

تحسين جودة الطاقة الكهربائية لمضخات المياه المعزولة عن الشبكة

د.م. سامر محمد حسين *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١/١٢ . قُبل للنشر في ٢٠٢٦/٢/١٧)

□ ملخص □

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين جودة الطاقة الكهربائية في نظام مخصص لتشغيل مضخة مياه من خلال منبع تيار مستمر، اعتمد البحث على منهجية المحاكاة باستخدام برنامج Matlab/Simulink لمقارنة ثلاث حالات تشغيلية : التغذية المباشرة من الشبكة الكهربائية (كمعيار قياسي)، والتغذية من منبع تيار مستمر بدون مرشحات، والتغذية من منبع تيار مستمر مع مرشحات من جهتي التيار المستمر والمتناوب. أظهرت النتائج تحسن ملحوظ في جودة الطاقة الكهربائية حيث انخفض معامل التشوه التوافقي (THD) من قيم مرتفعة تجاوزت % 25 إلى % 1.13 فقط وهي نسبة منخفضة ومتوافقة مع المواصفات القياسية الدولية-IEEE 519، كما حافظ النظام على جهد مستقر عند قيمة 219.3 V مع إشارة تيار شبه جيبية نقية. يقدم البحث حلاً عملياً للتحديات التشغيلية في المناطق النائية مع ضمان كفاءة تشغيل عالية وحماية للمحرك من الآثار السلبية للتوافقيات.

كلمات مفتاحية: مضخات المياه، التوافقيات، مرشحات، معامل التشوه التوافقي THD

* عضو هيئة فنية (قائم بالأعمال) في كلية الهندسة التقنية - قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة - جامعة طرطوس - سوريا

Improving the quality of electrical power for off-grid water pumps

Dr. samer hossaien *

(Received 12/1/2025 . Accepted 17/2/2026)

□ ABSTRACT □

This study aims to improve the power quality of a water pump operating system powered by a DC supply. The research employed a simulation methodology using Matlab/Simulink software to compare three operating conditions: direct supply from the electrical grid (as the standard), supply from a DC supply without filters, and supply from a DC supply with filters on both the DC and AC sides.

The results showed a significant improvement in power quality, with the Total Harmonic Distortion (THD) decreasing from high values exceeding 25% to only 1.13%, a low percentage compliant with the international standard IEEE-519. The system also maintained a stable voltage of 219.3 V with a near-pure sinusoidal current signal.

This research offers a practical solution to operational challenges in remote areas, ensuring high operating efficiency and protecting the motor from the negative effects of harmonics.

Keywords: Water pumping, Harmonic, flow, filters, THD.

*Research at Faculty of technical engineering, Technologies renewable energy Department -Tartous University-Tartous- Syria.

١- المقدمة:

يعاني قطاع الكهرباء في سوريا من تحديات في توفير الكهرباء للمستهلكين أدت إلى انخفاض كبير في ساعات الوصل وتطبيق نظام تقنين على الشبكة الكهربائية دفع المستهلكين إلى البحث عن مصادر بديلة، تتنوع هذه المصادر بين استخدام مولدات الطاقة الكهربائية العاملة على الوقود (بنزين أو ديزل) أو استخدام ألواح الطاقة الكهروضوئية، وفي حالات أخرى يلجأ المستهلكون إلى المدخرات لتغذية أحمال مستقلة كمضخات المياه والتي تشكل حاجة أساسية لكثير من المستهلكين سواء من أجل تأمين مياه الشرب أو تأمين المياه لري المزروعات.

تشكل ندرة المياه والطلب المتزايد على الطاقة تحديين رئيسيين في عصرنا الحالي، ومع انتشار استخدام الألواح الكهروضوئية و المدخرات برزت تحديات تقنية تتعلق بجودة الطاقة الكهربائية الناتجة عن استخدام المعرجات (Singh,B., et al, 2024) والتي تعتبر بمثابة منابع للتوافقيات، حيث ينتج عن عمليات التبديل في هذا العواكس تشوهاً توافقياً في كل من إشارة الجهد والتيار مما يؤدي إلى آثار سلبية في الأحمال الكهربائية وخاصة المحركات بحيث تسبب انخفاض كفاءة المحرك و زيادة الضياعات الحرارية وتقليل العمر الافتراضي للمعدات (Firlit and et al, 2017)، لذلك يقدم هذا البحث حلاً شاملاً لهذه التحديات من خلال تصميم نظام مرشحات (L-C) على جانبي المعرج لضمان أعلى مستويات جودة الطاقة.

تعتمد أنظمة المعرجات الحديثة على عدة أنواع من المرشحات لتحسين جودة الطاقة الكهربائية، وعند اختيار أي نوع يجب مراعاة كل من الكفاءة والتكلفة الاقتصادية بالإضافة إلى التعقيد، وفيما يلي أبرز أنواع المرشحات المستخدمة في المعرجات:

- المرشح نوع L: يعتبر من أبسط أنواع المرشحات المستخدمة في أنظمة القدرة الكهربائية، يتكون من ملف واحد يوصل على التسلسل بين العاكس والحمل، ويعمل كمرشح تمرير منخفض. يمتاز هذا النوع من المرشحات بتصميم بسيط وتكلفة منخفضة إلا أنه لا يملك كفاءة محدودة. معامل التشوه التوافقي لهذا المرشح THD يبلغ % 8-15. (Villanueva and et al , 2020)

- المرشح نوع LC: يتكون من ملف موصول على التسلسل ومكثف موصول على التفرع، يوفر هذا النوع مسارين للتوافقيات: تمرير الترددات المنخفضة من خلال الملف وتحويل التوافقيات عالية التردد عبر المكثف، يمتاز هذا النوع بكفاءة أعلى من المرشح L وحجم أصغر لنفس الأداء، سلبيات هذا النوع تتمثل بخطر حدوث الطنين عند الترددات المتوسطة وبجاجة لتحليل استقرار دقيق. معامل التشوه التوافقي THD لهذا المرشح يبلغ % 3-8. (Bolsi and et al , 2024).

- المرشح نوع LCL: يتكون من ملفين مع مكثف موصول على التوازي بينهما، يمتاز هذا النوع بكفاءة عالية في حجب التوافقيات عالية التردد، وبحجم صغير بالنسبة للملفات، ويعتبر مناسب جداً للأنظمة المتصلة مع الشبكة والتي تتطلب جودة طاقة كهربائية عالية. معامل التشوه التوافقي THD لهذا المرشح يبلغ % 1-5. (Kumar et al , 2024).

تم اختيار نظام مرشح LC مزدوج للأسباب التالية:

- يوفر نظام مرشح LC مزدوج أداءً ممتازاً مقابل تكلفة مقبولة مقارنة مع LCL الأكثر تعقيداً.

- ملائم للأنظمة المعزولة (Off-grid) المغذاة من مدخرات أو ألواح طاقة كهروضوئية (PV) مما يقلل من مخاطر الطنين.
- البساطة والموثوقية مقارنة بنظام LCL وأقل عرضة لمشاكل الاستقرار مما يزيد من موثوقية النظام في التطبيقات العملية.
- المرشح المزدوج (مرشح دخل DC + مرشح خرج AC) يوفر حماية على كامل مسار الطاقة من المنبع وحتى الحمل.

٢- أهمية البحث و أهدافه:

يعد تحسين جودة الطاقة الكهربائية في الأنظمة المعزولة التي تعتمد على مصادر الطاقة المخزنة (المدخرات) أو الألواح الكهروضوئية من المجالات البحثية الهامة خاصة مع التوسع في استخدام أنظمة المضخات الشمسية للري وتوفير مياه الشرب للمناطق النائية.

تشكل التوافقيات الناتجة عن المعرجات الكهربائية تحدياً تقنياً حيث تؤثر هذه التوافقيات سلباً على كفاءة المحركات وعمرها الافتراضي وتتسبب في حدوث ضياعات، وقد تؤدي إلى عدم استقرار النظام بالكامل. يهدف البحث إلى دراسة تحسين جودة الطاقة الكهربائية في أنظمة ضخ المياه المعزولة عن الشبكة من خلال تصميم مرشح LC مزدوج وتحديد القيم المثلى لمكونات المرشح (L و C) بحيث يضمن المرشح قيم THD أقل من 2% (IEEE Std 519-2022)

٣- طرائق البحث ومواده:

٣-١ الدراسات المرجعية:

تشير الأبحاث الحديثة إلى محدودية أداء مرشحات L في تحقيق جودة طاقة عالية، ففي دراسة لأنظمة شحن المركبات الكهربائية قام بها (Li, 2023) سجل مرشح L البسيط نسبة THD تراوحت بين 10-14% مما يعكس ضعف قدرة هذه المرشحات على حجب التوافقيات ذات التردد العالي.

في دراسة قام بها (Abbas and et al , 2024) صممت مرشحات LCL باستخدام الخوارزميات التطورية كالخوارزميات الوراثة لأنظمة الطاقة المتجددة المتصلة بالشبكة، اعتمد الباحثون في التصميم على الموازنة بين الحجم والكلفة والأداء، يركز هذا البحث على تحقيق الاستقرار في الأنظمة المتصلة.

قدم مجموعة من الباحثين (Barva and et al , 2023) مقارنة شاملة لأنظمة المرشحات المستخدمة في الأنظمة الكهروضوئية (PV) من خلال تقديم إطار منهجي لتقييم الخيارات المتاحة بناء على الأداء والكلفة والتعقيد يركز البحث في المرجع (Safamehr and et al , 2022) على التصميم الأمثل لمرشحات LC من خلال معالجة اللاخطية الفعلية في مكونات المرشح وذلك عبر خوارزمية تحكم تتكيف مع ظروف التشغيل وهو نهج يمكن تطبيقه مستقبلاً على الأنظمة المعزولة.

للحصول على أعلى مستويات جودة الطاقة، ركزت العديد من الأبحاث على مرشحات LC، حيث قام عدد من الباحثين (Bolsi and et al, 2024) بتحسين تصميم مرشحات LC المستخدمة في القابلات عالية التردد القائمة على تقنية Sic حيث حققت قيم THD أقل من 4%.

ركزت معظم الدراسات المرجعية على تصميم مرشحات للأنظمة المتصلة بالشبكة، يقدم هذا البحث دراسة لاستخدام مرشح LC مزدوج مخصص للأنظمة المعزولة عن الشبكة والمعتمدة على منابع الجهد المستمر، مما يجمع بين الأداء الجيد والبساطة في التصميم ومتوافقاً مع المواصفات القياسية (IEEE std 519-2023).

٣-٢ مكونات النظام المدروس:

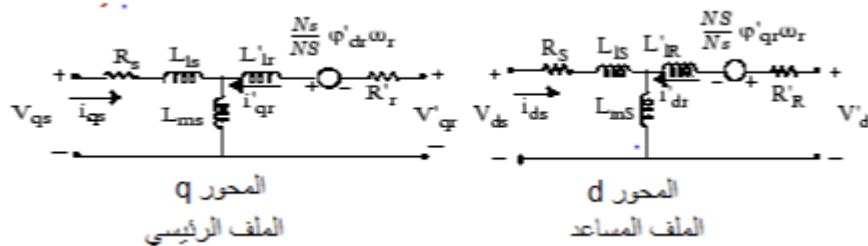
يتكون النظام المدروس من مضخة باستطاعة 1 [Hp] محرك تحريضي متناوب أحادي الطور يعمل بجهد 220V وسرعة دوران 2850 rpm، سنقوم من خلال برنامج Matlab/Simulink بمحاكاة لتغذية المضخة بثلاث حالات:

- التغذية من الشبكة (220 V – 50Hz).

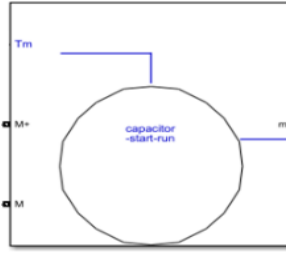
- التغذية من منبع جهد مستمر (400 V) عبر معرج (Inverter) أحادي الطور بدون استخدام مرشحات.

- التغذية من منبع جهد مستمر (400 V) عبر معرج (Inverter) أحادي الطور مع استخدام مرشحات على جانبي المعرج.

تم استخدام نموذج المحرك التحريضي المتناوب أحادي الطور الموجود في مكتبة Matlab/simulink كما هو موضح في الشكل (١)، وإدخال البارامترات الخاصة بالمحرك والمذكورة أعلاه. كما يبين الشكل (2) الدارة المكافئة للمحرك التحريضي أحادي الطور. تم استخدام نموذج المعرج أحادي الطور من مكتبة Matlab/Simulink بتقنية التعديل النبضي العرضاني PWM لتغذية محرك المضخة أحادي الطور. للتحكم بالمعرج تولد نبضات القذح من أجل تحكم سلمي $V/f = \text{const}$. حيث تتولد القيمة المرجعية لجهد التغذية وتقارن مع القيمة المقاسة ثم تدخل على متحكم من النوع PID لتوليد إشارة التحكم التي بدورها تولد نبضات القذح. بمعنى أن جهد خرج المعرج مضبوط من ناحية الطويلة والتردد على قيم مرجعية مرغوبة. بارامترات المتحكم أخذت كما هي في أحد الأمثلة التوضيحية في .MATLAB

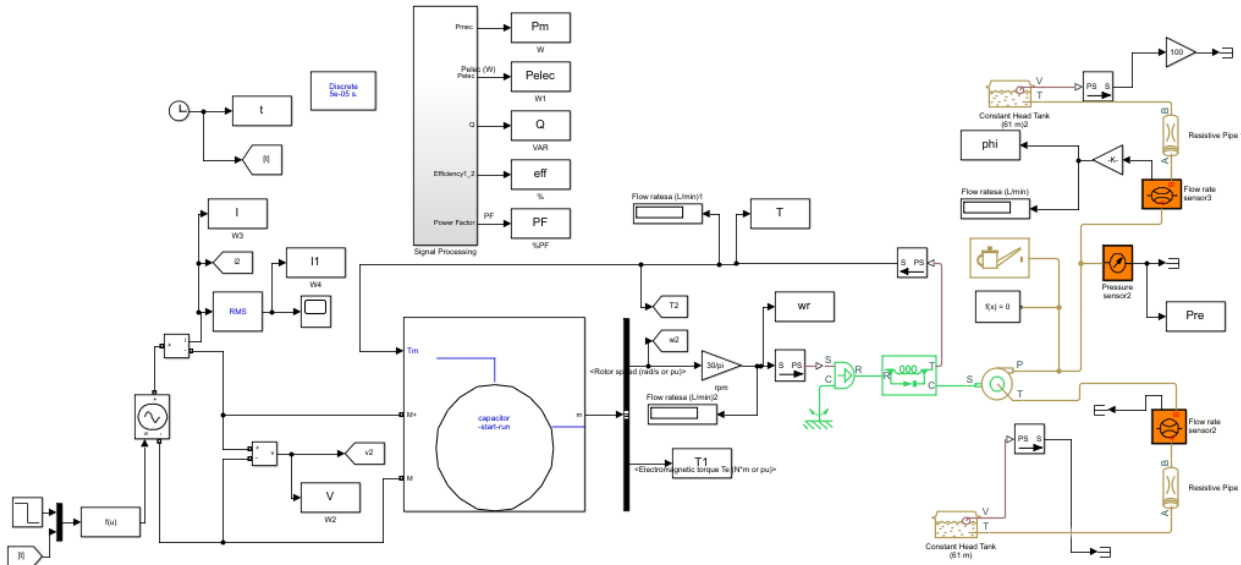


الشكل (١) نموذج المحرك الكهربائي المتناوب أحادي الطور

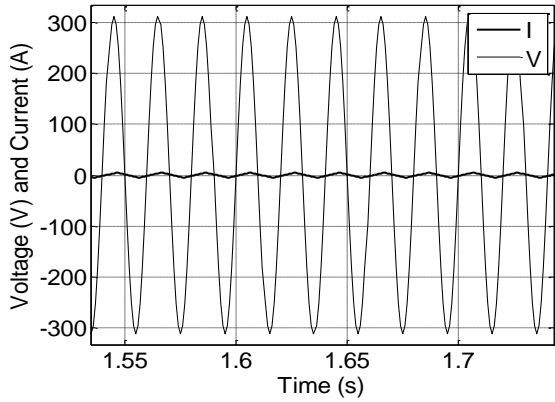


الشكل (٢) الدارة المكافئة للمحرك التحريضي المتناوب أحادي الطور

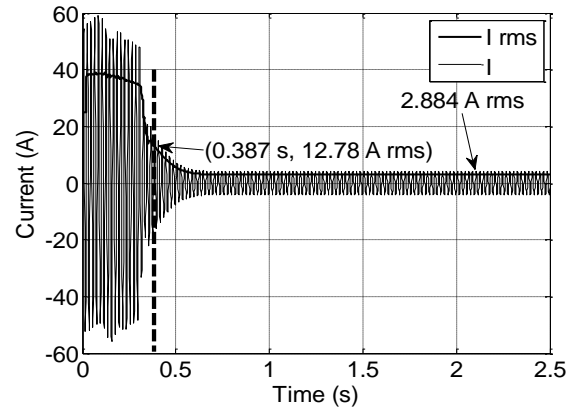
يبين الشكل (٣) مخطط نموذج المضخة الغاطسة التي يقودها محرك تيار متناوب أحادي الطور ذو مكثف إقلاع دائم حيث يتغذى المحرك بجهد متناوب من منبع جهد (شبكة التوتر المنخفض $220V, 50Hz$).

الشكل (٣) نموذج تغذية المضخة مع المحرك مباشرة من شبكة $220V, 50Hz$

لدراسة سلوك البارامترات الكهربائية (الجهد ، التيار) نقوم برسم المنحنيات التي تساعد في دراسة هذا السلوك، يُلاحظ من الشكل (4) ارتفاع القيمة الفعالة للتيار عند الإقلاع، ثم تناقصه مع زيادة السرعة حتى الوصول للحالة المستقرة حيث يبلغ $2.884 A$ ، كما يبين الشكل (5) أن كل من التيار والجهد جيبيين وأن التيار متأخر عن الجهد حيث أن الحمل مختلط (أومي + تحريضي).

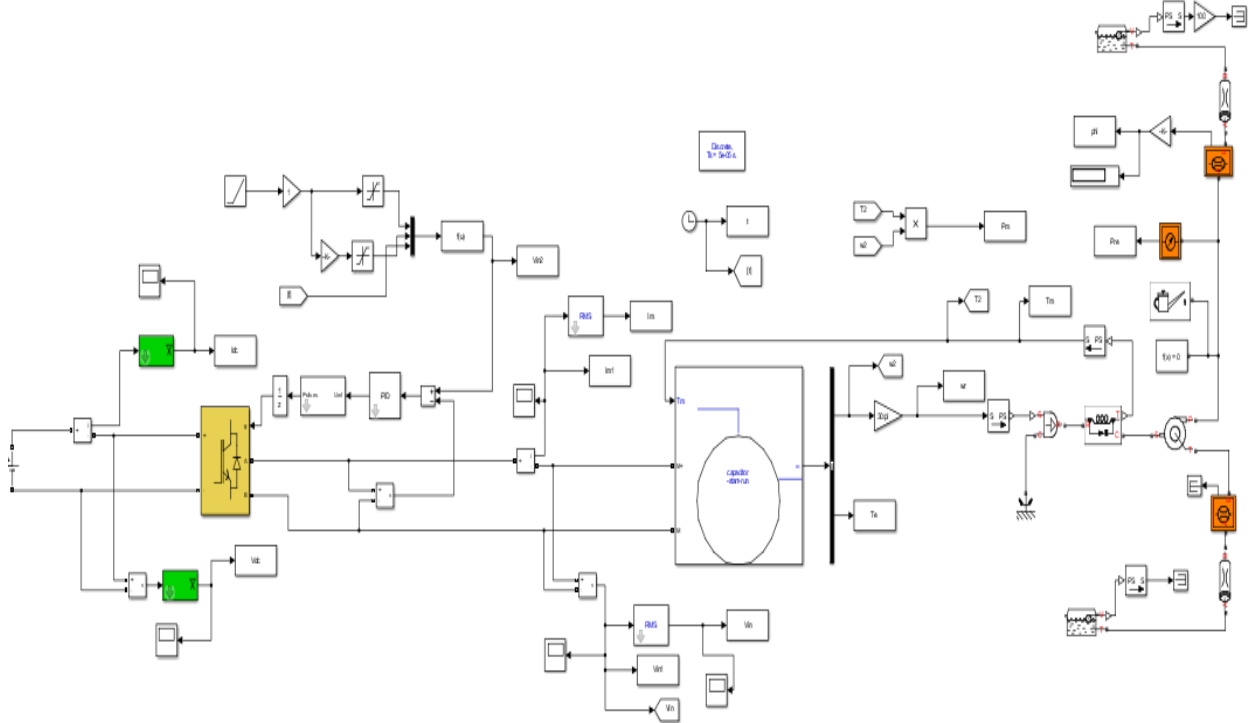


الشكل (٥) جهد و تيار التغذية للمحرك



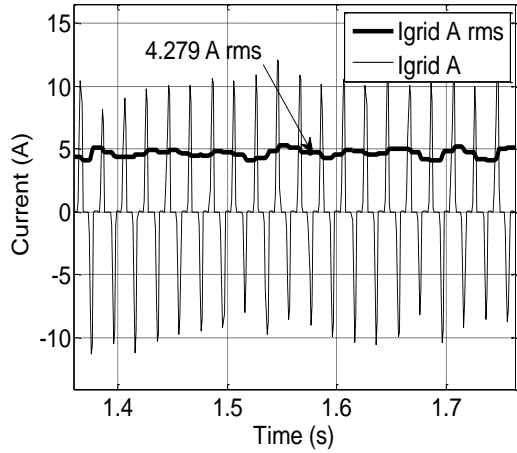
الشكل (٤) التيار الكهربائي الجيبي وقيمتة الفعالة

يبين الشكل (6) نموذج محاكاة تغذية المضخة من منبع مستمر v 400 عبر معرج أحادي الطور (Inverter) بدون استخدام مرشح (Filter) ونعيد رسم إشارتي الجهد والتيار.

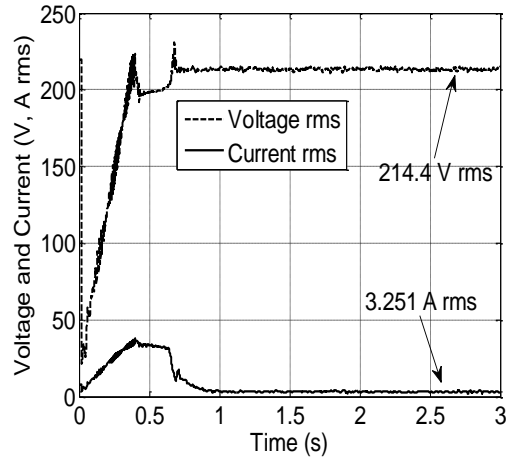


الشكل (٦) نموذج تغذية المضخة مع المحرك من منبع DC عبر معرج أحادي الطور (Inverter)

في هذه الحالة يسري تيار توافقي عبر شبكة التغذية كما هو مبين في الشكل (7) وتبلغ القيمة الفعالة للجهد $214.4 V$ والقيمة الفعالة للتيار $3.251 A$ ، عند تكبير الموجة يظهر تيار أبري متناوب كما في الشكل (8).



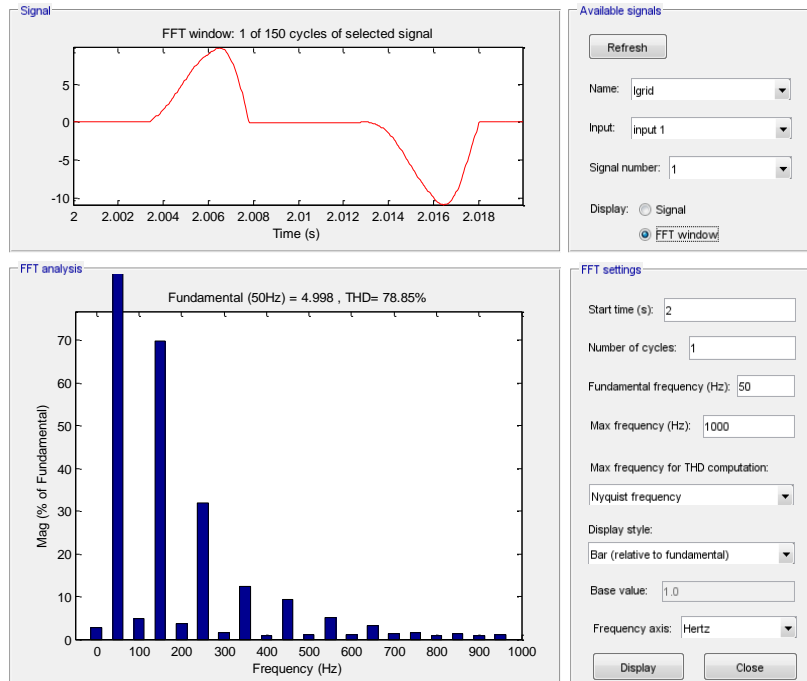
الشكل (٨) تكبير التيار اللحظي والقيمة الفعالة



الشكل (٧) القيمة الفعالة للجهد والتيار على خرج القالبية

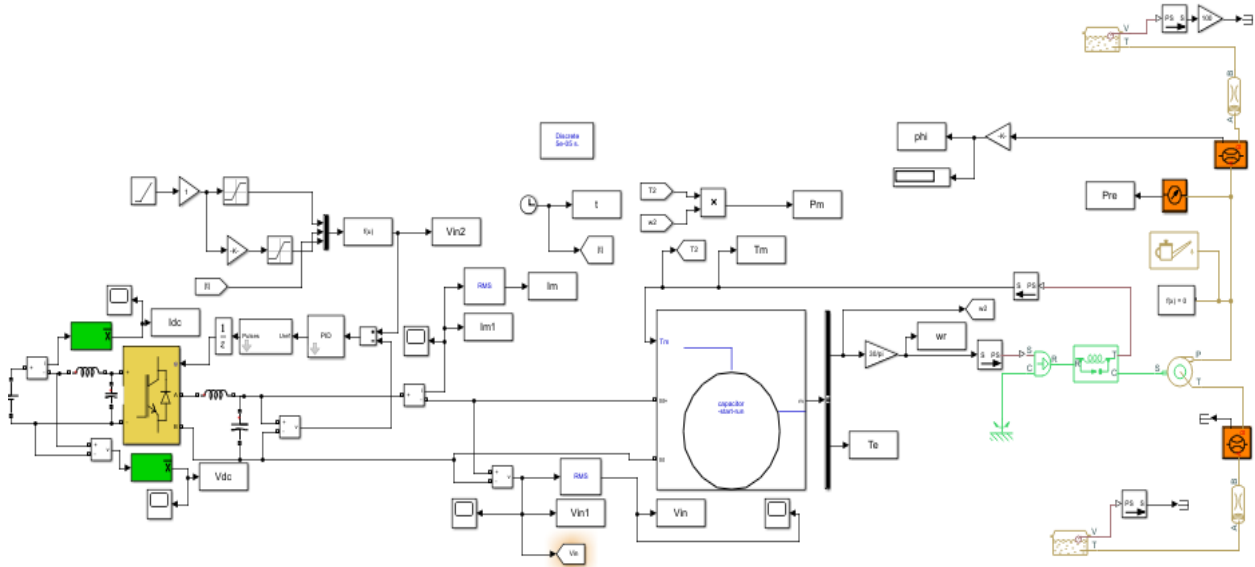
التيار ملوث بالتوافقيات الفردية 3th, 5th, 7th,...، تم إجراء التحليل التوافقي لتيار الشبكة كما في

الشكل (٩). لوحظ معامل تشوه توافقي كبير 78.85 غير مقبول ويحتاج إلى ترشيح.

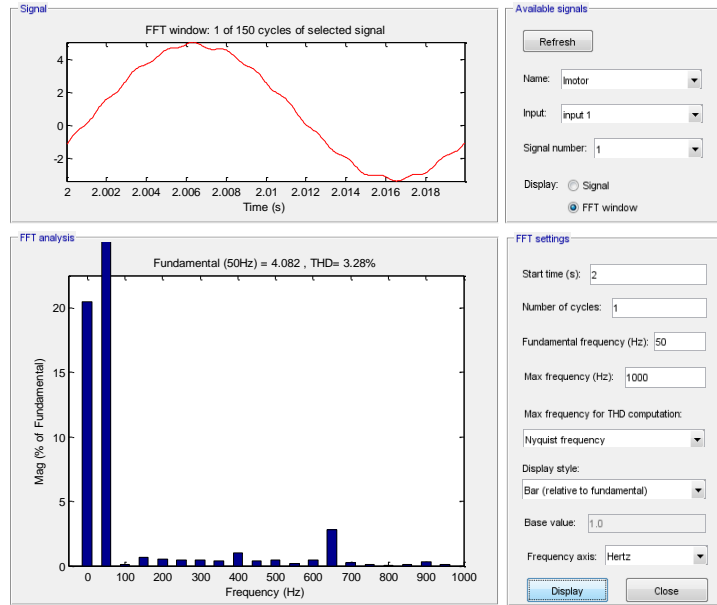


الشكل (٩) عامل التشوه التوافقي لتيار المعرج

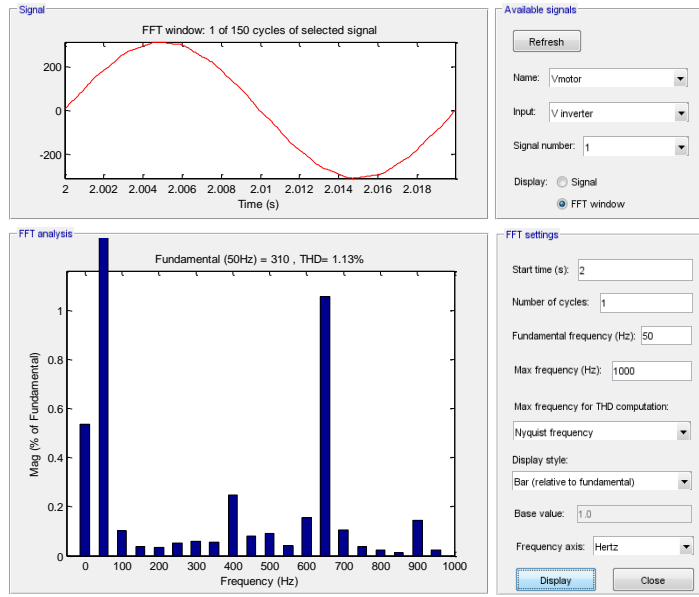
تم وضع المرشحات قبل وبعد المعرج وتم اختيار بارامتراته بطريقة التجربة أو المحاولة والخطأ نظراً لتعقيد النموذج الرياضي للنظام المدروس، حيث تم اختيار عناصر مرشح الدخل ($L=1 \text{ mH}$, $C=3.9 \mu\text{F}$) وعناصر مرشح الخرج ($L=10 \text{ mH}$, $C=9 \mu\text{F}$). يبين الشكل (10) نموذج محاكاة تغذية المضخة من منبع مستمر عن طريق معرج وبوجود مرشح LC مزدوج على جانبي المعرج، الهدف من المرشحات هو تحسين شكل موجة الجهد والتيار ويلاحظ ذلك من خلال التحليل التوافقي في الأشكال التالية.



الشكل (10) نموذج تغذية المضخة مع المحرك من منبع DC عبر قالبة أحادية الطور (Inverter) وبوجود مرشح LC مزدوج
 يبين الشكل (١١) شكل موجة التيار المتناوب جهة المحرك ويلاحظ أنها شبه جيبيية ومعامل التشوه التوافقي
 مقبول 3.28%. أما بالنسبة للجهد فيبين الشكل (١٢) أن التشوه التوافقي له يبلغ 1.13% وهو ضمن القيم المسموحة
 أيضاً.



الشكل (11) معامل التشوه التوافقي للتيار عند استخدام المرشح LC المزدوج



الشكل (12) معامل التشوه التوافقي للجهد عند استخدام المرشح LC المزودج

٤- النتائج ومناقشتها:

في الحالة الأولى ونظراً لأن نموذج المحاكاة استخدم مصدر جهد جيبي مثالي والتي تتضمن تغذية المضخة مباشرة من شبكة (220 V – 50Hz) ، (THD=0%) فقد تم الاستناد إلى المعيار (IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2020) الذي يوضح بأن نسبة THD للجهد في الشبكات المنزلية تتراوح عادة بين ١,٥ % و ٣,٥ % في الظروف العادية وبناء على ذلك تم اعتماد القيمة ٢ % والمبينة في الجدول (1) المتضمن مقارنة بين الأنظمة المدروسة

الجدول (١) مقارنة بين الحالات الثلاث المدروسة

التغذية من منبع مستمر مع استخدام مرشح LC مزودج	التغذية من منبع مستمر بدون استخدام مرشحات	التغذية من الشبكة	
219.3	214.4	٢٢٠	جهد الخرج (V rms)
١,١٣	٧٨,٨٥	~ ٢	معامل التشوه التوافقي للجهد THD

تثبت هذه المقارنة أن النظام المقترح أظهر أداءً مستقرًا حيث بلغ الجهد الفعال 219.3 V وهي قيمة قريبة جداً من جهد التشغيل الاسمي و يؤكد هذا الاستقرار في الجهد على كفاءة دائرة التحكم في القالب و قدرة المرشح على توفير جودة طاقة كهربائية عالية بالإضافة إلى الحصول على موجة شبه جيبيية بعد استخدام المرشح الأمر الذي أدى أيضاً إلى انخفاض نسبة التشوه التوافقي الكلي إلى 1.13 %.

الجدول (٢) يوضح مقارنة بين المرشح المستخدم (LC المزودج) مع بقية أنواع المرشحات من خلال قيم THD لأنواع المرشحات التي تم استعراضها سابقاً.

الجدول (٢) مقارنة بين أنواع المرشحات من حيث قيمة THD

قيمة THD	نوع المرشح
8-15 %	L
3-8 %	LC
1-5 %	LCL
1.13%	LC المزدوج

٥- الاستنتاجات والتوصيات:

خلص هذا البحث إلى مجموعة من الاستنتاجات:

- أثبت النظام المقترح فعاليته في خفض نسبة التشوه التوافقي إلى ما دون 2%.
- رفع كفاءة التشغيل للمحركات الكهربائية و إطالة عمرها الاقتصادي من خلال التقليل من الضياعات الحرارية الناتجة عن التوافقيات.
- يمثل النظام المقترح حلاً عملياً واقتصادياً قابلاً للتطبيق لا سيما في مشاريع الري الزراعي.

التوصيات:

- دراسة تأثير المرشحات على عمر المدخنة
- تحليل التكلفة على مدى العمر الافتراضي
- اختبار النظام على أحمال باستطاعات أكبر.
- دمج مصادر طاقة متعددة (مدخرات + ألواح PV + عنفات ريحية)

-٦- المراجع:

- [1] SINGH,B., et al. 2024. *Recent Advances in Harmonic Mitigation Techniques for Renewable energy systems: A Critical Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 191, 114567.
- [2] FIRLIT, A., KOŁEK, K., & PIĄTEK, K. 2017. *Heterogeneous active power filter controller*. In *2017 International Symposium ELMAR* (pp. 241-244).
- [3] VILLANUEVA, I., VÁZQUEZ, N., VAQUERO, J., HERNÁNDEZ, C., LÓPEZ, H., & OSORIO, R. 2020. *L vs. LCL Filter for Photovoltaic Grid-Connected Inverter: A Reliability Study*. International Journal of Photoenergy, 2020(1), 7872916.
- [4] BOLSI, P. C., PRADO, E. O., LENZ, J. M., SARTORI, H. C., & PINHEIRO, J. R. 2024. *LC filter optimized design considering the effect on the power converter and capacitor lifetimes*. International Journal of Circuit Theory and Applications, 52(11), 5892-5915.
- [5] KUMAR,S., et al 2024 . *Resonant Damped LCL Filters for Ultra-Low THD in data center power Supplies*. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics , 12(2), PP 1567-1580.
- [6] DURSUN, M., & DÖŞOĞLU, M. K. 2018. *LCL filter design for grid connected three-phase inverter*. International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-4).
- [٧] LI,Y.,WANG,H., &CHEN,W. 2023. *Comprehensive analysis of passive filters for electric vehicle fast charging stations*.IEEE Transactions on Transportation Electrifications, 9(1), 456-468.
- [٨] ABBAS, H. H., SHAFIEE, Q., & BEVRANI, H. 2024. *Optimal passive LCL filter design for grid-connected converters in weak grids*. Electric Power Systems Research, 235, 110896.
- [٩] BARVA, A. V., & JOSHI, S. 2023. *Comparative Analysis of Passive, Active, and Hybrid Active Filters for Power Quality Improvement in Grid-Connected Photovoltaic System*. In *2023 7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [10] SAFAMEHR, H., NAJAFABADI, T. A., & SALMASI, F. R. 2022. *Adaptive control of grid-connected inverters with nonlinear LC filters*. IEEE Transactions on Power Electronics, 38(2), 1562-1570.
- [11] BOLSI, P. C., PRADO, E. O., LENZ, J. M., SARTORI, H. C., & PINHEIRO, J. R. 2024. *LC filter optimized design considering the effect on the power converter and capacitor lifetimes..* International Journal of Circuit Theory and Applications, 52(11), 5892-5915.
- [1٢] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,IEEE std 519-2014.