

تحسين أداء التحكم المنحدر في شبكات Microgrids باستخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي الكسري FOPID

أ.د. علي أحمد محمود*

د. سحر عبدالكريم العلي**

م. رامي علي خضّور***

(تاريخ الإيداع 2022/ 4/20 . قُبِلَ للنشر في 2022/6/22)

□ ملخص □

تم في هذا البحث، تصميم نظام تحكم بشبكة كهربائية ميكروية Microgrid، معزولة عن الشبكة العامة، ومؤلفة من عاكسين Inverters، موصولين تفرعياً. تم استخدام طريقة التحكم المنحدر Droop control، للتحكم بالشبكة الميكروية، واستخدام كلا مستويي التحكم الأولي والثانوي.

قمنا باستخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي الكسري FOPID في تصميم طريقة التحكم المنحدر. تمت محاكاة النظام المدروس للشبكة الميكروية والنظام المقترح للتحكم بالجهد والتردد في بيئة Matlab. أظهرت نتائج المحاكاة، إمكانية تقاسم الحمل، وتحقيق مشاركة دقيقة للاستطاعة الفعلية بنسبة خطأ صفرية، كما أكدت النتائج، أن إضافة مرحلة التحكم الثانوي، أدت إلى تصحيح انحرافات الجهد والتردد التي تظهر بنهاية مرحلة التحكم الأولي، إذ حققت قيمة جهد خرج العاكس الأول والقيمة المرجعية له، ملاحقةً جيدة بانحراف قليل لم يتجاوز 1.5 Volt، في حين بلغ انحراف جهد خرج العاكس الثاني عن قيمته المرجعية بمقدار لم تتجاوز 1.7 Volt. تبين من نتائج المحاكاة أن استخدام المتحكم FOPID، وحلقة الإقفال الطورية، أدى إلى التخفيف من التشويش وتحقيق بداية ناعمة للتردد.

الكلمات المفتاحية: الشبكة الميكروية، التحكم الأولي، التحكم الثانوي، الممانعة الافتراضية، التوليد الموزع، ماتلاب.

* أستاذ - قسم هندسة الأتمتة الصناعية- كلية الهندسة التقنية- جامعة طرطوس- طرطوس- سورية.

** مدرس- قسم هندسة الأتمتة الصناعية- كلية الهندسة التقنية- جامعة طرطوس- طرطوس- سورية.

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم هندسة الأتمتة الصناعية- كلية الهندسة التقنية- جامعة طرطوس- طرطوس- سورية.

Improving Droop Control Performance in Microgrids Using FOPID.

Prof. Ali Ahmad Mahmoud*
Dr. Sahar Abd-alkareem Alali**
Eng. Rami Ali Khaddour***

(Received 20/4/ 2022 . Accepted 22/6/ 2022)

□ ABSTRACT □

In this paper, a microgrid control system was designed, it's isolated from the grid, and consisting of two inverters, connected in parallel.

The Droop control method was used to control the microgrid, both primary and secondary levels of control were used.

FOPID was used in to design of the droop control method.

The microgrid and the proposed system for voltage and frequency control were simulated in a Matlab environment.

The simulation results showed the possibility of load sharing and achieving accurate sharing of the actual power with a zero error rate. The results also confirmed that the addition of the secondary control level led to the correction of voltage and frequency deviations that appear at the end of the primary control level, The value of the output voltage of the first inverter and its reference value achieved good tracking with a small deviation that did not exceed 1.5 Volt, and the deviation of the output voltage of the second inverter from its reference value reached a value that did not exceed 1.7 Volt.

The simulation results showed that the use of the FOPID controller and the phase-locking loop led to reduce noise and a smooth start of the frequency.

Key words: Microgrid, primary control, secondary control, virtual impedance, distributed generation, MATLAB.

* **Professor-** Department of industrial automation engineering-Technical engineering faculty-Tartous university-Tartous-Syria.

** **Assistant Professor-**Department of industrial automation engineering-Technical engineering faculty-Tartous university-Tartous-Syria.

*** **PHD Student-**Department of industrial automation engineering-Technical engineering faculty-Tartous university-Tartous-Syria.

مقدمة – Introduction:

أدت الاعتبارات البيئية والاقتصادية المتمثلة بالاهتمام المتزايد بتأمين موارد الطاقة (القدرة) التقليدية إلى زيادة التركيز على مفهوم جديد، ظهر في السنوات الأخيرة، أنصف بتوصيل وحدات التوليد صغيرة الاستطاعة مباشرةً بشبكات التوزيع، وأطلق عليه اسم التوليد الموزع (Distributed Generated (DG) الذي يعتمد بأغلبه على الطاقات المتجددة ومصادرها، وإن دمج وحدات التوليد الموزع على التوازي مع مجموعة أحمال في نظام القدرة أدى إلى ظهور مفهوم آخر جديد، هو الشبكة الميكروية (Microgrid (MG) [1]، يُعد هذا المفهوم حديث نسبياً، أُدخل على نظام القدرة الكهربائية، وهو مفهوم لتكامل التوليد الموزع مع الأحمال في نظام التوزيع. بالمقارنة مع نظام القدرة التقليدي يمكن اعتبار الشبكة الميكروية ضعيفة نسبياً، وذلك بسبب حساسيتها العالية لحالات الطوارئ وتعرضها المستمر لانحرافات الجهد والتردد [2]، لذلك وللحصول على تشغيل آمن ومرن ومحمي للشبكات الميكروية بوضعي تشغيلها (المتصل والمنفصل عن الشبكة) كان لا بدّ من وجود نظام تحكم مناسب يضمن التنظيم الدقيق للجهد والتردد، والتقاسم المناسب للحمل [6]–[3]، وللتعامل مع تلك التحديات اقترح الباحثون طريقة تحكم هرمية، مؤلفة من ثلاث مستويات: التحكم الأولي Primary Control، التحكم الثانوي Secondary Control، التحكم الثالثي Tertiary Control [5]–[3]، يمكن تصنيف هذه المستويات إلى تصنيفين عامين: أولهما الطرق المعتمدة على الاتصال الفيزيائي، وتشمل التحكم المركزي [7]، التحكم الموزع [8]، تحكم Master-Slave [9]، تتمثل العيوب الرئيسية لأنظمة التحكم هذه في اعتمادها على الاتصال الفيزيائي (الكابلات عالية السرعة) بين العواكس Inverters، وهي ذات تكلفة عالية، وموثوقية منخفضة علاوةً على أنها تحد من قابلية النظام الكهربائي للتوسع [10]، لذلك كان لا بد من الانتقال إلى التصنيف الثاني وهو الطرق غير المعتمدة على الاتصال الفيزيائي والتي يُطلق عليها الطرق اللاسلكية، والتي تتضمن طريقة التحكم المنحدر Droop Control وقد نشأت فكرة استخدامه في العواكس من التحكم بالمولدات التزامنية في نظام القدرة التقليدي [11].

يعتمد التحكم المنحدر بالعواكس المستقلة عن بعضها، على ملاحقة كل من الجهد والتردد المرجعيان، بحيث يتم الحصول على قيم ثابتة للجهد والتردد مع مشاركة مناسبة لتيار الحمل [12]. من سلبيات هذا النوع من التحكم -في حالة الأحمال اللاخطية- ظهور استجابة عابرة غير مرغوب بها، إضافةً إلى التنظيم غير الدقيق لكلا الاستطاعتين الفعلية والردية [14], [13]، الأمر الذي استدعى من الباحثين النظر في الحلول اللازمة للتغلب على تلك المشاكل، إذ تمّ في إحدى الدراسات إضافة فلاتر لتقليل التموج في استطاعتي الخرج الفعلية والردية، أدى ذلك إلى تقليل التموجات غير المرغوبة وتمّ تحسين الاستجابة العابرة [15]، وفي دراسة أخرى أضاف الباحثون عنصر تفاضلي إلى معادلات التحكم المنحدر لتحسين الاستجابة الديناميكية لوحدات التوليد الموزع عند حدوث الطوارئ الصغيرة كتغيرات الحمل، أدى ذلك إلى تحسين استجابة النظام [6].

لتعزيز استقرار النظام، وإزالة التيار الدائر بين وحدات التوليد الموزع، تم اقتراح إضافة ممانعة افتراضية على خرج العاكس () v_p [16], [13].

استُخدم المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (Proportional Integral Derivative (PID) ضمن حلقات الجهد والتيار في التحكم المنحدر [18], [17]، كما استُخدمت التقنيات الحديثة مع متحكم PID مما أعطى أداءً أفضل [19].

تمّ في هذا البحث استخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي الكسري مع التحكم المنحدر التقليدي للتحكم بالجهد والتردد، ولتقاسم الطاقة، في شبكة ميكروية معزولة مكونة من عاكسين، وذلك ضمن مستويي التحكم الأولي والثانوي.

أهمية البحث وأهدافه:

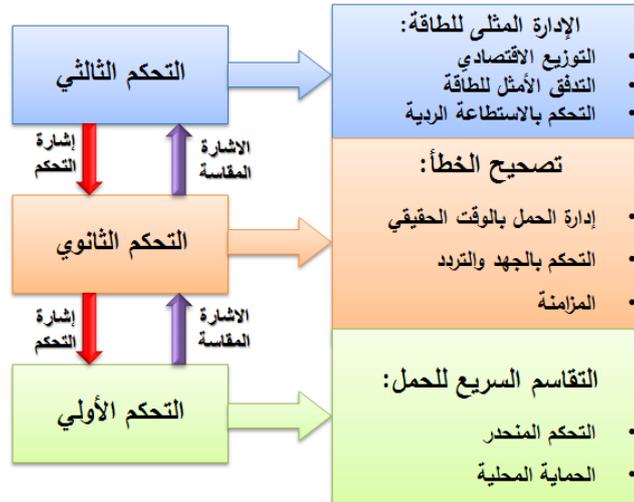
تُعتبر حماية الشبكات الكهربائية الميكروية من تغيرات الجهد والتردد تحدياً كبيراً، لذا كان من الضروري توفير شبكة ميكروية بنظام تحكم قوي، قادر على مشاركة الطاقة بين عواكس الشبكة، والتحكم بجهدا وترددها عند تغييرهما نتيجة أسباب متنوعة.

طرائق البحث وموادّه:

تمّ استخدام بيئة Matlab، و Matlab/Simulink، لكتابة المقاطع البرمجية وتصميم النماذج.

1. التحكم المنحدر Droop Control:

غالباً ما تستخدم طريقة التحكم هذه في حالة وصل العواكس تفرعياً. عند عمل الشبكة الميكروية في الوضع المتصل مع الشبكة، ستقوم الشبكة العامة بدعم استقرار الجهد والتردد ضمن الشبكة الميكروية، أما في الوضع المعزول عن الشبكة العامة، تحتاج الشبكة الميكروية إلى دعم، وذلك لضمان استقرار الجهد والتردد، وهنا تكمن أهمية استخدام التحكم المنحدر، والذي يعتمد تنفيذها على المستويات الثلاث آنفة الذكر [20]. تكون مهمة المستوى الأول في التحكم (التحكم الأولي) التقاسم الدقيق للاستطاعة بين العواكس، بالإضافة إلى تنظيم الجهد والتردد، في حين أن مهمة التحكم الثانوي، تسوية الانحرافات في الجهد والتردد، المتبقية بعد تطبيق التحكم الأولي، ويدير التحكم الثالثي سريان الطاقة الكهربائية بين الشبكة الميكروية والشبكة العامة [22], [21], [3]. يبيّن الشكل (1) مخطط صندوقي للتحكم الهرمي.



الشكل (1) المخطط الصندوقي للتحكم الهرمي [23].

تعطى المعادلات الأساسية للتحكم المنحدر في مستوى التحكم الأولي، بالعلاقات التالية:

$$\omega_i = \omega_{nom} - m_i \cdot P_i \quad (1)$$

$$v_i = v_{nom} - n_i \cdot Q_i \quad (2)$$

حيث:

ω_i : التردد الزاوي للعاكس i ($i=1,2,3,\dots,n$) المقابل للاستطاعة الفعلية P_i .

ω_{nom} : التردد الاسمي للشبكة.

m_i : معامل التحكم المنحدر المتعلق بالاستطاعة الفعلية والذي تم تحديد قيمته من العلاقة (3):

$$m_i = \frac{\Delta f}{P_{max}} \quad (3)$$

حيث:

Δf : التغير المسموح في التردد، P_{max} : الاستطاعة الفعلية العظمى.

v_i : جهد خرج العاكس المقابل للاستطاعة الردية Q_i .

v_{nom} : الجهد الاسمي المحدد.

n_i : معامل التحكم المنحدر المتعلق بالاستطاعة الردية والذي تم تحديد قيمته من العلاقة (4):

$$n_i = \frac{\Delta V}{2Q_{max}} \quad (4)$$

حيث:

ΔV : التغير المسموح في الجهد، Q_{max} : الاستطاعة الردية العظمى.

من أجل تحسين الاستجابة العابرة الديناميكية تم إدخال حد جديد إلى المعادلة (1) وفق مايلي:

$$\omega_i = \omega_{nom} - m_i \cdot P_i \cdot m_{ip} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

يساهم الثابت m_{ip} في تسريع الاستجابة العابرة فيما يتعلق بتغيرات الاستطاعة الفعلية [24].

توفّر طريقة التحكم المنحدر في مستوى التحكم الأولي توازناً مرضياً في الطاقة، ومع ذلك تظهر بعض الأخطاء في الجهد والتردد، تتم معالجتها من خلال التحكم الثانوي [3].

1.1 التحكم الثانوي:

من أجل تعويض انحرافات الجهد والتردد، تم اقتراح التحكم الثانوي الذي يضمن إلغاء تلك الانحرافات بعد كل تغير في الحمل أو في التوليد ضمن الشبكة الميكروية [25].

يتم تحسس قيم الجهد E_{MG} والتردد ω_{MG} في الشبكة الميكروية، ومقارنتها بالقيم المرجعية E_{MG}^* ، ω_{MG}^* ، إذ يتم من خلال منظم الجهد δ_E ومنظم التردد δ_ω معالجة الخطأ، وإرسال قيمته إلى جميع الوحدات لاستعادة القيم المطلوبة. يُعطى كل من منظم الجهد والتردد بالعلاقين التاليين:

$$\delta_\omega = k_{p\omega}(\omega_{MG}^* - \omega_{MG}) + k_{i\omega} \int (\omega_{MG}^* - \omega_{MG}) dt \quad (6)$$

$$\delta_E = k_{pE}(E_{MG}^* - E_{MG}) + k_{iE} \int (E_{MG}^* - E_{MG}) dt \quad (7)$$

حيث: $k_{p\omega}$ ، $k_{i\omega}$ ، k_{pE} ، k_{iE} هي بارامترات التحكم لمنظمات مستوى التحكم الثانوي [26].

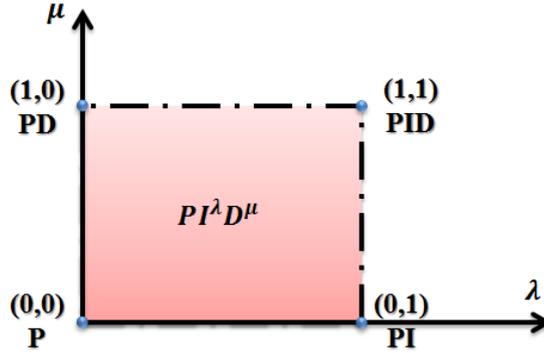
2. المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي الكسري Fractional Order PID:

تعد المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية ذات الأساس الصحيح PID، إحدى المتحكمات التي تم استخدامها بنجاح وكفاءة في أغلب التطبيقات، لاسيما الصناعية منها، إذ تكمن شعبيتها في بساطة تصميمها وأدائها الفعال [27]، إلا أنه وفي الآونة الأخيرة، تم إيلاء اهتمام كبير في الحلول الدقيقة والرقمية للمعادلات التفاضلية التكاملية الكسرية [28]، وكذلك المعادلات التفاضلية التكاملية الخطية منها، وغير الخطية [29]، وفي العديد من التطبيقات، تم إثبات أن المتحكمات الكسرية قد حلت محل نظيراتها من ذات الأساس الصحيح [31]، [30]، ظهر ذلك جلياً عند التحكم في

المنشآت الصناعية، وظهور العديد من متطلبات التحكم، نتيجةً لوجود مجموعة واسعة من التقنيات ضمن تلك المنشآت، حيث تفوّق استخدام متحكمات FOPID على متحكمات PID [32]، إذ أنها توفّر درجات إضافية من المرونة، من خلال احتوائها على معاملين إضافيين للتحكم، هما: λ و μ معاملا الحد التكاملي والتفاضلي على الترتيب [33]، تصف العلاقة (8) المعادلة الخاصة بمتحكمات FOPID:

$$PI^\lambda D^\mu = K_P + K_I/S^\lambda + K_D \cdot S^\mu \quad (8)$$

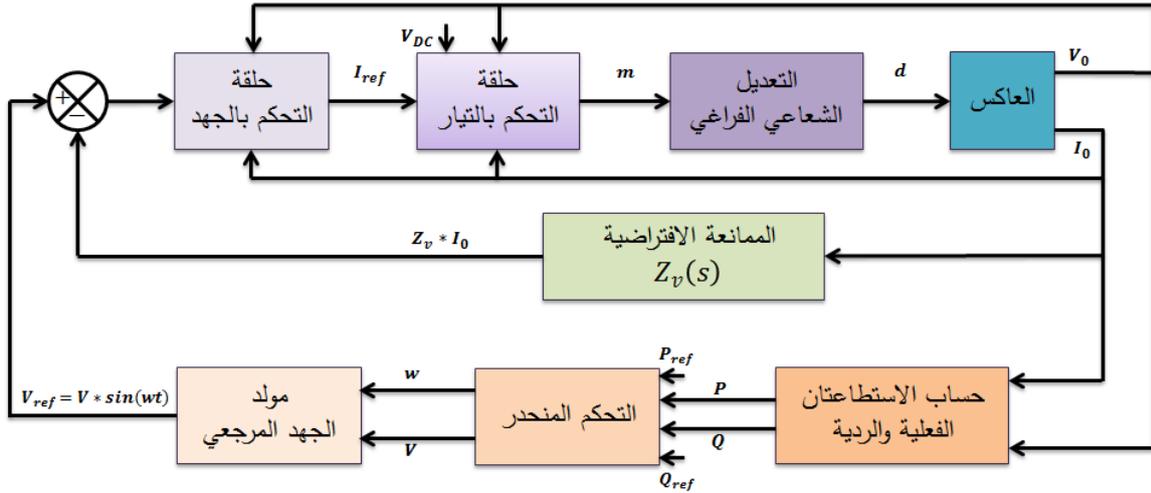
من الواضح أنّ متحكمات FOPID هي تعميم لمتحكمات PID إذ يمكن الحصول على متحكم PID من متحكم FOPID بجعل $\lambda=\mu=1$ ، يوضّح الشكل (2) مخطط FOPID.



الشكل (2) مخطط FOPID. [34]

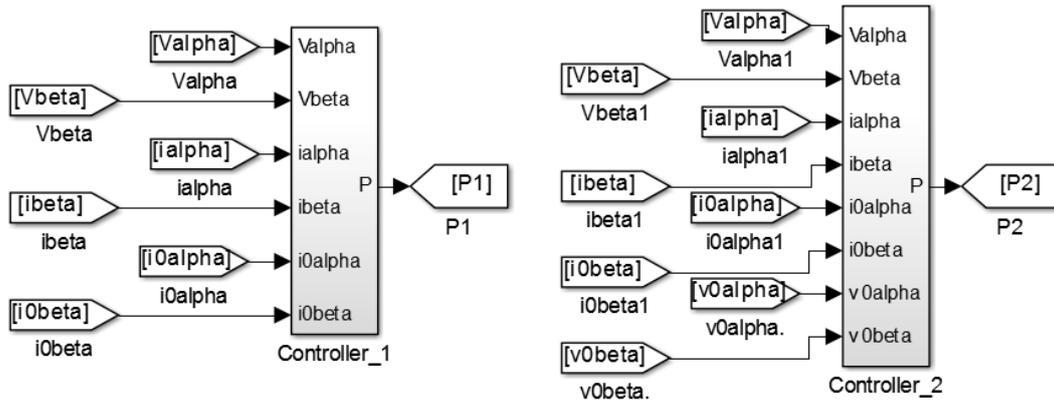
النتائج ومناقشتها:

تم تصميم نموذج لشبكة ميكروية، مكونة من وحدتي توليد موزّع موصولتين تفرعياً مع حمل مشترك، بحيث تعمل الوحدة الأولى مباشرةً، وتدخّل الوحدة الثانية العمل بعد فترة زمنية مقدارها 2 ثانية، كل وحدة توليد تتكون من مصدر جهد مستمر يحاكي المولد الموزع، ثم العاكس المكوّن من 6 مفاتيح الكترونية من نوع IGBT لتحويل الجهد المستمر إلى متناوب، تحتوي كلا الوحدتين على ممانعة خط، تفصل العاكس عن الحمل، وتختلف قيمتها بين الوحدتين. يبيّن الشكل (3) المخطط الصندوقي لنظام التحكم المصمّم.



الشكل (3) المخطط الصندوقي لنظام التحكم المصمّم.

يبين الشكل (4) كتلتي التحكم المسؤولتين عن التحكم بالعاكسين.



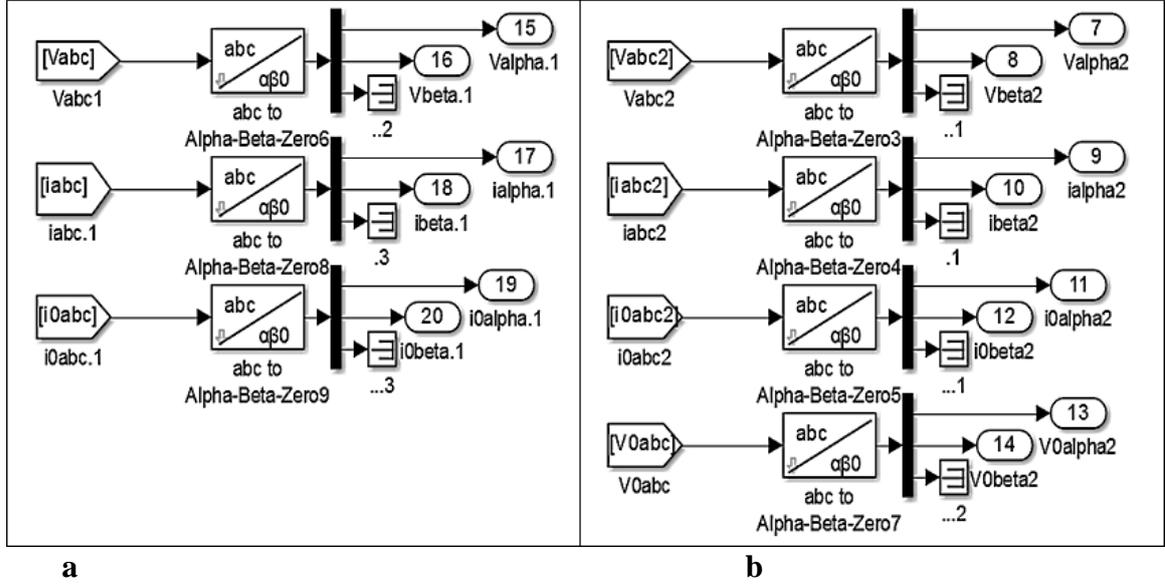
الشكل (4) كتلتي التحكم المسؤولتين عن التحكم بالعاكسين.

من الشكل السابق، نلاحظ أنه تم الانتقال من الإحداثيات الثلاثية abc إلى الإحداثيات الثنائية الثابتة α, β ، وذلك

تسهيلاً لعملية التحكم بالعاكس، حيث تم ذلك من خلال تحويل كلارك [35] وفق العلاقة (9):

$$\begin{bmatrix} f_\alpha(t) \\ f_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

يبين الشكل (5) نموذج التحويل من الاحداثيات الثلاثية abc إلى الاحداثيات الثنائية الثابتة α, β .



الشكل (5) نموذج التحويل من الاحداثيات الثلاثية abc إلى الاحداثيات الثنائية الثابتة α, β .
 a: لوحة التوليد الأولى، b: لوحة التوليد الثانية.

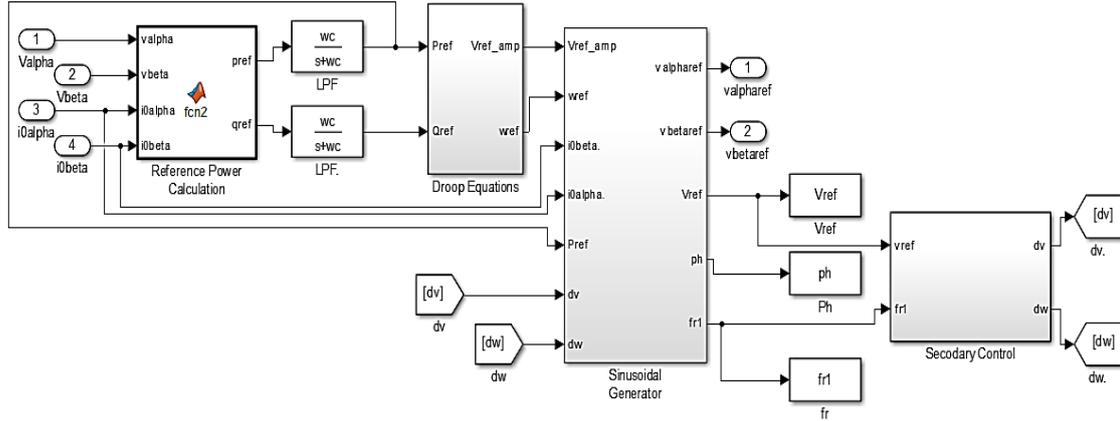
يظهر الشكل (6) النموذج الفرعي ضمن كتلة توليد الجهود المرجعية، والمكونة من كتلة حساب القيم المرجعية للاستطاعة الفعلية والردية، وفق العلاقتين (1) و(2)، وكتلة تنفيذ معادلات التحكم المنحدر، بمستويي التحكم الأولي والثانوي، وكتلة توليد الاشارة الجيبية للجهود المرجعية، وتتضمن هذه الكتلة على الممانعة الافتراضية المصممة وفق العلاقتين (10) و(11) [36]:

$$Z_v i_{o\alpha} = R_v i_{o\alpha} + \omega_{nom} L_v i_{o\beta} \quad (10)$$

$$Z_v i_{o\beta} = R_v i_{o\beta} - \omega_{nom} L_v i_{o\alpha} \quad (11)$$

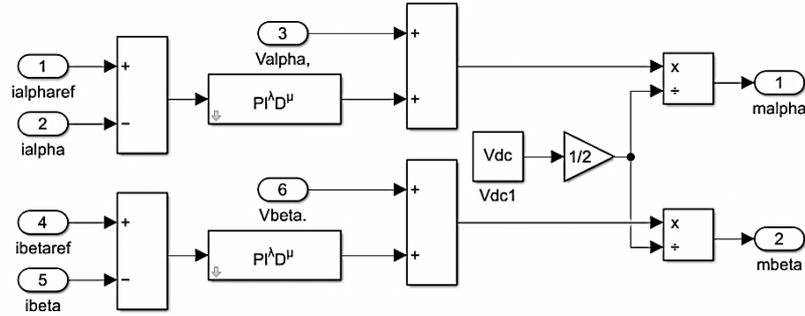
حيث:

L_v : محارضة الممانعة الافتراضية، R_v : مقاومة الممانعة الافتراضية.



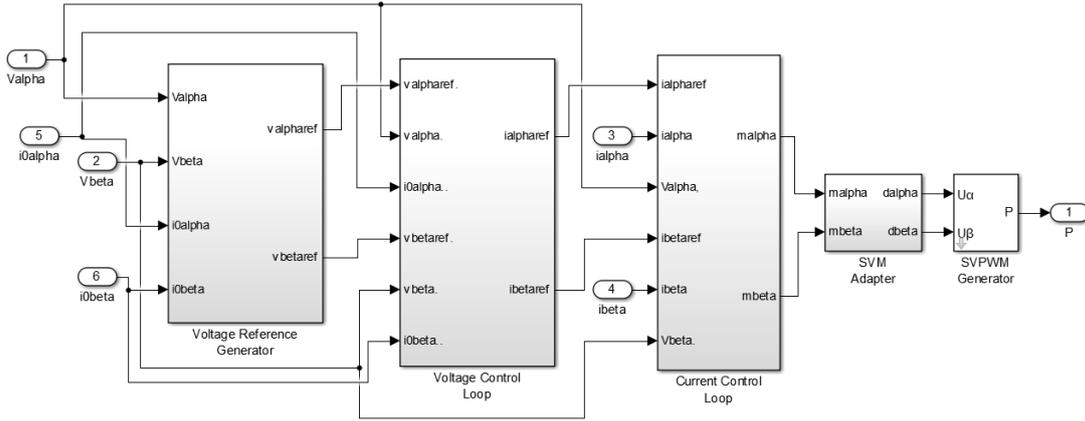
الشكل (6) كتلة توليد الجهود المرجعية للعاكس الأول.

يظهر الشكل (7) كتلة حلقة التحكم بالتيار التي تم بها توليد الإشارة المعدلة، إذ تم استخدام متحكم FOPID في هذه الحلقة.



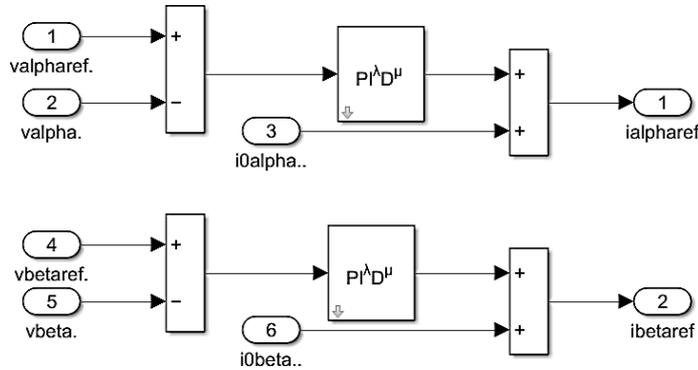
الشكل (7) كتلة حلقة التحكم بالتيار.

يوضح الشكل (8) النموذج الفرعي للتحكم بالعاكس الأول، والمؤلف من كتلة توليد الجهود المرجعية بالإضافة إلى كتلتي حلقات تحكم الجهد والتيار، وتم في هذا النموذج الفرعي، توليد إشارة التعديل المطلوبة، بالاعتماد على كتلة تعديل النبضة الشعاعي الفراغي (SVPWM) Space Vector Pulse Width Modulation [37].



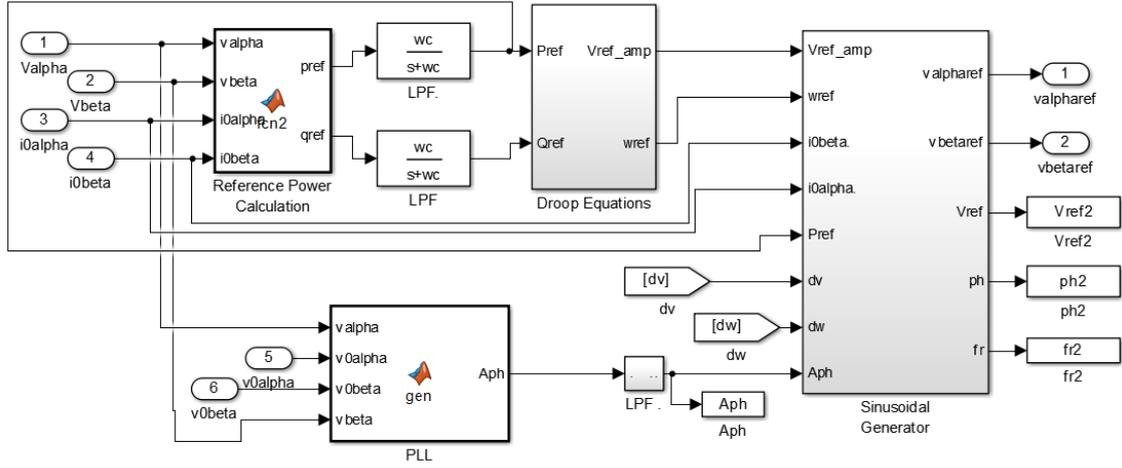
الشكل (8) النموذج الفرعي للتحكم بالعاكس الأول.

يظهر الشكل (9) كتلة حلقة التحكم بالجهد للعاكس الثاني.



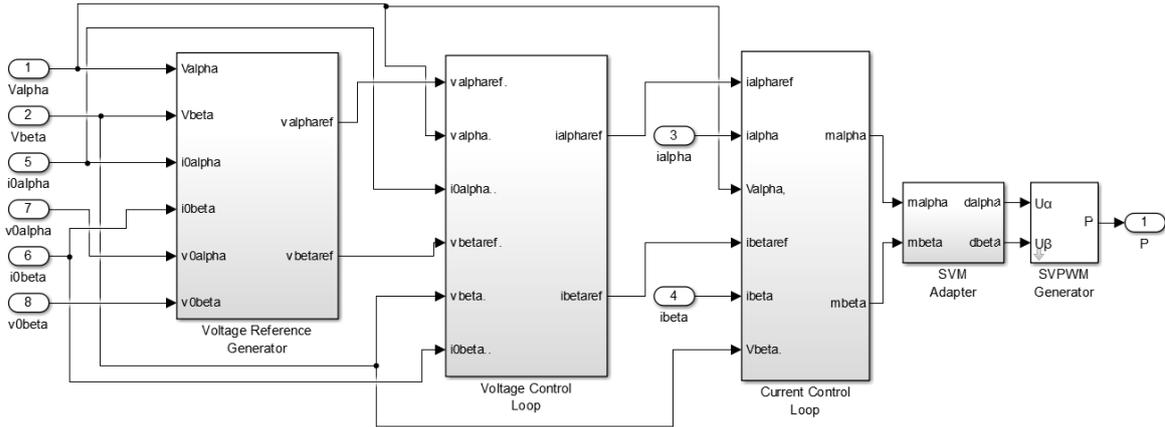
الشكل (9) كتلة حلقة تحكم الجهد في العاكس الثاني.

النماذج الفرعية للعاكس الثاني تماثل نماذج العاكس الأول مع إضافة حلقة إفعال للطور Phase Locked Loop (PLL) في النموذج الفرعي لكتلة توليد الجهود المرجعية كما في الشكل (10).



الشكل (10) النموذج الفرعي ضمن كتلة توليد الجهود المرجعية للعاكس الثاني.

يظهر الشكل (11) النموذج الفرعي للتحكم بالعاكس الثاني.



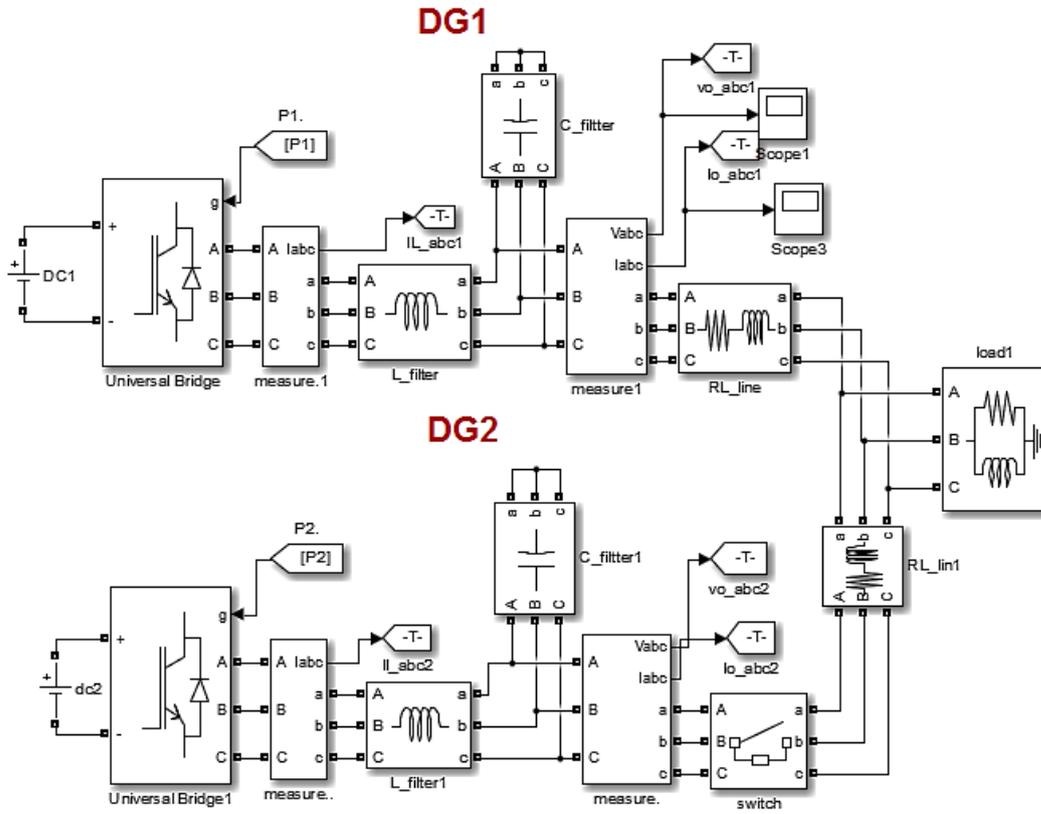
الشكل (11) النموذج الفرعي للتحكم بالعاكس الثاني.

محاكاةً للواقع العملي، تكون البارامترات الكهربائية للعاكس الثاني مختلفة عن بارامترات العاكس الأول،

تكون وظيفة هذا العاكس هي تقاسم الحمولة مع العاكس الأول بعد فترة 2 ثانية.

يُظهر الشكل (12) النموذج المصمم للشبكة الميكروية المقترحة، ويوضح الجدول (1) قيم العناصر

الكهربائية للشبكة المصممة.



الشكل (12) النموذج المصمم للشبكة الميكروية المقترحة.

الجدول (1) قيم العناصر الكهربائية المكونة للشبكة المُصمَّمة [38].

الواحدة	القيمة	الرمز	اسم البارامتر	الواحدة	القيمة	الرمز	اسم البارامتر
mH	1	L_{L1}	محاوضة الخط في العاكس الأول	V	230	V_{nom}	الجهد المتناوب الاسمي
$m\Omega$	65	R_{L1}	مقاومة الخط في العاكس الأول	Hz	50	f_{nom}	التردد الاسمي
mH	6	L_{O2}	محاوضة خرج العاكس الثاني	rad/s	$2\pi \cdot f_{nom}$	ω_{nom}	التردد الزاوي الاسمي
Ω	0.6	R_{O2}	مقاومة خرج العاكس الثاني	V	800	V_{DC}	جهد الخط المستمر
μH	12	C_{F2}	سعة مرشح العاكس الثاني	Ω	22	R_L	مقاومة الحمل
Ω	48	R_{F2}	مقاومة تخميد مرشح العاكس الثاني	mH	5	L_L	محاوضة الحمل
mH	1.2	L_{L2}	محاوضة الخط في العاكس الثاني	mH	5	L_{O1}	محاوضة خرج العاكس الأول
$m\Omega$	78	R_{L2}	مقاومة الخط في العاكس الثاني	Ω	0.5	R_{O1}	مقاومة خرج العاكس الأول
mH	1	L_v	محاوضة الممانعة الافتراضية	μH	10	C_{F1}	سعة مرشح العاكس الأول
$m\Omega$	0	R_v	مقاومة الممانعة الافتراضية	Ω	20	R_{F1}	مقاومة تخميد مرشح العاكس الأول

تكون القيمة التقريبية للاستطاعة الفعلية حوالي 7KW، وفقاً للمعطيات السابقة وللعلاقة (12):

$$P = 3 * \frac{V_{AC}^2}{R_L} \quad (12)$$

بالتالي ستكون قيمة التيار مقاربة لـ 10A، وفق العلاقة (13):

$$I = \frac{P}{3 * V_{AC}} \quad (13)$$

تم استخدام مرشح تمرير منخفض Low Pass Filter (LPF) وفق العلاقة (14) [38]. يوضح الجدول

(2) بارامترات التحكم المطبقة على النموذج.

$$LPF = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (14)$$

حيث:

ω_c : تردد القطع.

s : متغير لابلاس.

الجدول (2) بارامترات التحكم المطبقة على النموذج المصمم.

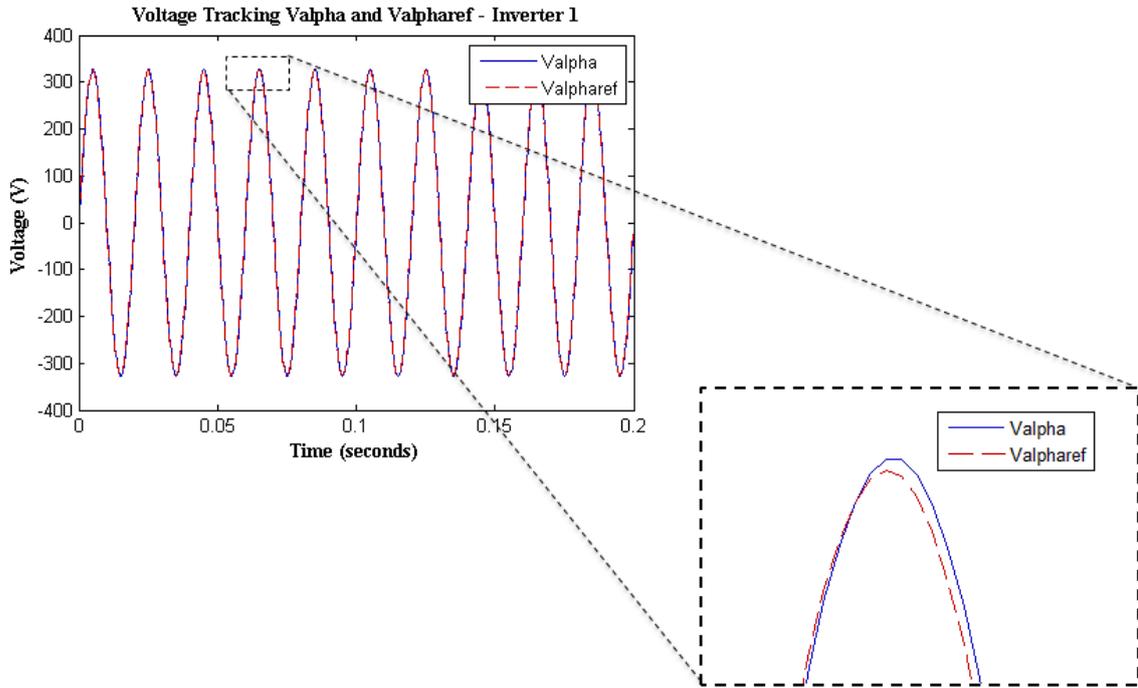
الرمز	m_i	n_i	m_{ip}	k_p	k_i	k_d	λ	μ	$k_{p\omega}$	$k_{i\omega}$	k_{pE}	k_{iE}
القيمة	130	1	10	0.1	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.2	0.01	10

نتائج المحاكاة:

تم تشغيل النموذج المصمم، جاءت نتائج المحاكاة للجهد والتردد، والاستطاعة الفعلية والردية، موضحةً

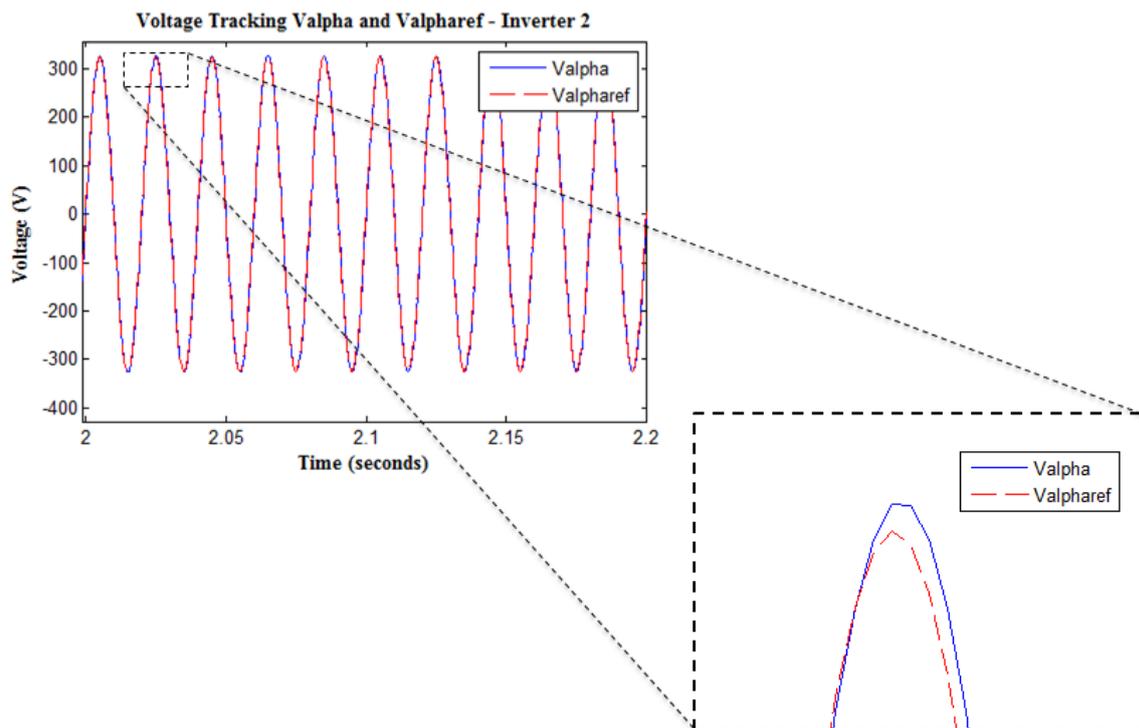
بالأشكال أدناه.

يوضح الشكل (13) ملاحقة جهد العاكس الأول للجهد المرجعي.



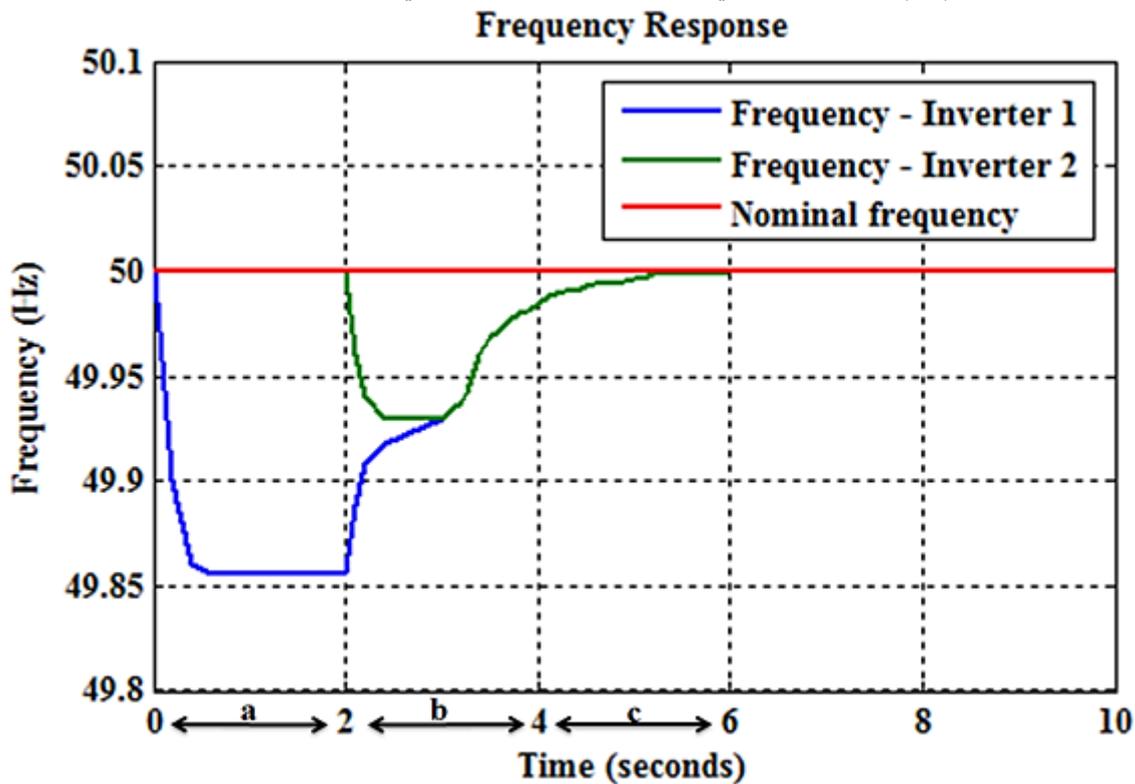
الشكل (13) ملاحقة جهد العاكس الأول للجهد المرجعي.

يبين الشكل (14) ملاحقة جهد العاكس الثاني للجهد المرجعي.

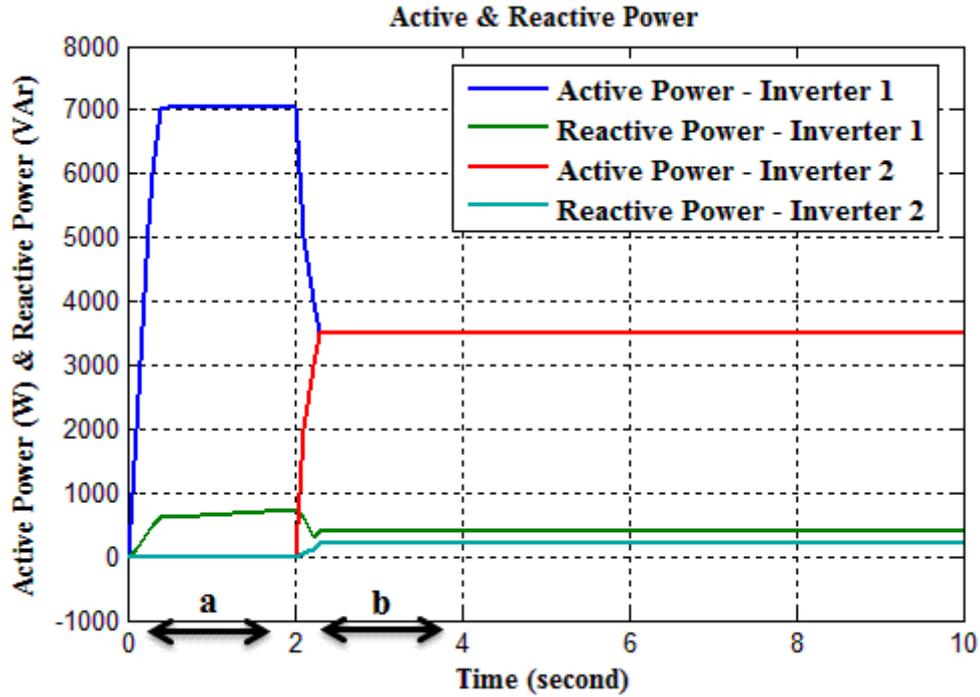


الشكل (14) ملاحقة جهد العاكس الثاني للجهد المرجعي.

يظهر الشكل (15) استجابة التردد في كل من العاكسين الأول والثاني.



الشكل (15) استجابة التردد في كل من العاكسين الأول والثاني.



الشكل (16) الاستطاعة الفعلية والردية للعاكسين.

دراسة ومقارنة النتائج:

تمت ملاحقة الجهد المرجعي في العاكس الأول بشكل دقيق، بانحراف قليل جداً عن القيمة المرجعية بقيمة لا تتجاوز 1.7 Volt، في حين كان الانحراف عن الجهد المرجعي في العاكس الثاني لا يتجاوز 1.5 Volt. نلاحظ من الشكل (15) أنه وخلال الفترة a انخفض تردد العاكس الأول بسبب التحميل، تحت القيمة 50 Hz وهي القيمة المرجعية للتردد، لكن كان الانخفاض بمقدار قليل، لم يتجاوز 0.15 Hz، بقيمة وصلت إلى 49.85 Hz، وهي قيمة مقبولة وضمن الحدود المسموحة للتردد، وبدءاً من $t=2$ sec (لحظة عمل العاكس الثاني)، نلاحظ أن تردد العاكس الأول بدء بالازدياد والاقتراب من القيمة المرجعية، وذلك بسبب تقاسم العاكس الثاني الحموله بينه وبين العاكس الأول، وعند اللحظة $t=5.2$ sec، نلاحظ وصول تردد كل من العاكسين إلى القيمة المرجعية، وتحقيق خطأ صفري.

يتبين من الشكل (16) استجابة الاستطاعة الفعلية والردية، عند بدء العاكس الأول العمل في اللحظة $t=0$ sec، نلاحظ أن الاستطاعة الفعلية كانت 7000 W، وعند اللحظة $t=2$ sec (لحظة عمل العاكس الثاني)، بدأت الاستطاعة الفعلية المقدمة من العاكس الأول بالانخفاض لتصل إلى قيمة 3500 W عند اللحظة $t=2.2$ sec، وبالتالي نلاحظ وجود تقاسم دقيق للاستطاعة الفعلية بين العاكسين.

بعد بدء عمل العاكس الثاني، نلاحظ اقتراب قيمة الاستطاعة الردية لكلا العاكسين من الصفر، وهي القيمة المرجعية المطلوبة للاستطاعة الردية في الحالة المدروسة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- تمّ من خلال استخدام التحكم الثانوي، تصحيح أخطاء التحكم الأولي، مما أدى إلى مشاركة دقيقة للاستطاعة وتقاسم جيد للحمل، بالإضافة إلى دوره في استعادة التردد، والوصول إلى خطأ صفري.
- تمّ ملاحظة أن الاستطاعة الفعلية حققت مشاركة دقيقة ومثالية وذلك لأن التردد يُعتبر متغيّر شامل Global وجميع العقد في الشبكة الميكروية تقدّم نفس التردد، في حين لم تتم ملاحظة ذات المشاركة المثالية في الاستطاعة الرديّة، نظراً لأن الجهد يُعتبر متغيّر محلي Local وقيمه مختلفة بين عقد الشبكة.
- تم تحقيق تتبع دقيق لجهد الخرج في كلا العاكسين.
- تبيّن أن استخدام كل من مرشّح التمرير المنخفض، والحد التفاضلي، وحلقة الإقفال الطورية، أدى إلى تقليل التشويش والحصول على استجابة عابرة مثالية وبدائية ناعمة للتردد.

التوصيات:

- نوصي بإجراء أبحاث مماثلة ورفدها بإجراء تجارب عملية ضمن مختبرات خاصة بالشبكات الكهربائية الميكروية.
- نوصي باستخدام التقنيات الذكيّة الحديثة لتحسين أداء التحكم المنحدر في الشبكات الكهربائية الميكروية.
- نقترح استخدام خوارزميات الأمثلة في إيجاد القيم المثلى لثوابت متحكمات FOPID.

المراجع:

- .1 AHMADLI.S; SHOKOOHLI.S; BEVRANI.H. **2015**. *A fuzzy logic-based droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in an AC microgrid. International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Vol.64, pages: 148–155 .
- .2 KIM.Y; KIM.E; MOON.S. **2016**. *Frequency and voltage control strategy of standalone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems. IEEE Transactions on Power Systems*. Vol.31, No.1, pages: 718–728 .
- .3 GUERRERO.J; VASQUEZ.J; MATAS.J; VICUÑA.L; CASTILLA.M. **2011**. *Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization. IEEE Trans Ind Electron*. Vol.58, No.1, pages: 158–172.
- .4 CHE.L; KHODAYAR.M; SHAHIDEHPOUR.M. **2014**. *Only connect: Microgrids for distribution system restoration. IEEE Power and Energy Magazine*, Vol.12, No.1, pages:70-81.
- .5 BIDRAM.A; DAVOUDI.A. **2012**. *Hierarchical structure of microgrids control system. IEEE Transactions on Smart Grid*. Vol.3, No.4, pages:1963–1976.
- .6 MOHAMED.Y; EL-SAADANY.E. **2008**. *Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids. IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol.23, No.6, pages: 2806–2816.
- .7 SHANXU.D; YU.M; JIAN.X; YONG.K; JIAN.C. **1999**. *Parallel Operation Control Technique of Voltage Source Inverters in UPS. IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. , Hong Kong. Pages: 883-887.
- .8 PRODANOVIĆ.M; GREEN.T. **2006**. *High-quality power generation through distributed control of a power park microgrid. IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol.53, No.5, pages: 1471–1482.
- .9 CALDOGNETTO.T; TENTI.P. **2014**. *Microgrids operation based on Master-Slave Cooperative Control. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. Vol.2 ,No.4 , pages: 1081-1088.
- .10 ROKROK.E; GOLSHAN.M. **2010**. *Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid. IET Generation, Transmission and Distribution*. Vol.4, No.5, pages: 562–578.
- .11 BRABANDERE.K; BOLSENS.B; KEYBUS.J; WOYTE.A; DRIESEN.J; BELMANS.R. **2007**. *A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol.22, No.4, pages: 1107–1115.
- .12 GUERRERO.J; HANG.L; UCEDA.J. **2008**. *Control of distributed uninterruptible power supply systems. IEEE Trans Ind Electron*. Vol.55, No.8, pages:2845–2859.
- .13 VASQUEZ.J; MASTROMAURO.R; GUERRERO.J; LISERRE.M. **2009**. *Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter. IEEE Trans Ind Electron*. Vol.56, No.11, pages: 4510–4519.

- .14 ASHABANIS.S; MOHAMED.Y. **2014**. *New family of microgrid control and management strategies in smart distribution grids-analysis, comparison and testing. IEEE Trans Power Syst.* Vol.29, No.5, pages:2257–2269.
- .15 RACITIA.A; BIGNUCOLO.F; CALDON.R. **2015**. *Assessment of an Improved Droop Control Scheme for DG Inverter Based Microgrids. 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).*
- .16 NADERI.Y; HOSSEINI.S; GHASSEM.S; MOHAMMADI.B; VASQUEZ.J; GUERRERO.J. **2018**. *Distributed power quality improvement in residential microgrids. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO2017.* pages: 90–94.
- .17 DOU.C; ZHANG.Z; YUE.D; SONG.M. **2017**. *Improved droop control based on virtual impedance and virtual power source in low-voltage microgrid. IET Generation, Transmission and Distribution.* Vol.11, No.4, pages: 1046–1054 .
- .18 BODDAPATI.V; KUMAR.T; PRAKASH.N; GUNAPRIYA.B. **2021**. *Current droop control of parallel inverters in an autonomous microgrid. In: Materials Today: Proceedings. Elsevier Ltd, Vol.45, pages: 2034–2039 .*
- .19 WANG.Q; WANG.C; GU.J. **2021**. *Research on fuzzy PID droop control method for DC microgrid in island mode. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing Ltd, pages: 1–6.*
- .20 REY.J; CASTILLA.M; MIRET.J; CAMACHO.A; GUZMAN.R. **2019**. *Adaptive Slope Voltage Control for Distributed Generation Inverters with Improved Transient Performance. IEEE Trans Energy Convers.*Vol.34, No.3, pages: 1644–1654.
- .21 MARTÍ.P; VELASCO.M; MARTÍN.E; VICUÑA.L; MIRET.J; CASTILLA.M. **2018** *Performance Evaluation of Secondary Control Policies With Respect to Digital Communications Properties in Inverter-Based Islanded Microgrids. IEEE Trans Smart Grid, Vol.9, No.3, pages: 2192–2202 .*
- .22 GUERRERO.J; MATAS.J; VICUÑA.L; CASTILLA.M; MIRET.J. **2006**. *Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters. IEEE Trans Ind Electron.* Vol.53, No.5, pages:1461–1470 .
- .23 ALAM.M; CHAKRABARTI.S; GHOSH.A. **2019**. *Networked Microgrids: State-of-the-Art and Future Perspectives. IEEE Trans Ind Informatics.* Vol.15, No.3, pages:1238–1250 .
- .24 GUERRERO.J; CHANDORKAR.M; LEE.T; LOH.P. **2011**. *Advanced Control Architectures for Intelligent MicroGrids – Part I&II: Decentralized and Hierarchical Control.* pages: 1–18.
- .25 MADUREIRA.A; MOREIRA.C; PEÇAS.J. **2005**. *Secondary load-frequency control for microgrids in islanded operation. Renewable Energy and Power Quality Journal.* Vol.1, No.3, pages: 482–486 .
- .26 GUERRERO.J; VÁSQUEZ.J; MATAS.J; CASTILLA.M; GARCÍA.L. **2009**. *Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics.* Vol.56, No.3, pages: 726–736 .
- .27 TORRES.W; ARAUJO.I; FILHO.J; JUNIOR.A. **2017**. *Mathematical Modeling and PID Controller Parameter Tuning in a Didactic Thermal Plant. IEEE Latin America Transactions.* Vol.15, No7, pages:1250–1256 .
- .28 BALEANU.D; DIETHELM.K; SCALAS.E; TRUJILLO.J. **2016**. *Fractional calculus: Models and numerical methods: Second edition. Fract Calc Model Numer Methods Second Ed,* pages: 1–448 .

- .29 BABAKHANI.A; BALEANU.D. **2012**. *Existence and uniqueness of solution for a class of nonlinear fractional order differential equations. Abstract and Applied Analysis.* pages: 1–14.
- .30 FELIU.V; MONJE.C; VINAGRE.B; CHEN.Y; FELIU.V; LANUSSE.P; et al. **2004**. *proposals for fractional $p\lambda d\mu$ tuning. Conference: The First IFAC Symposium on Fractional Differentiation and its Applications 38.* Available from: <https://www.researchgate.net/publication/215530743>.
- .31 ZAMANI.M; KARIMI-GHARTEMANI.M; SADATI.N; PARNIANI.M. **2009**. *Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. Control Eng Pract.* Vol.17, No.12, pages: 1380–1387.
- .32 SALEH.K; TSAKALIS.K; RODRIGUEZ.A; Si.J; ARTEMIADIS.P. **2017**. *Fractional Order PID Controller Tuning by Frequency Loop-Shaping: Analysis and Applications.* Pages: 176.
- .33 JASIM.W; MASHHADANY.Y. **2021** *Diabetics blood glucose control based on ga-fopid technique. Bull Electr Eng Informatics.* Vol.10, No.1, pages: 516–523.
- .34 EL-KHAZALI.R; BATIHA.I; MOMANI.S. **2019**. *Approximation of Fractional-order Operators. International workshop on Advanced Theory and Applications of Fractional Calculus.* Vol.303, pages: 121–151
- .35 DUESTERHOEFT.WC; SCHULZ.MW; CLARKE.E. **1951**. *Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components. Trans Am Inst Electr Eng.* Vol.70, No.2, pages: 1248–1255.
- .36 ZAMBRONI DE SOUZA.A; CASTILLA.M. **2019**. *Microgrids design and implementation. Microgrids Design and Implementation. Microgrids Design and Implementation.* Pages: 1-538.
- .37 KUMAR.M. **2011**. *Control Implementations for High Bandwidth Shunt Active Filter.*
A thesis of Master's degree of Science Electrical Engineering submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University..
- .38 MIRET.J; DEVICUÑA.J; GUZMÁN.R; CAMACHO.A; GHAHDERIJANI.M. **2017**. *A flexible experimental laboratory for distributed generation networks based on power inverters. Energies.* Vol.10, No.10, pages: 1-27.