للحواكم فوق المنحني الخاص بالقيمة الأعظمية اللازمة لكشف LOM وبالتالي لن تقلع الحاكمة ROCOF ضمن الزمن المحدد مما يسبب الأضرار للمولد وللأحمال. المنحنيات الموضحة في الشكلين (10-11) تبين تموضع منحنيات الأداء خارج المنطقة المحددة بالمنحنيات الثلاثة (49.5 و 47 Hz و $t=300\text{ms}$) ما يسبب عدم الكشف عن LOM ضمن الزمن المحدد بالموصفات القياسية.



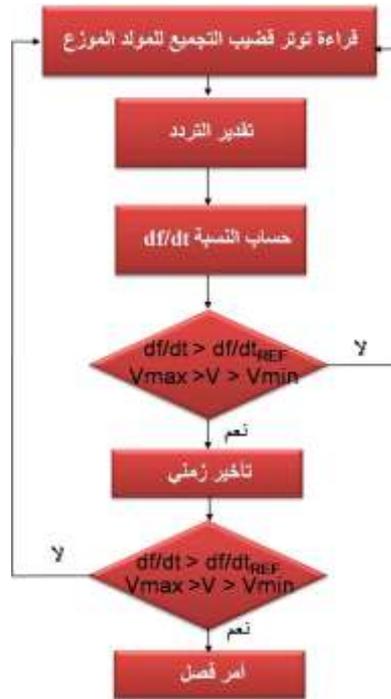
الشكل (11) منحنيات الأداء لحواكم ROCOF بدون و مع تأخير زمني (1.4Hz/s)



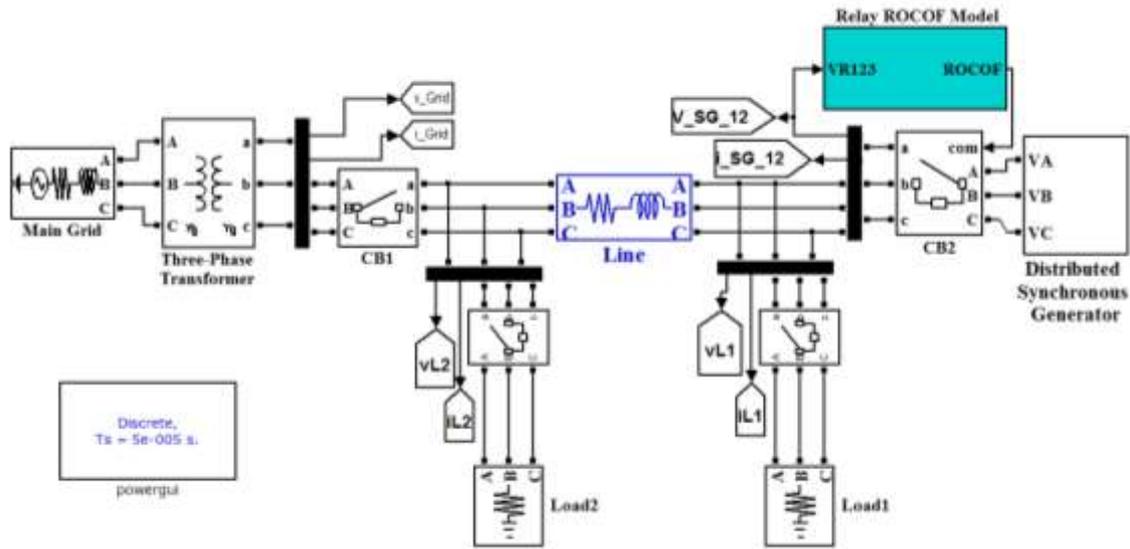
الشكل (10) منحنيات الأداء لحواكم ROCOF بدون و مع تأخير زمني (4Hz/s)

- تطبيق طريقة اختيار إعدادات ROCOF على النظام المدروس:

يوضح الشكل (12) خوارزمية عمل الحاكمة ROCOF الموضحة سابقاً في الشكل (4). تم إنشاء النموذج باستخدام البيئة البرمجية الافتراضية MatLab/Stateflow. تم تزويد المولد الموزع المبين في الشكل (7) بهذه الحاكمة. الشكل (13) يوضح النظام الكهربائي المستخدم بعد تزويد المولد الموزع بالحاكمة ROCOF.



الشكل (12) خوارزمية عمل الحاكمة ROCOF



الشكل (13) يوضح النظام الكهربائي المستخدم بعد تزويد المولد الموزع بالحاكمة ROCOF

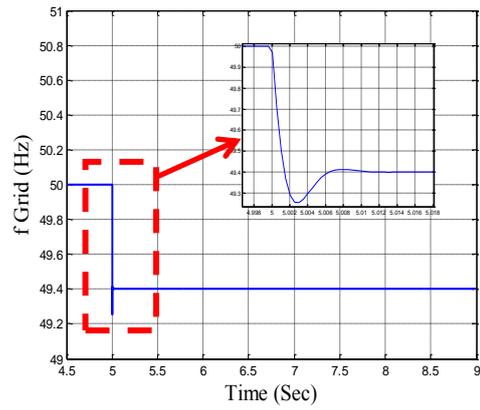
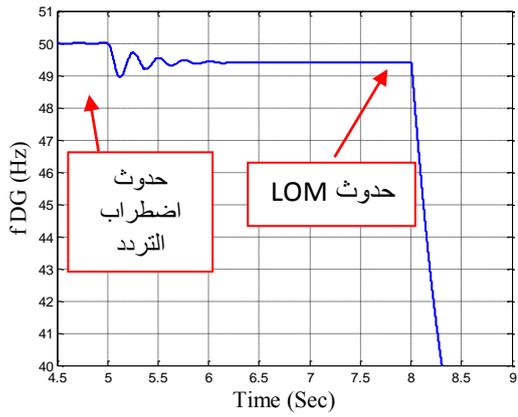
تم اختيار إعدادات الحاكمة ROCOF لتأخذ القيمة $df/dt=3.5\text{Hz/s}$. إن هذه القيمة متوافقة مع العديد من المواصفات القياسية العالمية كما هو مبين في الجدول (3).

الجدول (3) متطلبات كشف LOM [16]

تابع الحماية	الرمز	الإعدادات (المجال/الدقة)	الوحدات	زمن الفصل (المجال/الدقة)	الوحدات
تغير التردد	df/dt	0-0.3/0.1 Default ± 2.5	Hz/s	0-5/0.01 Default 0.08	s

في الواقع، إن هذه القيمة تتوافق مع منحنى أداء يقع ضمن المنطقة الواقعة بين المنحنيين الموافقين لـ (Hz) 49.5 و (47 Hz) كما يوضح الشكل (9). من أجل اختبار فعالية هذا الاختيار تم إجراء اضطراب للتردد ناجم عن اضطراب في النظام الكهربائي في اللحظة 5 ثانية من زمن النمذجة حيث انخفض التردد إلى القيمة 49.4 Hz و بدون إحداث LOM (انظر الشكل 14). كما تم إجراء LOM عند اللحظة 8 ثانية من زمن النمذجة بفتح القاطع CB. إن هذه التغيرات الحاصلة على قيمة التردد المختلفة المنشأ، من شأنها أن تبين هل للحاكمة ROCOF أن تفلح عند عدم حدوث LOM أم لا؟

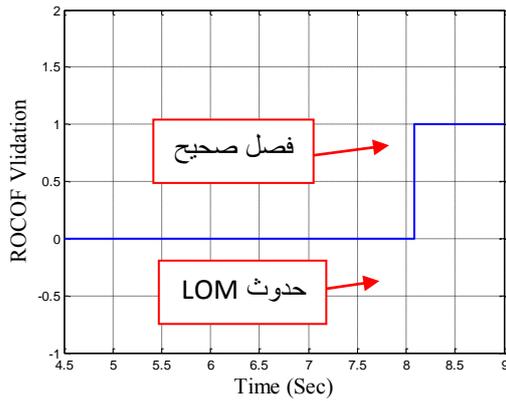
نلاحظ من الشكل (15) استجابة المولد الموزع لانخفاض تردد الشبكة الكهربائية وكذلك استجابته عند حدوث LOM. نلاحظ استمرار التردد بالانخفاض بعد حدوث LOM نظراً لعدم قدرته على تغذية كامل الحمل بالسرعة المطلوبة نتيجة نظام التحكم بسرعة دوران المحرك القائد للمولد.



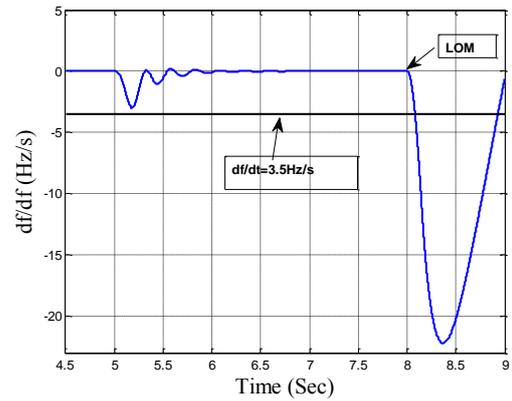
الشكل (14) التردد على قضيب تجميع الشبكة الرئيسية الشكل (15) التردد على قضيب المولد الموزع بدون استخدام الحماية

ROCOF

نلاحظ من الشكل (17) تفعيل الحاكمة ROCOF وإعطاء الأمر بفصل المولد الموزع فقط عند حدوث LOM وعدم تحسبها لاضطراب التردد القادم من ناحية النظام الكهربائي عند انخفاضه إلى القيمة 49.4 Hz. في الواقع كان من الضروري اختيار هذه القيمة كدليل على خروج التردد عن مجال العمل الطبيعي وهو 49.5 Hz.



الشكل (17) تفعيل خرج ROCOF عند حدوث LOM

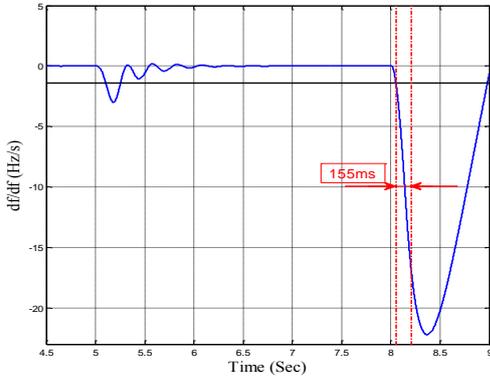


الشكل (16) معدل تغير التردد بالنسبة للزمن

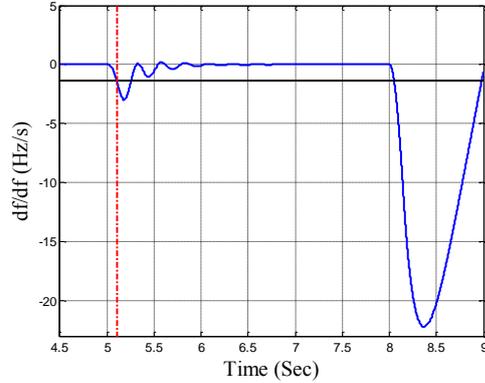
ملاحظة: الهدف من الدراسة عبر نماذج المحاكاة فقط بيان لحظة تفعيل الحواكم و اختبار مدى فعالية النماذج المنجزة لذلك لم يتم تطبيق أوامر الفصل للحاكمة ROCOF على القواطع الآلية لفصل المولد الأمر الذي أدى لإكمال النمذجة حتى اللحظة 9 ثانية (انظر الشكل 16 و 17).

كإثبات لصحة اختيارنا قمنا بإجراء تجربة أخرى و تثبيت إعدادات الحاكمة ROCOF عند القيمة 1.4 Hz/s و حصلنا على النتائج التالية المبينة على الشكل (18) والشكل (20). نلاحظ هنا استجابة الحاكمة ROCOF وعدم اكتشاف حدوث LOM بل تفعيلها فقط عند انخفاض التردد الناشئ عن اضطراب الشبكة الكهربائية الرئيسية عند اللحظة 5 ثانية من زمن النمذجة. يمكن لاختيارنا لقيمة 1.4Hz/s أن يكون فعالاً إذا أعطينا لزمن تفعيل الحاكمة ROCOF تأخيراً زمنياً بالعمل اعتباراً من لحظة الكشف عن اضطراب التردد أو لحظة حدوث LOM. في الواقع عبر الاقتراح السابق نكون قد أرحنا منحني الأداء الخاص بهذه القيمة (1.4Hz/s) إلى الأعلى بمقدار قيمة التأخير الزمني (ليكن هنا 155 ميلي ثانية). منحني الأداء الموافق لهذه الحالة مبين في الشكل (11) الخط الأزرق المنقط. نتائج

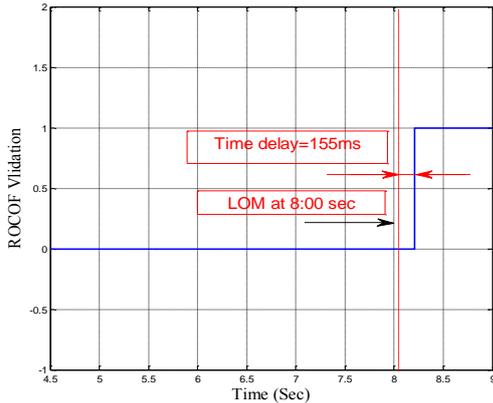
المحاكاة لهذه الحالة مبينة في الشكلين (19 و 21). بين الشكل (21) تحسس الحاكمة ROCOF لتغير التردد الناتج عن اضطراب التردد الناشئ عن اضطراب في تردد الشبكة الرئيسية بالإضافة إلى تحسسها إلى حدوث LOM ولكن بسبب إضافة شرط التأخير الزمني إلى خوارزمية عمل الحاكمة حيث يتم التأكد من صحة الشروط بعد مرور فترة زمنية (تأخير زمني) على حدوث الاضطراب.



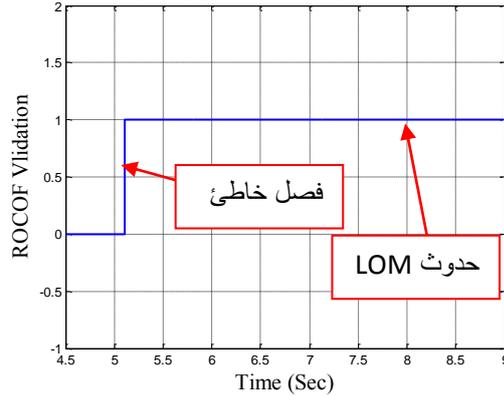
الشكل (19) معدل تغير التردد بالنسبة للزمن
 $df/dt= 1.4 \text{ Hz/s}-155\text{ms}$



الشكل (18) معدل تغير التردد بالنسبة للزمن
 $df/dt= 1.4 \text{ Hz/s}-0\text{ms}$



الشكل (21) تفعيل خرج ROCOF عند حدوث LOM فقط
 $df/dt= 1.4 \text{ Hz/s}-155\text{ms}$



الشكل (20) تفعيل خرج ROCOF عند حدوث اضطراب الشبكة الرئيسية
 $df/dt= 1.4 \text{ Hz/s}-0\text{ms}$

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1- تقدم حواكم الحماية ROCOF التي تقيس معدل تغير التردد بالنسبة للزمن آلية جيدة لكشف حالة فقدان التغذية من الشبكة الرئيسية في شبكات التوزيع الحاوية على مولدات موزعة.
- 2- أظهرت النتائج مدى أهمية منحنيات الأداء لحاكمات الحماية الترددية في عملية اختيار إعدادات هذه الحاكمات.
- 3- ساعدت طريقة اختيار مواضع منحنيات الأداء لهذه الحواكم ضمن حدود بيانية في تجنب الفصل الخاطئ لحاكمات الحماية ROCOF ضد فقدان التغذية الرئيسية LOM خاصة عند حدوث تغيرات في التردد غير ناجمة عن فقدان التغذية من الشبكة الرئيسية.

4- عند توضع منحنى الأداء للحاكمة ROCOF ضمن منطقة العمل، فإن إضافة تأخيرات زمنية يحسن من أدائها و يعطيها دقة في العمل و تقليل من عمليات الفصل الخاطئ بشكل أكبر.

التوصيات:

- 1- التنسيق بين حواكم كشف فقدان التغذية الرئيسية LOM في حالة وجود مؤشر اختراق كبير للمولدات الموزعة.
- 2- استخدام طرق الذكاء الصناعي في عملية الاختيار الأمثل لأزمنة الكشف عن فقدان التغذية الرئيسية لشبكة التوزيع.

قائمة بالمصطلحات:

LOM	Loss Of Mains	فقدان المصدر
ROCOF	Rate Of Change Of Frequency	معدل تغير التردد
DG	Distributed Generator	المولد الموزع
O/U-F	Over/Under Frequency	ارتفاع / انخفاض التردد
API	Active Power Imbalance	عدم توازن الاستطاعة الفعلية
AR	Automatic Recloser	معيد الإغلاق الآلي

References:

- [1] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac , *Embedded generation*, The Institution of Electrical Engineers : London, 2000.
- [2] M. Liserre, T. Sauter and J. Y. Hung, "Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics" in *IEEE Ind. Electronics Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 18-37, March 2010.
- [3] M. R. Alam, Most. T. A. Begum, K. M. Muttaqi, *Assessing the Performance of ROCOF Relay for Anti-islanding Protection of Distributed Generation under Subcritical Region of Power Imbalance*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 5395-5405, 2019.
- [4] S. Nikolovski, H. R. Baghaee and D. Mlakic, "Islanding detection of synchronous generator-based DGs using rate of change of reactive power", *IEEE Systems Journal*, vol. PP, no. 99, pp. 1-11, Jan. 2019.
- [5] IEEE Std 1547, *Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE, 2003.
- [6] G59/1, *Recommendations for the Connection of Embedded Generating Plant to the Regional Electricity Companies Distribution Systems*, Electricity Association Std, 1991.
- [7] CIGRÉ, *Impact of Increasing Contribution of Dispersed Generation on the Power System*, Working Group 37.23, 1999.
- [8] J.C.M. Vieira , W. Freitas , W. Xu , A. Morelato, *Performance of frequency relays for distributed generation protection*, *IEEE Transactions on Power on Power Delivery* vol 21, NO. 3, pp.1120 – 1127, July 2006
- [9] W. Freitas, W. Xu, C. M. Affonso and Z. Huang, "Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1315-1324, April 2005.
- [10] J.C.M. Vieira; W. Freitas; Wilsun Xu; A. Morelato, *Efficient Coordination of ROCOF and Frequency Relays for Distributed Generation Protection by Using the Application Region*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, Issue: 4, Oct. 2006.

- [11] J. C. M. Vieira, W. Freitas, Z. Huang, W. Xu, and A. Morelato, "Formulas for predicting the dynamic performance of ROCOF relays for embedded generation applications," IEE Proc. Gen. Transm. Distrib.vol. 153, no. 4, pp. 399–406, July 2006.
- [12] D. Motter, J. C. M. Vieira, and D. V. Coury, "Development of frequency based anti-islanding protection models for synchronous distributed generators suitable for real-time simulations," IET Gen. Trans. Distrib.vol. 9, no. 8, pp. 708–718, 2015.
- [13] Kundur, P, *Power system stability and control*, (McGraw-Hill, New York, 1994)
- [14] M. Grebla, J.Yellajosula, H.K. Hoidalén, *Adaptive Frequency Estimation Method for ROCOF Islanding Detection Relay*, IEEE Transactions on Power Delivery Volume: 35, Issue: 4, Aug. 2020.
- [15] J. R. Reddy, A. Pandian, *Improved ROCOF relay for islanding detection of solar distributed generation*, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 14, No. 3, June 2019, pp. 1105~1113
- [16] Danish Electricity Supply Act, *Technical requirements for connection of power-generating plants to the low-voltage grid (≤ 1 kV)*, Type A and B, Version 1.2, February 2019
- [17] Alhussien Alkhayier, *Observation of Buses Voltage and Frequency in Syrian Power Transfer Network using Kohonen Self-Organized Maps*, Master thesis, Tishrine University 2017