مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (8) العدد (7) 2024
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (7) 2024

محاكاة نظام عداد يقيس تدفق القدرة الكهربائية بالاتجاهين في شبكة كهربائية متصلة بمنظومة كهروضوئية

أ.د.م علي بديع خضور*
د.م سحر عبد الكريم العلي**
م. داني كمال إبراهيم***

(تاريخ الإيداع 2024/2/18 . قُبِل للنشر في 2024/6/27)

□ ملخّص □

تم في هذا البحث تقييم أداء نظام مقترح لعداد قدرة كهربائي يقيس تدفق الطاقة بالاتجاهين في المنظومات الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة العامة، من خلال دراسة آلية تدفق القدرة الكهربائية بالاتجاهين والتغيرات اللحظية التي تطرأ على البارامترات الكهربائية (جهد وتيار واستطاعة) عند تغير اتجاه تدفق القدرة، وما يترتب عليه من تحديد أسس الكشف على اتجاه التدفق المتغير بتغير شدة الطاقة المتولدة من المنظومة الكهروضوئية وتغير الحمل الكهربائي.

تم بناء نموذج للعداد المقترح باستخدام برنامج Matlab/Simulink، يحوي على خوارزميات مقترحة لتحديد القيمة الفعالة لكل من الجهد والتيار المار عبره، بالإضافة لتحديد زاوية فرق الطور بين إشارة التيار والجهد لتحديد طبيعة القدرة المتدفقة سواء أكانت مستجرة من الشبكة العامة أو مقدمة للشبكة العامة.

بينت النتائج فعالية النظام المقترح في قياس تدفق القدرة بالاتجاهين، حيث حقق النظام دقة في قياس زاوية فرق الطور بخطأ قياس لا يتجاوز 0.3°، في حين كان خطأ قياس الاستطاعة لا يتجاوز 0.5 %.

الكلمات المفتاحية: عداد قدرة، تدفق القدرة، نظام كهروضوئي مرتبط بالشبكة، قياس بارامترات الشبكة.

* أستاذ في قسم هندسة الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس.
** مدرس في قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس.
*** ماجستير في هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (8) العدد (7) 2024
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (7) 2024

A Simulation of a Meter System measures Bidirectional Power flow in an Electric Grid connected to a Photovoltaic System

Prof. Ali Khadour [*]
Dr. Sahar Alali [**]
Eng. Danny Ibrahim [***]

(Received 18/2/2024 . Accepted 27/6/2024)

□ ABSTRACT □

In this study, the performance of a proposed system for an electric power meter that measures power flow in both directions in photovoltaic systems connected to the public grid was evaluated by studying the mechanism of bidirectional power flow and the momentary changes that occur in the electrical parameters (voltage, current, and power) when the power flow direction changes, and the consequent determination of the principles of detecting the direction of the variable flow by changing the intensity of the power generated by the photovoltaic system and changing the electrical load.

A model for the proposed meter was built using Matlab/Simulink software, containing suggested algorithms to determine the effective value of both voltage and current passing through it, in addition to determining the phase difference angle between the current and voltage signals to determine the nature of the flowing power, whether it is drawn from the public grid or supplied to the public grid.

The results showed the effectiveness of the proposed system in measuring power flow in both directions, where the system achieved accuracy in measuring the phase difference angle with a measurement error not exceeding 0.3˚, while the measurement error of power did not exceed 0.5%.

Keywords: Power Meter, Power flow, Grid connected Photovoltaic System, Measurement of Grid parameters.

[*] Professor in the Department of Renewable energies, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.
[**] Lecturer in the Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.
[***] Master of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

مقدمة

في السنوات الأخيرة، شهدنا زيادة ملحوظة في اعتماد أنظمة الطاقة الكهروضوئية PV كمصدر للطاقة المستدامة والمتجددة لتسهم في التقليل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتوليد كهرباء نظيفة، وعليه فإن دمج المنظومات الكهروضوئية مع الشبكة الكهربائية الحالية يعد أمرًا حيويًا للاستفادة من فوائدها وضمان توفير فعال للطاقة [1,2,3].
تتغير شدة الإشعاع الشمسي طوال اليوم وتبعاً للظروف الجوية المتغيرة، ومعه تتغير كمية الطاقة المولدة من المنظومة الكهروضوئية وذلك بالرغم من وجود نظام ملاحقة لنقطة الاستطاعة العظمى الذي يضمن الحصول على أقصى طاقة ممكنة من الألواح الكهروضوئية، هذا التغير ينتج عنه إما فائض في الطاقة عن حاجة الحمل أو نقص في تلبية احتياجات الحمل وهذا بدوره شجع على ربط منظومات الطاقة الكهروضوئية بالشبكة العامة [4,5,6].

في المنظومات الكهروضوئية المجهزة للربط مع الشبكة العامة يتم استخدام عداد قدرة كهربائي لقياس الطاقة المقدمة للشبكة العامة، ومن ناحية أخرى يتم استخدام عداد آخر لقياس الطاقة المستجرة من الشبكة العامة لتغذية الأحمال الكهربائية.

مع التطور الكبير في أجهزة قياس الطاقة واعتمادها على معالجات مخصصة لقياس الطاقة، تركز الأبحاث الحديثة على تصميم العداد الذكي بما يواكب التطور التقني في توليد الطاقة الكهربائية، حيث تم قياس الطاقة الفعالة والردية، وتطوير خوارزميات قياس لجودة الطاقة الكهربائية المقدمة للمستهلك [7] ، كما تم توضيح مجالات تطوير العدادات الكهربائية والتحديات الصعبة التي تواجه تطبيقها مثل التكلفة المرتفعة، وإمكانية تحصيل معطيات القياس عن بعد، وتصميم العداد الأحادي الطور والثلاثي الطور بالاعتماد على تقنية انترنيت الأشياء IOT [8] ، بالإضافة لوجود دراسات تصميمية لعدادات منخفضة التكلفة قابلة للتطبيق في البلدان النامية [9] والعديد من الدراسات الأخرى التي تسهب في شرح تفاصيل القياس وإرسال بيانات الطاقة، دون التطرق لألية قياس تدفق القدرة الكهربائية بالاتجاهين في منظومات الطاقة الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة العامة.

تبرز أهمية وجود عداد يقيس تدفق القدرة بالاتجاهين بحيث يعزز دمج الطاقات المتجددة مع الشبكة العامة ويتيح للمستهلك بيع الفائض من الطاقة لديه للشبكة العامة، وجود هذا النوع من العدادات يتيح للمستهلك التحكم بالاستهلاك ورصد وتحليل بيانات الطاقة لاتخاذ إجراءات تحسين الكفاءة وتقليل تكاليف استجرار الطاقة [1,10].

أهمية البحث وأهدافه

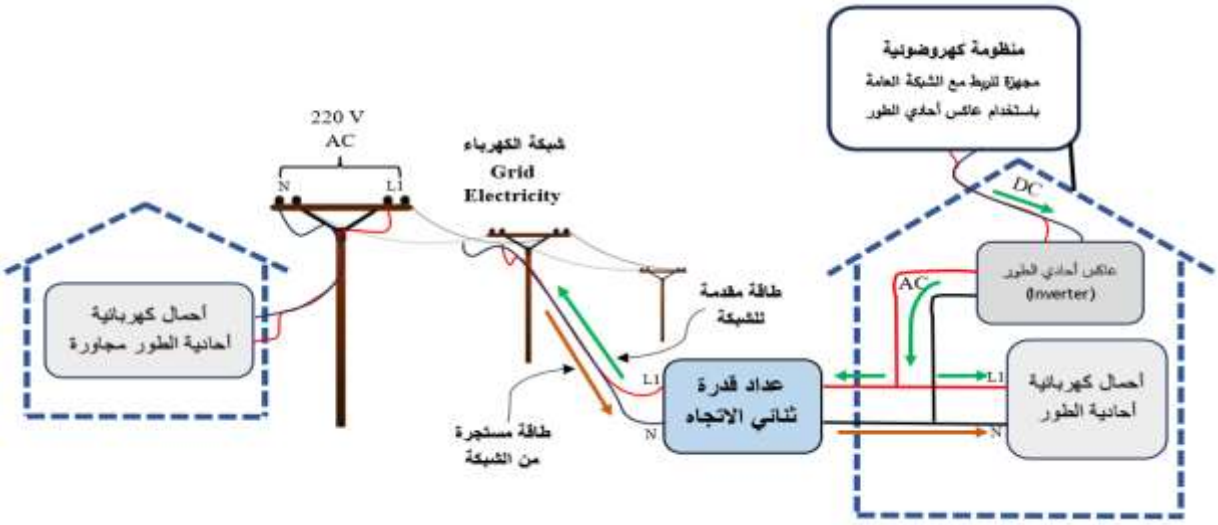
تكمن أهمية هذا البحث في تطوير نظام عداد قدرة كهربائي، يقيس تدفق القدرة بالاتجاهين وتوضيح مبدأ تدفق القدرة بالاتجاهين من خلال دراسة تحليلية للتغيرات الحاصلة في إشارات الجهد والتيار اللحظية، حيث يهدف لبناء نموذج مقترح للعداد باستخدام برنامج MATLAB /Simulink لتنفيذ خوارزميات القياس المقترحة والتي يسهل تنفيذها دون الحاجة لمعالجات إشارة باهظة الثمن، يسمح النموذج الكلي بإجراء محاكاة دقيقة يمكن استخدامها لدراسة كيفية تفاعل أنظمة الطاقة الكهروضوئية مع الشبكة العامة.

طرائق البحث ومواده

١- النظام المقترح لقياس تدفق القدرة بالاتجاهين:

يوضح الشكل (1) شبكة كهربائية منزلية أحادية الطور مرتبطة بالشبكة العامة، الشبكة الكهربائية تغذي مجموعة من الأحمال المنزلية أحادية الطور، بالإضافة لوجود منظومة كهروضوئية تحوي عاكس (Inverter) مجهز للربط مع الشبكة الكهربائية العامة.

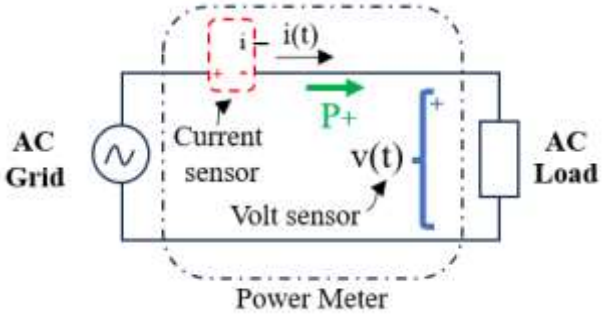
عند عدم كفاية طاقة المنظومة الكهروضوئية لتغذية الأحمال المنزلية، يتم استجرار طاقة كهربائية من الشبكة العامة لاستكمال تغذية الأحمال الكهربائية المنزلية، وفي حالة وجود فائض في الطاقة المولدة من المنظومة الكهروضوئية عن حاجة الأحمال المنزلية يتم ضخ الطاقة الفائضة إلى الشبكة العامة [11,6]. لذلك وجب تطوير عداد قدرة لقياس تدفق القدرة بالاتجاهين، دون الحاجة لوجود عدادين (عداد للطاقة المستجرة من الشبكة وعداد للطاقة المقدمة للشبكة)، وبالتالي مساعدة المستهلك في مراقبة الطاقة الخاصة به، والتشجيع على دمج الطاقات المتجددة مع الشبكة العامة، وتمكين المستهلك من بيع فائض الطاقة لديه للشبكة العامة.



الشكل (1) شبكة كهربائية منزلية أحادية الطور مرتبطة بمنظومة كهروضوئية

1-1 تحديد اتجاه تدفق القدرة الكهربائية:

إذا كان لدينا حمل كهربائي مرتبط مع منبع تغذية أحادي الطور كما هو موضح بالشكل (2)، يتم قياس الطاقة التي يستهلكها الحمل من خلال حساسي التيار والجهد الخاصين بعداد القدرة المستخدم.



الشكل (2) حمل كهربائي مرتبط مع منبع تغذية أحادي الطور

في حالة الحمل ذو طبيعة أومية تكون إشارة الجهد والتيار متطابقتين في الطور[13,12] ، كما هو موضح بالشكل (3)، وتعطى قيمة الاستطاعة المستجرة في الحمل بالعلاقة (1):

$$P(t) = V(t).i(t) \qquad (1)$$

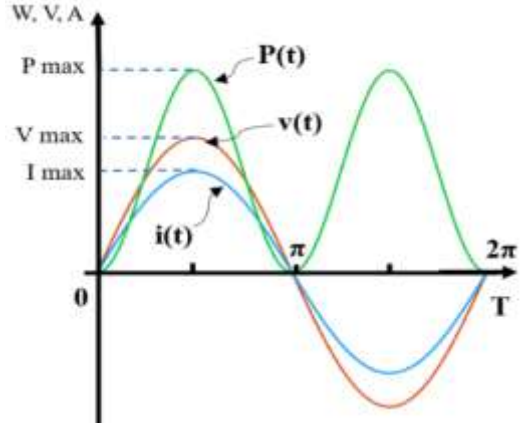
$$P = V_{RMS}.I_{RMS}.\cos(\theta) \quad [Watt] \qquad (2)$$

V_{RMS} : القيمة الفعالة لموجة جهد الدخل، I_{RMS}: القيمة الفعالة لموجة تيار الدخل، θ: زاوية فرق الصفحة بين موجة الجهد والتيار.

بما أن الحمل ذو طبيعة أومية ($\theta = 0$) وعليه فإن قيمة الاستطاعة الفعلية المستجرة للحمل ذو الطبيعة الأومية تعطى بالعلاقة:

$$P = V_{RMS}.I_{RMS} \quad [Watt] \qquad (3)$$

نلاحظ أن إشارة الاستطاعة المستجرة تكون في القسم الموجب دائماً كما هو موضح في الشكل (3).



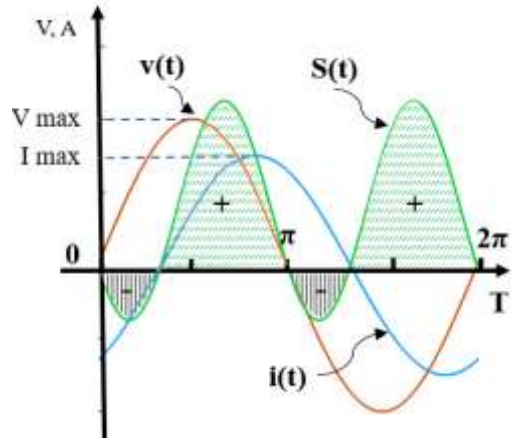
الشكل (3) إشارة الجهد والتيار والاستطاعة لحمل كهربائي ذو طبيعة أومية

في حالة الحمل ذو طبيعة غير أومية (ذو طبيعة حثية أو سعوية) سيكون هناك فرق في الطور بين موجة الجهد وموجة التيار، كما هو موضح في الشكل (4) الذي يمثل إشارة الجهد والتيار لحمل ذو طبيعة حثية [12].

إشارة الاستطاعة تعطى بالعلاقة (4):

$$S(t) = v(t).i(t) \qquad (4)$$

تدعى هذه الاستطاعة بالاستطاعة الظاهرية S(t)، كما هو موضح بالشكل (4) فإن إشارة الاستطاعة الظاهرية تتكون من قسمين القسم الموجب ويمثل الاستطاعة الفعلية P وهي المستهلكة في الحمل، والقسم السالب ويمثل الاستطاعة الردية Q.

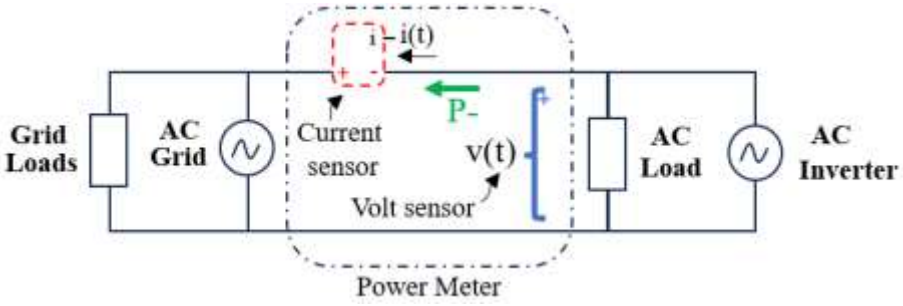


الشكل (4) إشارة الجهد والتيار والاستطاعة لحمل كهربائي ذو طبيعة حثية

في حالة وجود مصدر تغذية متناوب أخر يقوم بتغذية ذات الحمل السابق، في حالتنا هذه (المصدر هو عاكس المنظومة الكهروضوئية Inverter المجهز للربط مع الشبكة العامة)

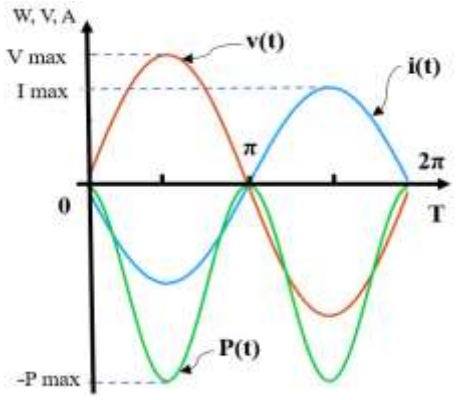
من وظائف هذا العاكس أن يقوم بتوليد موجة جهد متطابقة في الطور والتردد مع موجة جهد الشبكة، وبقيمة فعالة للجهد الناتج أكبر من قيمة جهد الشبكة بما يتناسب مع قيمة التيار الناتج من المنظومة الكهروضوئية، لضمان تدفق التيار باتجاه الحمل [14].

في حالة كون الطاقة الناتجة عن المنظومة الكهروضوئية تزيد عن حاجة الحمل يتم ضخ الفائض منها إلى الشبكة العامة للمساهمة في تغذية الأحمال الأخرى المرتبطة بالشبكة، كما هو موضح بالشكل (5) لدينا حمل كهربائي (AC Load) يتم تغذيته من مصدرين الشبكة العامة، وعاكس المنظومة الكهروضوئية، مع ملاحظة أن عداد القدرة Power Meter يحافظ على وضعه ضمن الشبكة (إي أن قطبية حساس التيار والجهد تبقى ذاتها).



الشكل (5) حمل كهربائي يتغذى من الشبكة العامة ومن عاكس المنظومة الكهروضوئية

وبالتالي إشارة التيار i(t) المقاسة باستخدام عداد القدرة السابق تكون متأخرة بالطور عن موجة جهد الشبكة v(t) بمقدار 180° كون التيار ينتقل بقطبية معاكسة لقطبية حساس التيار المستخدم في عداد القدرة، وإشارة الاستطاعة P(t) تكون إشارة سالبة، كما هو موضح بالشكل (6)، وهذا يدل على أن الاستطاعة تتدفق بالاتجاه المعاكس للحمل أي باتجاه الشبكة.



الشكل (6) إشارة الجهد والتيار والاستطاعة المقاسة عند ضخ الطاقة للشبكة العامة

المشكلة الأساسية هي التقلب المستمر في اتجاه تدفق الطاقة بما يتناسب مع تغير الطاقة المولدة من المنظومة الكهروضوئية وقدرتها على تلبية حاجة الحمل الكهربائي المتغير القيمة أيضاً [14].

مبدأ عمل العدادات الحالية يعتمد على قياس الطاقة من خلال جداء قيمة التيار المار مع قيمة الجهد المطبق، وبالتالي عدم القدرة على التمييز بين التيار المستجر والتيار المتدفق للشبكة كون العداد بشكل عام لا يستخدم إلا للقياس باتجاه واحد. بما أن موجة التيار متناوبة (متغيرة القطبية) وبالتالي لا يمكن تحديد اتجاه تدفق التيار كما في حالة التيار المستمر ذو القطبية الثابتة [11].

لتحديد اتجاه تدفق التيار يجب مقارنة إشارة التيار المقاسة من قبل حساس التيار مع إشارة موجة جهد الحمل المقاسة من قبل حساس الجهد وتحديد فرق الطور بينهما إذا كانت موجة الجهد متقدمة في الطور عن موجة التيار بمقدار 180°، فهذا يعني أن اتجاه تدفق التيار هو باتجاه الشبكة العامة، (والسبب في كون فرق الصفحة بين إشارة التيار والجهد المقاسة من قبل العداد هو 180° كون التيار المتدفق إلى الشبكة العامة يتدفق باتجاه معاكس لقطبية حساس التيار في العداد كما هو موضح بالشكل (5) علماً أن التيار المولد من الإنفرتر هو تيار مطابق في الطور لموجة جهد الشبكة إي فرق الصفحة يساوي 0° لأن الإنفرتر المجهز للربط مع الشبكة العامة يضخ فقط الطاقة الفعالة، أي أن دارات التحكم الخاصة بالإنفرتر تقوم بتوليد موجة جهد متطابقة بالطور مع موجة جهد الشبكة) [15].

بشكل عام، في نظام العداد المقترح لتحديد اتجاه تدفق القدرة سيتم قياس زاوية فرق الصفحة بين إشارة حساس التيار وحساس الجهد:

- إذا كانت إشارة موجة الجهد متطابقة في الطور مع إشارة موجة التيار أو (مزاحة بفرق صفحة لا يزيد عن 90° كون طبيعة الحمل تلعب دوراً في ذلك (الحمل الأومي لا يسبب إزاحة في الطور أما الحمل السعوي والتحريضي يسبب إزاحة في الطور بفرق صفحة لا يتجاوز 90° حسب طبيعة كل حمل)، وهذا يعني أن تدفق القدرة هو باتجاه الحمل [12].

  تعطى قيمة الاستطاعة الفعلية والردية بالعلاقات التالية:

$$P = V.I.\cos(\theta) \quad [Watt] \quad (5)$$

$$Q = V.I.\sin(\theta) \quad [VAR] \quad (6)$$

- إذا كانت إشارة موجة الجهد مزاحة بالطور عن إشارة موجة التيار بفرق صفحة أكبر من 90° فهذا يعني أن تدفق القدرة هو باتجاه الشبكة العامة، في المنظومات الكهروضوئية المجهزة للربط مع الشبكة العامة يكون فرق الصفحة المقاس هو 180° لأنها مجهزة لضخ الطاقة الفعلية فقط للشبكة العامة [15].

  بتعويض قيمة زاوية فرق الصفحة $\theta = 180$ بالعلاقة (5) والعلاقة (6) نحصل على قيمة الاستطاعة الفعلية المقدمة للشبكة، كما هو موضح بالعلاقة التالية:

$$P = -V.I \quad [Watt] \quad (7)$$

$$Q = 0 \quad [VAR] \quad (8)$$

حيث نلاحظ أن قيمة الاستطاعة الفعلية سالبة، وهذا يدل على أن اتجاه تدفق القدرة هو باتجاه الشبكة العامة، والاستطاعة الردية تساوي الصفر لأن المنظومات الكهروضوئية المجهزة للربط مع الشبكة العامة تضخ فقط الاستطاعة الفعلية.

مما سبق نجد عند قياس فرق الصفحة بين إشارة حساس التيار وإشارة حساس الجهد:

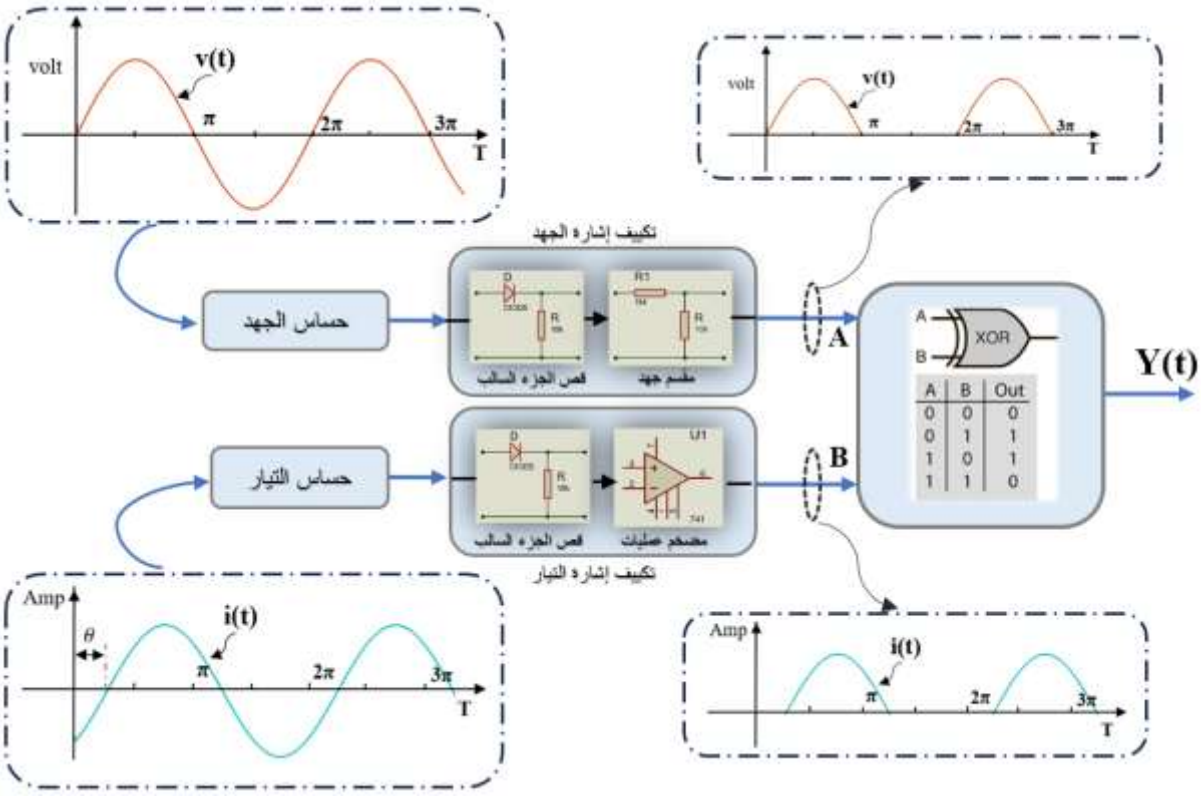
إذا كانت $\theta < 90°$ ← P>0 هذا يعني أن القيمة المسجلة هي الطاقة المستجرة من الشبكة العامة.

إذا كانت$\theta > 90°$ ← P<0 هذا يعني أن القيمة المسجلة هي الطاقة المقدمة للشبكة العامة.

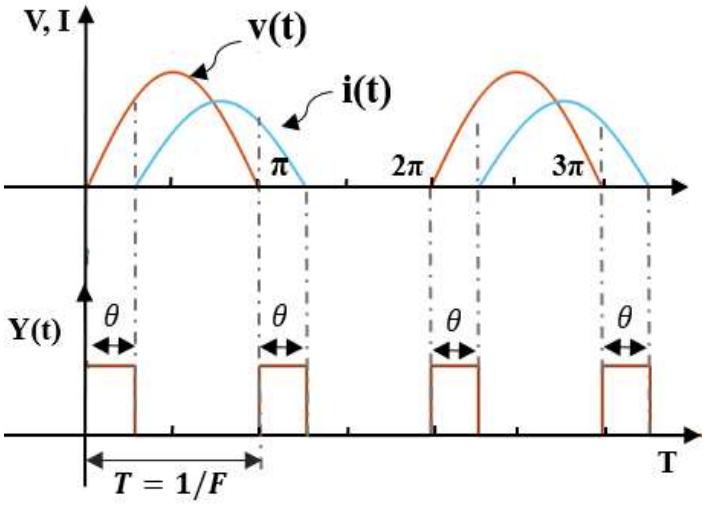
2-1 الخوارزمية المقترحة لقياس زاوية فرق الصفحة بين موجة الجهد وموجة التيار.

إذا كان لدينا إشارتي جهد وتيار مزاحتين عن بعضهما بزاوية θ كما هو موضح بالشكل (7)، يتم التقاط كل من إشارة الجهد والتيار باستخدام الحساسات المناسبة، لتمر من بعدها الإشارات على مرحلة التكييف حيث يتم قص الموجة السالبة من إشارة التيار والجهد (من خلال تمرير الإشارات على ديود حيث يسمح بمرور الموجة الموجبة فقط) ، وتخفيض إشارة الجهد (القسم الموجب لإشارة موجة الجهد بعد القص تكون بجهد يتجاوز 220v باستخدام دارة مقسم جهد يتم تقليص إشارة الجهد لتصبح بقيمة لا تتجاوز 5v تلاءم دخل الدارة المنطقية المستخدم)، وتضخيم إشارة التيار (كون إشارة التيار المقاسة تكون بقيمة صغيرة لا تسطيع الدارات المنطقية التعامل معها فيتم استخدام دارة مضخم عمليات لتضخيم الإشارة بحيث لا تتجاوز الإشارة قيمة 5v لتصبح ضمن المستويات المناسبة للدارات المنطقية المستخدمة).

باستخدام دارة XOR كما هو موضح بالشكل (7)، الإشارة Y(t) الناتجة على خرج دارة XOR موضحة بالشكل (8)، وهي عبارة عن قطار من النبضات المربعة، عرض النبضة يكون مساوي لمقدار الإزاحة الطورية بين موجة الجهد وموجة التيار.



الشكل (7): المخطط العام للطريقة المقترحة في قياس زاوية فرق الصفحة بين إشارة التيار والجهد



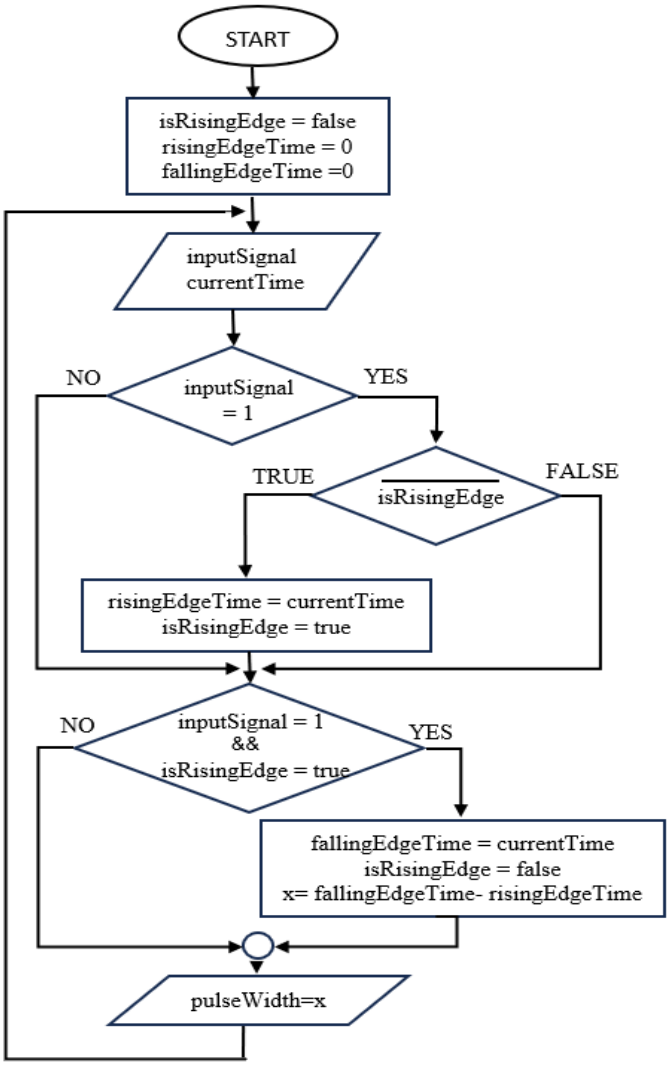
الشكل (8) الإشارة Y(t) الناتجة على خرج دارة XOR

يوضح الشكل (9) الخوارزمية المقترحة لقياس عرض النبضة وبالتالي معرفة زاوية فرق الصفحة بين موجة الجهد وموجة التيار.

في الخوارزمية المقترحة يتم افتراض مجموعة من المتغيرات:

- isRisingEdge يعبر عن حالة النبضة الواردة إذا كانت في مرحلة الحافة الصاعدة.
- risingEdgeTime يعبر عن قيمة الزمن عند ورود الحافة الصاعدة لنبضة الدخل.
- fallingEdgeTime يعبر عن قيمة الزمن عند ورود الجبهة الهابطة لنبضة الدخل.
- inputSignal متغير يمثل قيمية الإشارة الواردة (النبضات المراد قياس عرضها).
- CurrentTime متغير يمثل الوقت مرتبط بمؤقت يبدأ بالعد عند تنفيذ الخوارزمية.

مبدأ عمل الخوارزمية يعتمد في البداية على التحقق من ورود نبضة الدخل، ليتم تخزين قيمة الوقت عند ورد الحافة الصاعدة في المتغير risingEdgeTime، وكذلك أخذ قيمة الوقت عند ورود الجبهة الهابطة وتخزينه في المتغير fallingEdgeTime ثم بعد ذلك يتم طرح قيمة الوقت عند ورد الحافة الصاعدة risingEdgeTime من قيمة الوقت عند ورد الحافة الهابطة fallingEdgeTime للحصول على قيمة زمن يمثل عرض النبضة الواردة pulseWidth.



الشكل (9) الخوارزمية المقترحة لقياس عرض النبضة للإشارة Y(t)

لحساب قيمة الاستطاعة الفعلية والردية يجب أيضاً معرفة القيمة الفعالة لكل من موجة التيار والجهد [12]، القيمة الفعالة لإشارة الجهد المتناوبة تعطى بالعلاقة (5):

$$V_{RMS} = \frac{V_{MAX}}{\sqrt{2}} \qquad (5)$$

حيث أن: V_{RMS} القيمة الفعالة لموجة الجهد، V_{MAX} القيمة العظمى لموجة الجهد.

وبذات الطريقة فإن القيمة الفعالة لإشارة التيار المتناوبة، تعطى بالعلاقة (6):

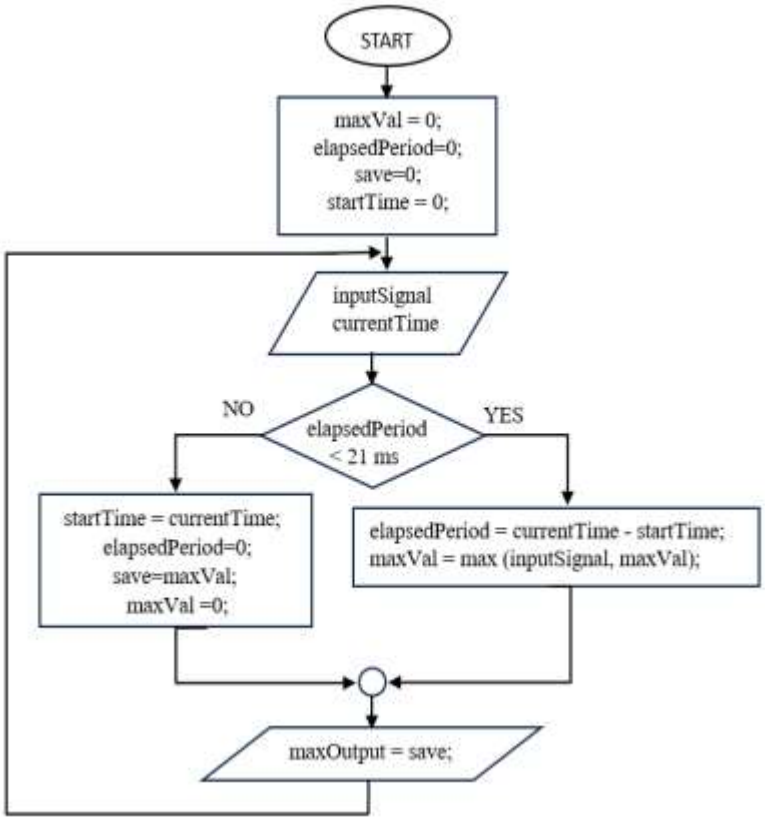
$$I_{RMS} = \frac{I_{MAX}}{\sqrt{2}} \qquad (6)$$

حيث أن: I_{RMS} القيمة الفعالة لموجة التيار، I_{MAX} القيمة العظمى لموجة التيار.

لإيجاد القيمة العظمى للإشارة المتناوبة (إشارة جهد أو إشارة تيار) تم اقترح الخوارزمية الموضحة بالشكل (10).

في الخوارزمية المقترحة يتم افتراض مجموعة من المتغيرات:

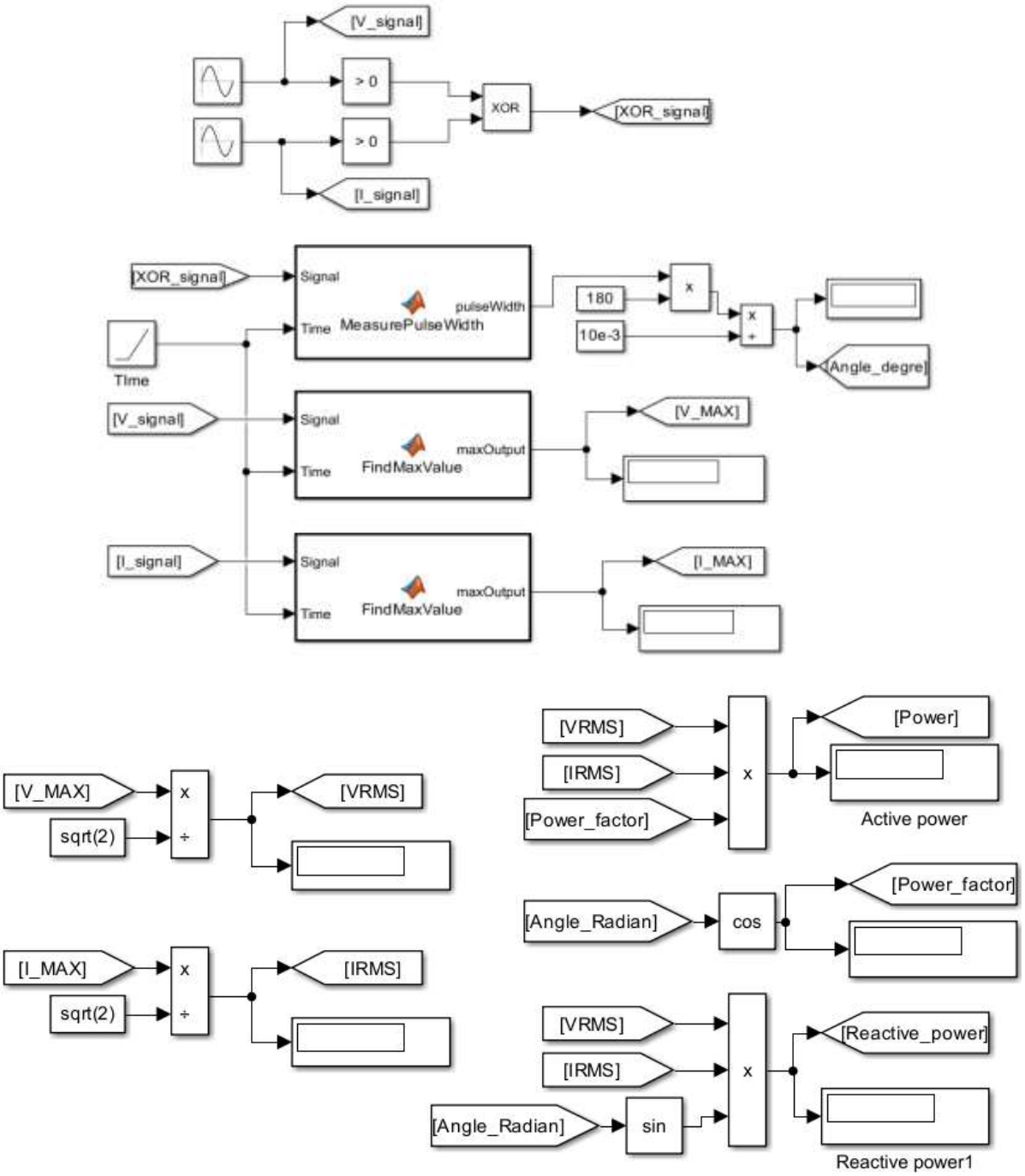
- maxVal متغير يتم قيه تخزين القيمة العظمى للإشارة الواردة خلال فترة زمنية قدرها 21 ms (يعود السبب في ذلك كون موجة الجهد والتيار هي بتردد 50 Hz أي أن دور موجة الجهد والتيار هو 20 ms وعليه تم اختيار فترة زمنية أكبر من 20ms (في حالتنا تم اختيار 21 ms) لضمان ورد كامل الموجة وبالتالي يمكن تحديد أعظم قيمة واردة تمثل (القيمة العظمى للموجة المتناوبة الواردة وهي قيمة يتم تحديثها كل 21ms) .
- elapsedPeriod متغير يتم فيه تخزين قيمة الزمن المنقضي، يستخدم لمراقبة انقضاء الفترة الزمنية المحددة لورد موجة كاملة (21ms).
- Save متغير مساعد يستخدم في حفظ القيمة العظمى.
- startTime متغير يستخدم في تخزين زمن البدء المستخدم لحساب الفترة المنقضية elapsedPeriod.
- CurrentTime متغير يمثل الوقت مرتبط بمؤقت يبدأ بالعد عند تنفيذ الخوارزمية.



الشكل (10) الخوارزمية المقترحة لإيجاد القيمة العظمى لإشارة التيار والجهد

٢- نموذج نظام العداد المقترح باستخدام برنامج MATLAB/Simulink

يوضح الشكل (11) نموذج MATLAB/Simulink لنظام العداد المقترح، حيث يتم في النموذج قياس فرق الصفحة بين إشارتي الجهد والتيار، باستخدام مبادئ الدارات المنطقية (دارة XOR)، الإشارة الناتجة (XOR-signal) يتم تطبيقها على دخل صندوق Matlab Function تم فيه تنفيذ الخوارزمية المقترحة لقياس عرض النبضة، إشارة الخرج هي قيمة عرض النبضة، ومن خلالها يمكن معرفة زاوية فرق الصفحة بالدرجة ومن ثم تحويلها إلى راديان، كما هو موضح بالنموذج.



الشكل (11) نموذج MATLAB/Simulink لنظام العداد المقترح

يتم قياس القيمة العظمى لموجة الجهد باستخدام صندوق Matlab Function تم فيه تنفيذ الخوارزمية المقترحة لقياس القيمة العظمى للإشارة المتناوبة، وبالتالي فإن إشارة الخرج هي القيمة العظمى لموجة الجهد (V_max)، وبذات الطريقة يتم حساب القيمة العظمى لموجة التيار (I_max)، وبالتالي أصبح من الممكن حساب القيمة الفعالة لموجة الجهد والتيار، كما هو موضح بالنموذج.

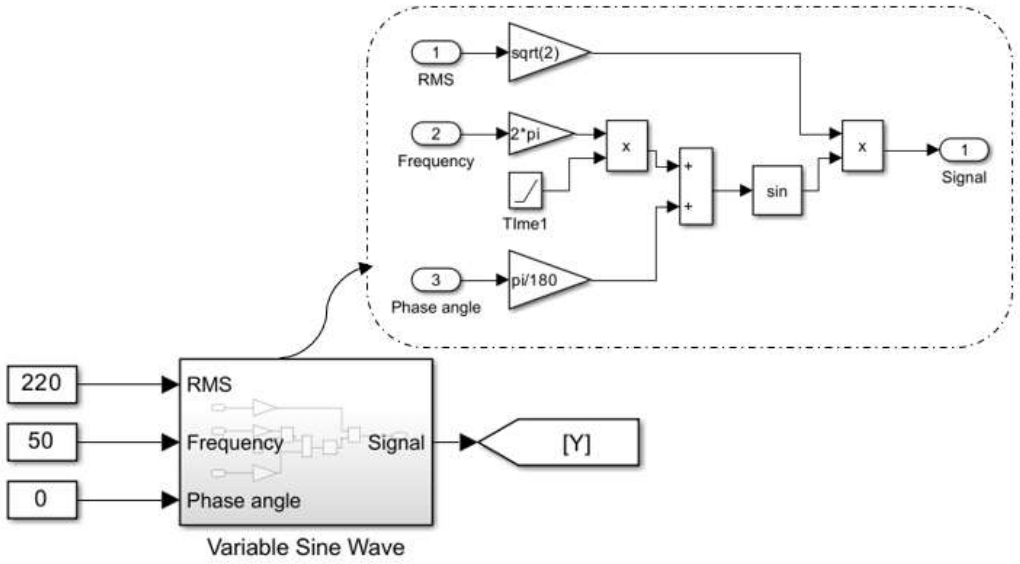
وبالتالي أصبح من الممكن حساب قيمة الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية ومعامل الاستطاعة كما هو موضح بالنموذج المنفذ في الشكل (11).

اختبار النموذج المصمم ومقارنة النتائج

لاختبار أداء نظام العداد المقترح في ظروف تحاكي تغير قيم الجهد والتيار مع تغيير قيمة الإزاحة الطورية بين إشارتي الجهد والتيار تم تنفيذ نموذج مولد إشارة جيبية يمكن من خلاله التحكم بالقيمة الفعالة للإشارة والتردد وزاوية الإزاحة الطورية، كما هو موضح بالشكل (12)، وذلك بتطبيق المعادلة الرياضية التالية (7):

$$Y(t) = Y_{MAX} \cdot \sin(2\pi f t + \theta) \qquad (7)$$

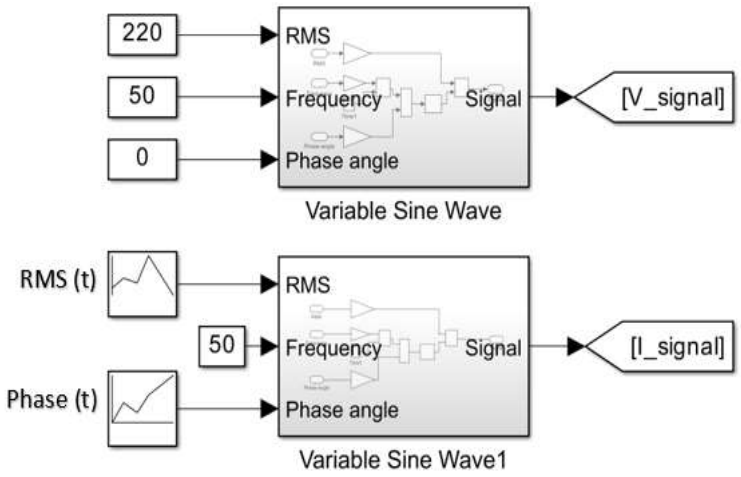
Y(t): الإشارة الجيبية المراد توليدها، Y_{MAX}: القيمة العظمى للإشارة، f: تردد الإشارة، θ: زاوية الإزاحة.



الشكل (12) نموذج مولد إشارة جيبية متحكم به

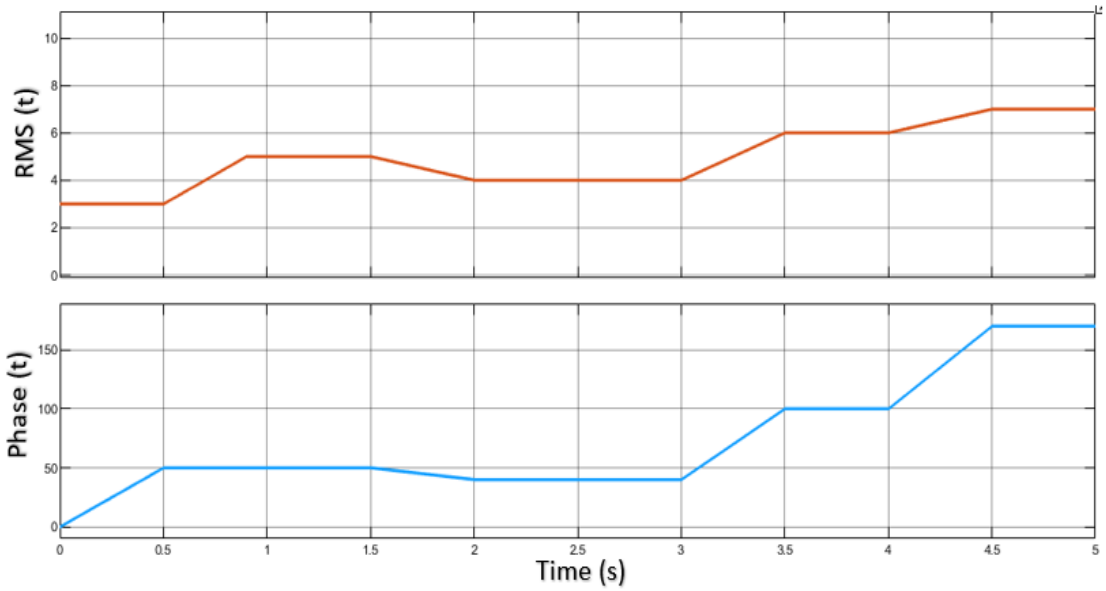
لاختبار نموذج العداد المقترح تم استخدام مولدي إشارة متناوبين، كما هو موضح بالشكل (13)، أحدهما لإشارة التيار والآخر لإشارة الجهد، تم افتراض أن تردد كل من إشارتي الجهد والتيار 50 هرتز، القيمة الفعالة لإشارة الجهد ثابتة 220 فولط وكذلك الزاوية الطورية لإشارة الجهد ثابتة 0° (لأنها تبدأ من الصفر).

بينما إشارة التيار تكون بقيمة فعالة متغيرة RMS (t) وكذلك الزاوية الطورية متغيرة Phase (t) (التغيرات الحاصلة تكون بقيم مفترضة لمراقبة أداء نظام العداد المقترح) كذلك التغيير الحاصل في الزاوية الطورية لموجة التيار (يحاكي أثر أحمال مختلفة أومية أو سعوية أو تحريضية وما يترتب عليه من زوايا فرق صفحة مختلفة)



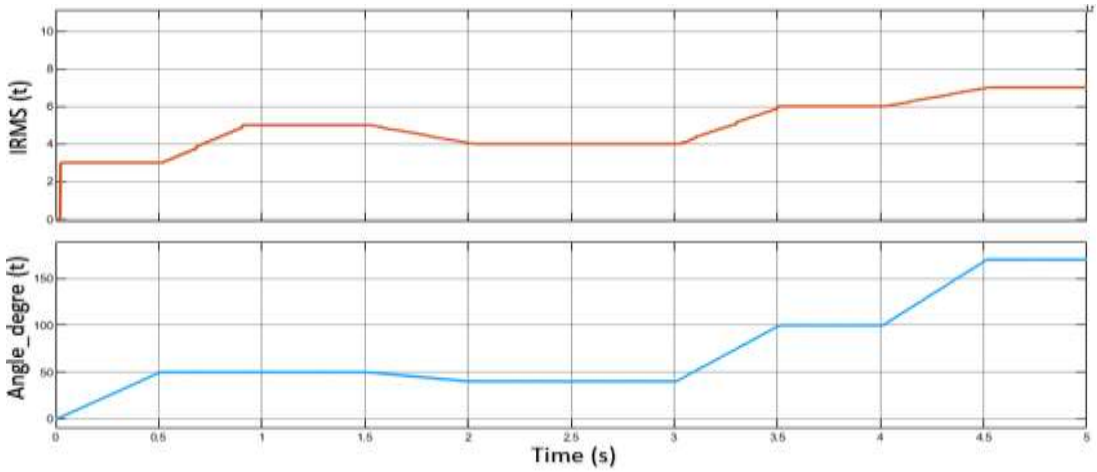
الشكل (13) مولدا إشارة متناوبان متحكم بهما لإشارة الجهد والتيار

يوضح الشكل (14) كلاً من إشارة القيمة الفعالة المتغيرة RMS (t) وإشارة زاوية الطور المتغيرة Phase (t)، للحصول على موجة تيار متغيرة القيمة والطور.



الشكل (14) إشارة القيمة الفعالة المتغيرة RMS (t) وإشارة زاوية الطور المتغيرة Phase (t)

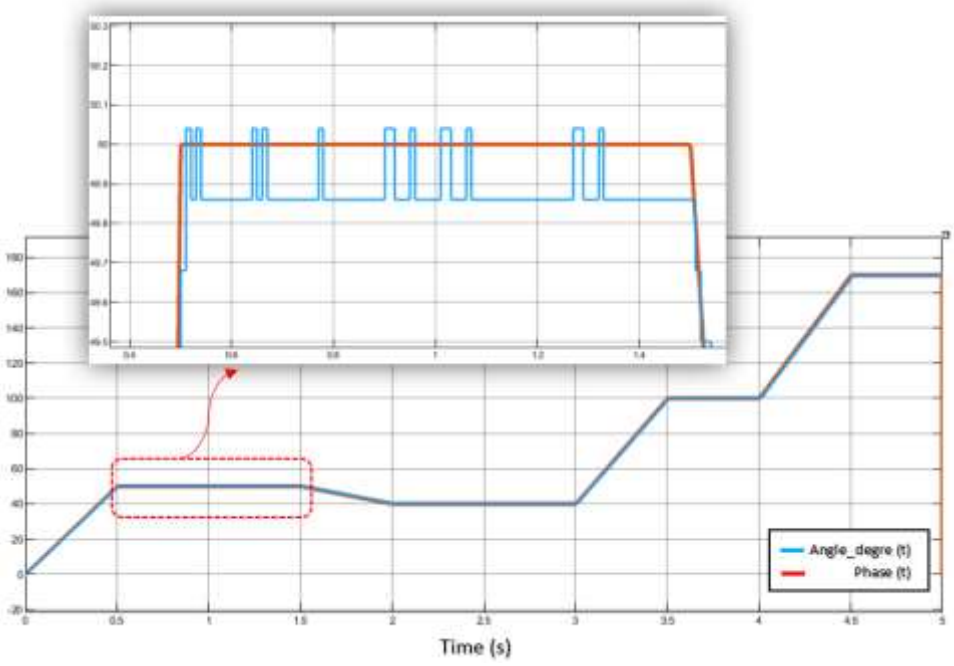
يوضح الشكل (15) الإشارات المقاسة من قبل نموذج العداد المقترح، إشارة الإزاحة الطورية بين موجة الجهد والتيار Angle_degre وإشارة القيمة الفعالة لموجة التيار IRMS.



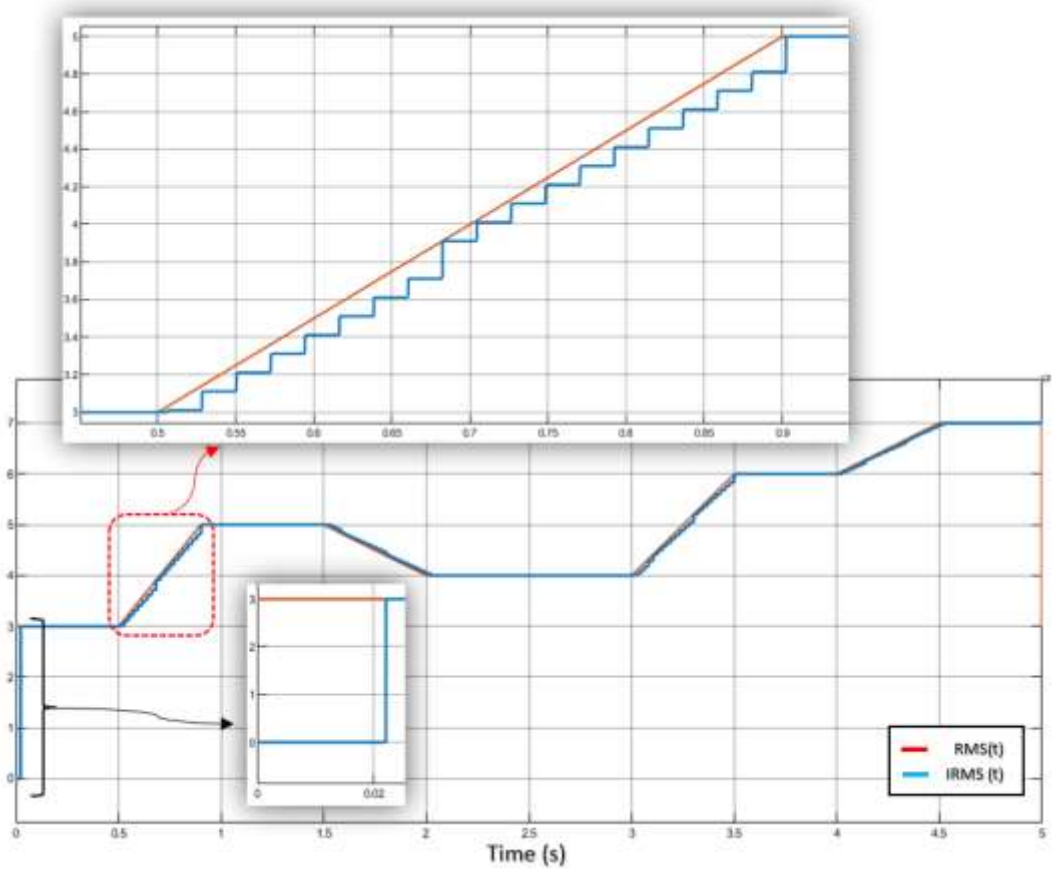
الشكل (15) إشارة القيمة الفعالة المتغيرة RMS (t) وإشارة زاوية الطور المتغيرة Phase (t)

بمقارنة إشارة الإزاحة الطورية المقاسة بين موجة الجهد والتيار Angle_degre (t)، مع إشارة التغير الطوري لموجة التيار المولد Phase (t)، كما هو الموضح بالشكل (16) حيث نلاحظ التطابق في إشارة الانزياح الطوري Angle_degre (t) مع إشارة التغير الطوري Phase (t) بخطأ قياس لا يتجاوز 0.3°. يعود سبب التطابق لكون الزاوية الطورية لموجة الجهد هي الصفر، وبالتالي فإن زاوية فرق الطور بين إشارة الجهد والتيار ستكون مساوية للزاوية الطورية لموجة التيار.

بمقارنة إشارة القيمة الفعالة للتيار IRMS(t) المقاسة من قبل العداد مع إشارة القيمة الفعالة RMS(t) المولدة من قبل مولد إشارة التيار كما هو موضح بالشكل (17)، نجد أن نظام العداد المقترح يحدّث قراءته للقيمة الفعالة لموجة التيار كل 21ms، أي يتأخر باستجابته للتغيرات الحاصلة لموجة التيار بمقدار 21ms، يعود السبب في ذلك لخوارزمية القياس المتبعة كونها تأخذ القيمة العظمى لموجة التيار كل 21ms وهي قيمة أكبر من قيمة دور موجة التيار البالغ 20ms.

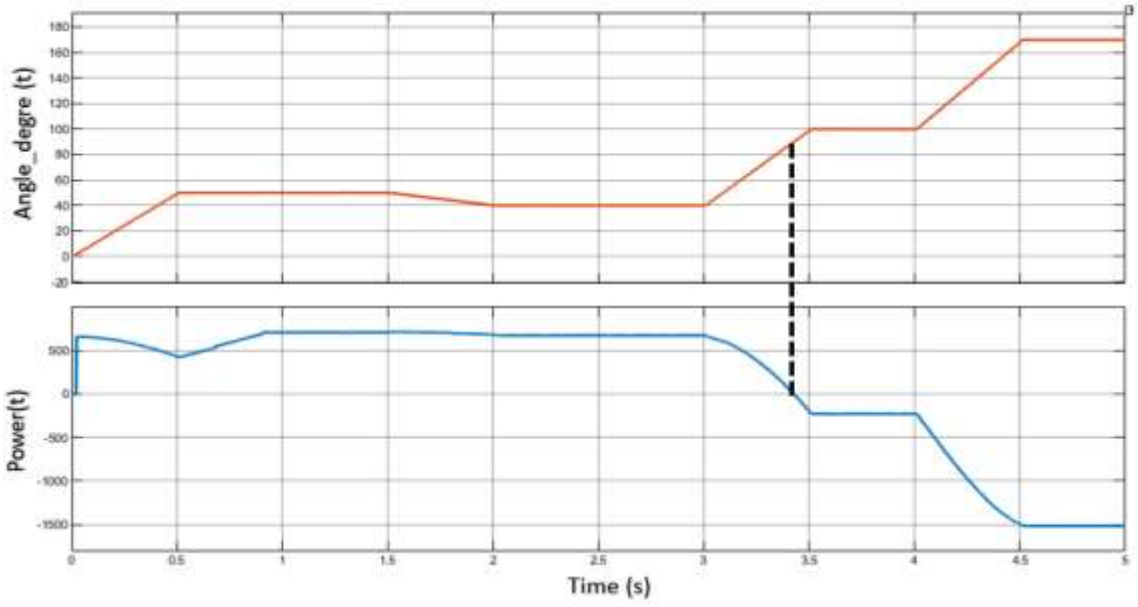


الشكل (16) إشارة الإزاحة الطورية Angle_degre (t) بالمقارنة مع التغير الطوري لموجة التيار Phase(t)



الشكل (17) إشارة القيمة الفعالة المقاسة IRMS(t) بالمقارنة مع الإشارة RMS(t)

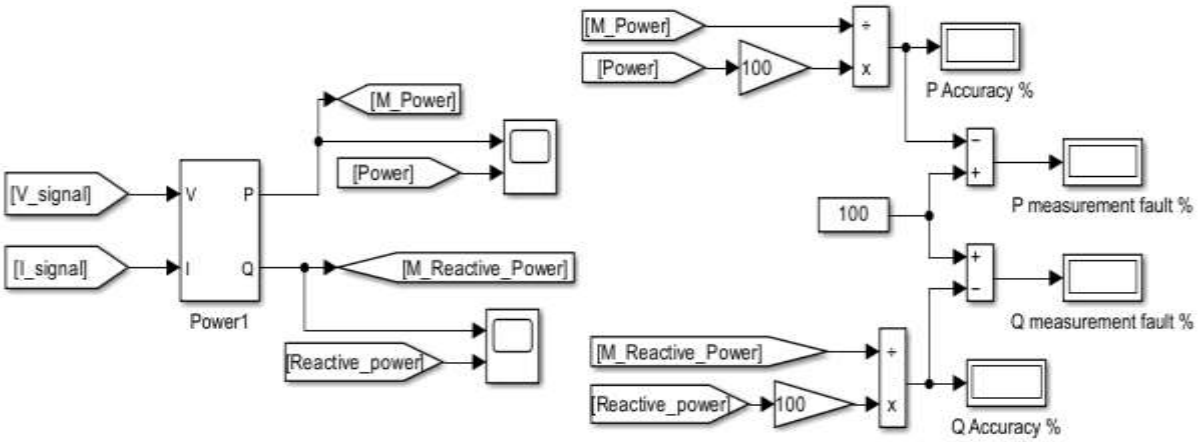
إشارة الاستطاعة الفعلية المقاسة من قبل العداد Power (t) مقارنة مع التغير في زاوية فرق الصفحة موضحة بالشكل (18)، حيث نلاحظ أن اتجاه تدفق الطاقة انعكس وأصبح سالباً عندما يزداد فرق الصفحة بين موجة الجهد والتيار عن 90˚.



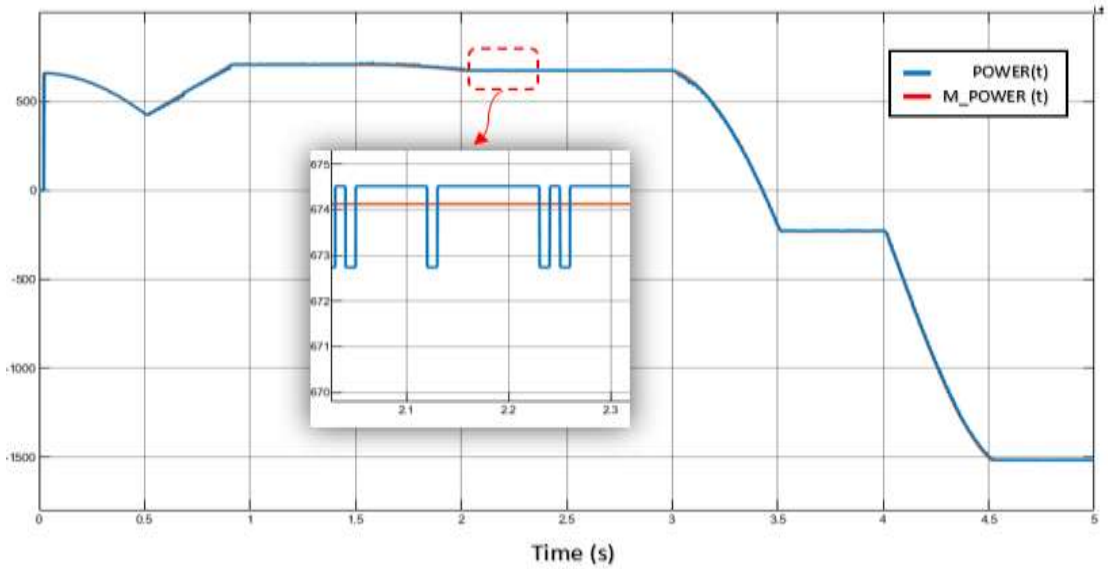
الشكل (18) إشارة الاستطاعة المقاسة Power (t) بالمقارنة مع تغير زاوية فرق الصفحة Angle_degre (t)

الخوارزميات المصممة لنظام العداد المقترح لا تعتمد بشكل عام على المعادلات الرياضة التي يوفرها برنامج الماتلاب بسهولة، إنما تم تصميم هذه الخوارزميات ليصبح من السهل تنفيذها بشكل عملي باستخدام معالجات مثل (AVR-PIC-ARM)، دون الحاجة لمعالجات إشارة متقدمة باهظة الثمن لتنفيذ العمليات الرياضية المطلوبة في حساب الاستطاعة.

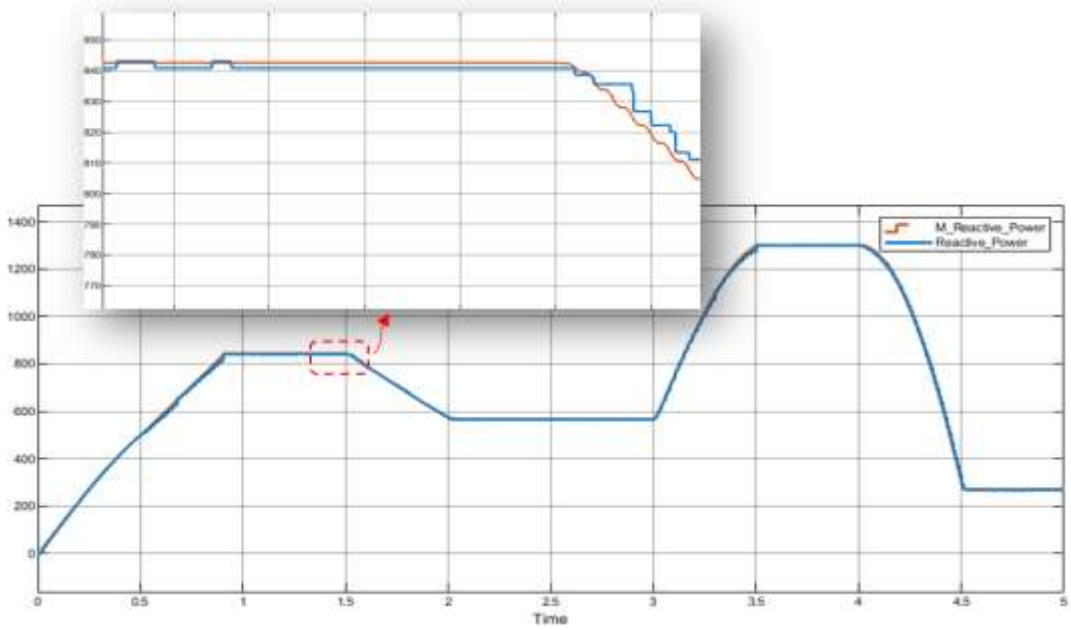
لاختبار خوارزميات العداد المقترح في قراءة الاستطاعة بشكل دقيق، تم إجراء مقارنة مع بلوك جاهز من ضمن مكتبة MATLAB 2023a/Simulink (simscape / electrical) لقياس الاستطاعة الفعلية لإشارة التيار والجهد الواردة كما هو موضح بالشكل (19). وتمت مقارنة النتائج مع نظام العداد المقترح ذاته وكانت نتائج مقارنة قياسات الاستطاعة الفعلية موضحة بالشكل (20)، ونتائج مقارنة قياسات الاستطاعة الردية موضحة بالشكل (21) بخطأ قياس لا يتجاوز 0.5% لكلا الاستطاعتين الفعلية والردية بالاعتماد على نموذج قياس الخطأ الموضح بالشكل (19).



الشكل (19) بلوك Power لقياس الطاقة الفعالة والردية

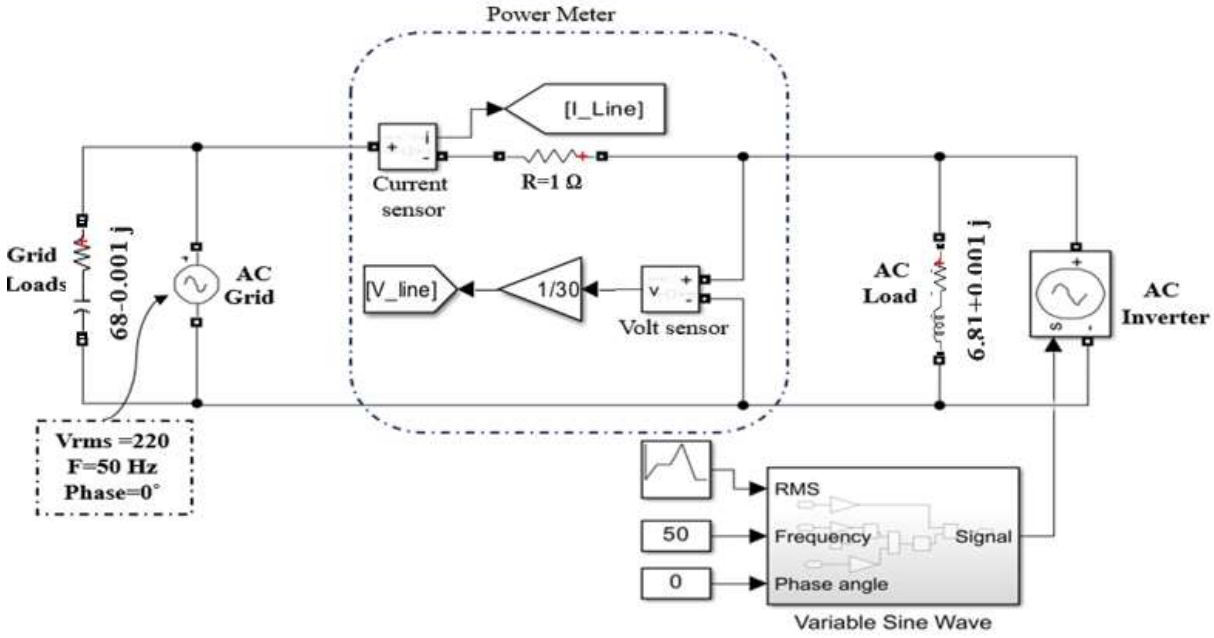


الشكل (20) إشارة الاستطاعة الفعلية المقاسة من قبل العداد POWER(t) بالمقارنة مع إشارة M-POWER(t)



الشكل (21) إشارة الاستطاعة الردية المقاسة من قبل العداد Reactive_Power(t) بالمقارنة مع إشارة M- Reactive-Power(t)

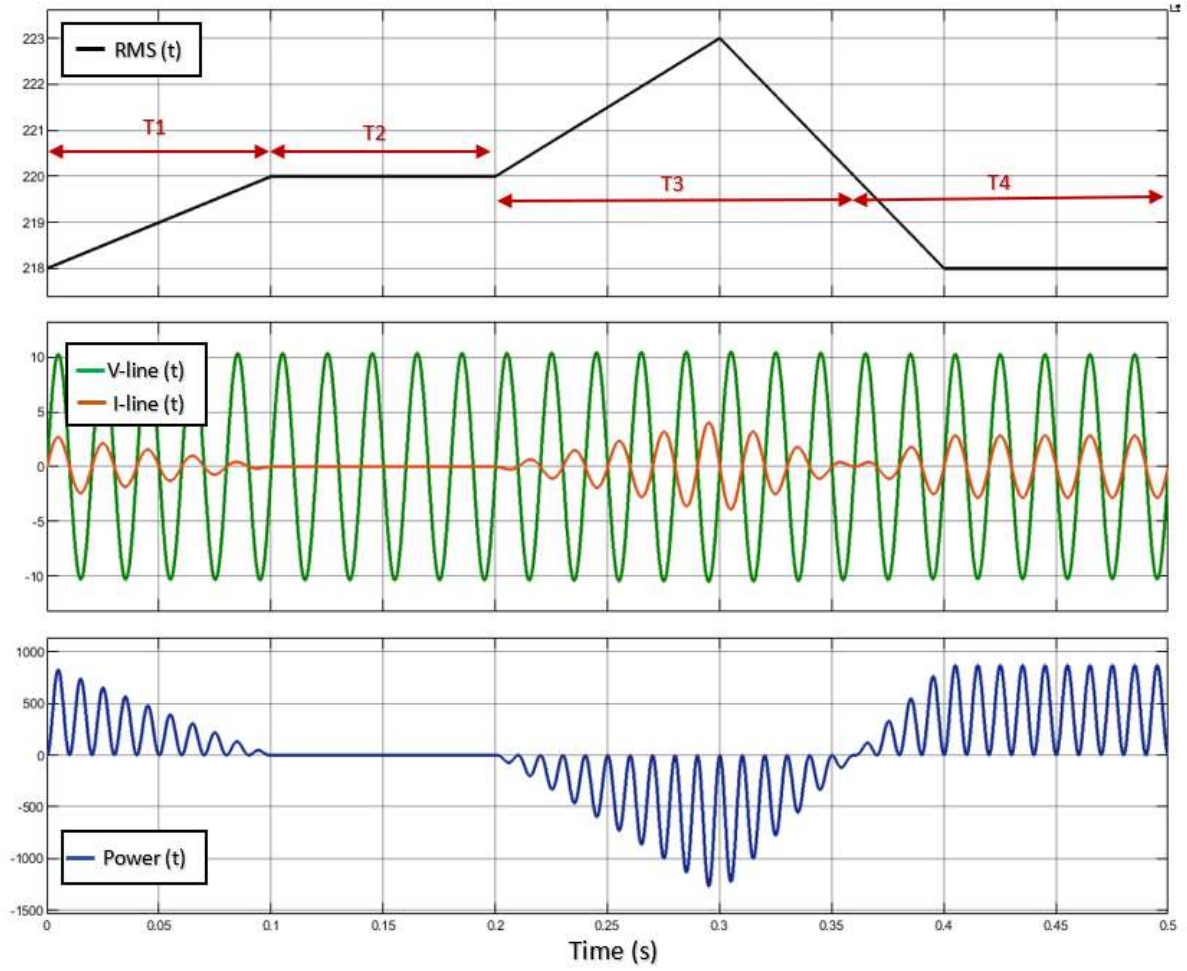
لاختبار أداء العداد المقترح في بيئة تحاكي تدفق القدرة بالاتجاهين، تم باستخدام برنامج الماتلاب بناء نموذج لشبكة كهربائية تتدفق بها القدرة بالاتجاهين، كما هو موضح بالشكل (22).



الشكل (22) نموذج MATLAB\Simulink لشبكة كهربائية تتدفق بها القدرة بالاتجاهين

يحتوي النموذج المصمم على منبعي جهد، المنبع الأول AC Grid يمثل الشبكة العامة، تم افتراض هذا المنبع بقيم ثابتة (Vrms=220, F=50hz, Phase=0°)، في حين أن المنبع الثاني AC Inverter يحاكي مبدأ عمل انفرتر المنظومة الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة، وهو منبع جهد بتردد وزاوية طور ثابتين (F=50hz, Phase=0°) مطابقين للمنبع الأول

الممثل للشبكة العامة (ليحقق شروط الربط مع الشبكة المتمثل بالتطابق الطوري) ، في حين أن القيمة الفعالة RMS(t)لجهد المنبع الثاني تكون متغيرة (بشكل يحاكي عمل الإنفرتر الذي يغير قيمة جهده بما يتناسب مع التوليد الكهروضوئي وكمية التيار المسموح استجرارها، تم افتراض التغير الحاصل في القيمة الفعالة RMS(t) كما هو موضح بالشكل(23).



الشكل (23) إشارات التيار والجهد والاستطاعة المقاسة لنموذج الشبكة الكهربائية التي يتدفق بها القدرة بالاتجاهين

يوضح الشكل (23) التغيرات الحاصلة في إشارة الجهد والتيار المقاسين من قبل العداد تبعاً للتغير الحاصل في القيمة الفعالة لمنبع الجهد AC Inverter وتأثيرها على اتجاه تدفق الاستطاعة، تم تقسيم التغيرات بناء على فترات زمنية موضحة بالشكل (23).

- في الفترة الزمنية الأولى T1: تتزايد القيمة الفعالة لمنبع الجهد AC Inverter من القيمة 218 v إلى القيمة 220 v، في هذه الفترة جهد الشبكة العامة يكون بقيمة فعالة أكبر (قيمة المنبع AC Grid ثابتة وتساوي 220v)، وبالتالي فإن اتجاه تدفق القدرة يكون من الشبكة إلى الحمل Ac load وتتناقص قيمة هذه القدرة مع ازدياد القيمة الفعالة RMS(t). إشارة الجهد والتيار المقاسين متطابقين بالطور، إشارة الاستطاعة تكون موجبة.

-في الفترة الزمنية الثانية T2: تكون القيمة الفعالة لمنبع الجهد AC Inverter ثابتة مساوية 220 v وهي مساوية لجهد الشبكة AC Grid، في هذه الحالة لا يتدفق أي قدرة عبر العداد بسبب تساوي القيمة الفعالة على طرفي العداد، إشارة التيار تكون مساوية للصفر، وبالتالي فإن إشارة الاستطاعة تكون مساوية للصفر.

-في الفترة الزمنية الثالثة T3: تتزايد القيمة الفعالة لمنبع الجهد AC Inverter من القيمة 220 v إلى القيمة 223 v ثم تعود وتتناقص إلى القيمة 220 v. في هذه الحالة القيمة الفعالة لمنبع الجهد AC Inverter أكبر من جهد الشبكة وبالتالي فإن القدرة تتدفق باتجاه أحمال الشبكة Grid Loads تزداد هذه القدرة مع زيادة القيمة الفعالة لجهد المنبع AC Inverter وتتناقص معه، إشارة الجهد والتيار المقاسين متعاكسين بالطور، إشارة الاستطاعة تكون سالبة.

-في الفترة الزمنية الرابعة T4: يستمر تناقص القيمة لفعالة لجهد المنبع AC Inverter من القيمة 220 v ليستقر عند القيمة 218 v، في هذه الفترة ينعكس اتجاه تدفق القدرة ليعود إلى وضع التدفق من الشبكة إلى الحمل AC Load، إشارة الجهد والتيار المقاسين يعودان ليصبحا متطابقين في الطور، وإشارة الاستطاعة المقاسة تعود موجبة.

وعليه نجد أنه عندما تكون إشارة الاستطاعة المقاسة موجبة فهذا يعين أن القيمة المقاسة هي القيمة المستجرة من الشبكة العامة وبالتالي يتم تسجيل قيمة الاستطاعة في خانة الاستطاعة المستهلكة من قبل المستخدم، عندما تكون إشارة الاستطاعة المقاسة سالبة فهذا يعني أن القيمة المقاسة هي القيمة المقدمة للشبكة العامة وبالتالي يتم تسجيل قيمة الاستطاعة في خانة الاستطاعة المقدمة من قبل المستخدم.

الخاتمة

عند دراسة أداء النظام المقترح لقياس تدفق القدرة بالاتجاهين، وبناءً على نتائج الاختبارات نستنتج أن نظام العداد المقترح قادر على:

- قياس زاوية فرق الصفحة بين إشارة الجهد والتيار بخطأ قياس لا يتجاوز 0.3° درجة.
- قياس القيمة الفعالة لكل من إشارة الجهد والتيار، بدقة تامة ولكن مع تأخير زمني بمقدار 21ms كون النظام يستغرق هذه المدة لإيجاد القيمة العظمى للإشارة المتناوبة التي هي بدور 20ms.
- تحديد اتجاه تدفق القدرة الكهربائية، حيث أن التدفق يكون باتجاه الحمل إذا كان فرق الصفحة بين إشارة الجهد والتيار أقل من 90°، ويكون التدفق باتجاه الشبكة الكهربائية إذا كان فرق الصفحة أكبر من 90°.
- تسجيل قيمة الاستطاعة المستجرة أو المقدمة للشبكة العامة بناءً على الخوارزميات المصممة بخطأ قياس لا يتجاوز 0.5% من قيمة الاستطاعة المقاسة بواسطة بلوك جاهز لقياس الاستطاعة ضمن برنامج MATLAB/Simulink.

العمل المستقبلي

تنفيذ الدارة الإلكترونية للعداد المقترح وفق خوارزميات القياس المقترحة، وإجراء الاختبارات اللازمة ومقارنتها بنتائج المحاكاة.

المراجع

[1] Vitiello, Silvia, et al. "*Smart metering roll-out in europe: Where do we stand? cost benefit analyses in the clean energy package and research trends in the green deal*." Energies 15.7 (2022): 2340.

[2] Herrero, Sergio Tirado, Larissa Nicholls, and Yolande Strengers. "*Smart home technologies in everyday life: do they address key energy challenges in households?*." Current Opinion in Environmental Sustainability 31 (2018): 65-70.

[3] Tang, Zhongting, Yongheng Yang, and Frede Blaabjerg. "*Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration.*" CSEE Journal of Power and Energy Systems 8.1 (2021): 39-52.

[4] Chitra, A., V. Indragandhi, and W. Razia Sultana, eds. *Smart Grids and Green Energy Systems*. John Wiley & Sons, 2022.

[5] Zhong, Qing-Chang, and Tomas Hornik. *Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration*. John Wiley & Sons, 2012.

[6] Mohamed Hariri, Muhammad Hafeez, et al. "*grid-connected PV generation system—Components and challenges: A review.*" Energies 13.17 (2020): 4279.

[7] Balwani, Mayurkumar Rajkumar, et al. "*Development of a smart meter for power quality-based tariff implementation in a smart grid*." Energies 14.19 (2021).

[8] Orlando, Matteo, et al. "*A smart meter infrastructure for smart grid IoT applications.*" IEEE Internet of Things Journal 9.14 (2021).

[9] Saavedra, Edgar, Guillermo Del Campo, and Asuncion Santamaria. "*Smart metering for challenging scenarios: A low-cost, self-powered and non-intrusive IoT device*." Sensors 20.24 (2020).

[10] Diahovchenko, Illia, et al. "*Progress and challenges in smart grids: Distributed generation, smart metering, energy storage and smart loads*." Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering 44 (2020): 1319-1333

[11] Morello, Rosario, et al. "*A smart power meter to monitor energy flow in smart grids: The role of advanced sensing and IoT in the electric grid of the future*." IEEE Sensors Journal 17.23 (2017): 7828-7837.

[12] Bakshi, Uday A. Basic electrical engineering. Technical Publications, 2020.

[13] Rahmani-Andebili, Mehdi. *Advanced Electrical Circuit Analysis*. Springer International Publishing, 2022.

[14] Sultani, Jasim Farhood. "*Modelling, Design and Implementation of DQ Control in Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Systems used in Domestic Dwellings*." (2013).

[15] Tina, Giuseppe Marco, and Giovanni Celsa. "*A Matlab/Simulink model of a grid connected single-phase inverter*." 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2015.