

Design and Implementation of a Single-Phase Smart Meter to Measure Bi-directional Power Flow and test its Performance

Dr. Ali Khadour*
Dr. Sahar Alali**
Danny Ibrahim***

(Received 16 / 8 / 2024. Accepted 18 / 9 / 2024)

□ ABSTRACT □

In this research, A single-phase smart electric meter has been designed and implemented to measure the bidirectional flow of electrical power and transmit the measurement data remotely via the Internet to cloud servers connected to the utility company operating the meter. The system also allows remotely connecting and disconnecting the electrical power at the meter's output. The electric meter's overall architecture and its core components, including the sensor and power measurement unit, the central processing unit, and the remote data transmission unit, are described. The text also outlines the calibration mechanism used to ensure precise measurement accuracy.

The electric meter's performance was evaluated by comparing its power parameter measurements to those of a reference device, the Power Analyzer. The results showed that the meter's readings had an error margin of no more than 1% for all measured parameters. Specifically, the error rates for the RMS measurement of current and voltage were 0.184% and 0.1772% respectively, while the error rates for active and reactive power were 0.278% and 0.349% respectively. The error rate for power factor measurement was determined to be 0.909%.

Keywords: Smart Meter, Bidirectional Power flow, Wireless data transmission, Measurement of Grid parameters.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor, Department of Renewable Energies, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.

** Associate Professor, Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.

***Postgraduate student (PhD) of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria. dannyibrahim@gmail.com

تصميم وتنفيذ عداد ذكي أحادي الطور يقيس تدفق القدرة الكهربائية بالاتجاهين واختبار أدائه

د. علي بديع خضور*

د. سحر عبد الكريم العلي**

داني كمال إبراهيم***

(تاريخ الإيداع 16 / 8 / 2024. قُبِلَ للنشر في 18 / 9 / 2024)

□ ملخص □

تم في هذا البحث تصميم وتنفيذ عداد كهربائي ذكي أحادي الطور لقياس تدفق القدرة الكهربائية بالاتجاهين، وإرسال بيانات القياس عن بعد عبر شبكة الإنترنت إلى خوادم سحابية مرتبطة بالشركة الكهربائية المشغلة للعداد مع توفير إمكانية فصل ووصل الطاقة الكهربائية على خرج العداد، حيث تم توضيح المخطط العام للعداد الكهربائي المنفذ وشرح عمل الوحدات الأساسية اللازمة لعمل العداد من وحدة الحساسات وقياس الطاقة لوحدة المعالجة الرئيسية ووحدة إرسال البيانات عن بعد بالإضافة لتوضيح آلية المعايرة المستخدمة في ضبط عملية القياس. عند إجراء الاختبارات اللازمة لتقييم أداء العداد الكهربائي المنفذ في قياس بارامترات الطاقة بالمقارنة مع جهاز قياس مرجعي Power Analyzer كانت القراءات الواردة من العداد بنسبة خطأ لا تتجاوز 1% في جميع البارامترات المقاسة، حيث بلغت نسبة خطأ القياس للقيمة الفعالة للتيار والجهد (0.1772 % - 0.184 %) على التوالي، في حين بلغت نسبة خطأ الاستطاعة الفعالة والردية (0.349 % - 0.278 %)، وخطأ قياس معامل الاستطاعة 0.909 %.

الكلمات المفتاحية: عداد ذكي، تدفق القدرة بالاتجاهين، إرسال البيانات لاسلكياً، قياس بارامترات الشبكة.



حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

* أستاذ - قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس-سورية.
*** أستاذ مساعد - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس-سورية.
* طالب دراسات عليا (دكتوراه) - هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس-سورية.

dannyibrahim@gmail.com

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 أمراً حيوياً 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]. يعاني الواقع الطاقى في سوريا من مشاكل في إنتاج الكهرباء لأسباب مختلفة منها فنية تتعلق بصيانة محطات التوليد (أو حتى إنشاء محطات كهربائية جديدة) ومنها ما يتعلق بالطاقة اللازمة لتشغيل هذه المحطات (تأمين الإمداد اللازم من الفيول والغاز بما يلبي الحاجة المتزايدة للطاقة الكهربائية)، مما شجع على استخدام مصادر الطاقات المتجددة لتغذية الأحمال ورفع الفائض منها إلى الشبكة العامة.

تبرز المشكلة الأكبر في عدم وجود نظام مراقبة بالوقت الحقيقي للتغيرات الحاصلة على الحمل، والتحكم بتوزيع الطاقة المتاحة على الأحمال، فضلاً عن الهدر الكبير في المال العام نتيجة عدم تحصيل مستحقات الشبكة العامة للكهرباء من فواتير حقيقية تمثل قيمة الاستهلاك الكهربائي الحقيقي دون سرقة وذلك من خلال تحصيل كميات الاستهلاك الحقيقية بالوقت الحقيقي عن بعد دون التلاعب بقراءة العدادات، ومن هنا برزت أهمية توفير أسس تحويل الشبكة الكهربائية العامة إلى شبكة كهربائية ذكية من خلال تصميم عدادات قدرة ذكية توفير إمكانية تحصيل معطيات الاحمال الكهربائية عن بعد والتحكم بتوزيع الطاقة المتاحة لها [7].

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. تركز الأبحاث الحديثة على تصميم العداد الذكي بما يواكب التطور التقني في توليد الطاقة الكهربائية، حيث تم قياس الطاقة الفعالة والرديئة، وتطوير خوارزميات قياس لجودة الطاقة الكهربائية المقدمة للمستهلك [8] ، كما تم توضيح مجالات تطوير العدادات الكهربائية والتحديات الصعبة التي تواجه تطبيقها مثل التكلفة المرتفعة، وإمكانية تحصيل معطيات القياس عن بعد [9] ، بالإضافة لوجود دراسات تصميمية لعدادات منخفضة التكلفة قابلة للتطبيق في البلدان النامية [10] والعديد من الدراسات الأخرى التي تسهب في شرح طرق قياس بارامترات الطاقة الكهربائية، دون التطرق لألية قياس تدفق القدرة الكهربائية بالاتجاهين في منظومات الطاقة الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة العامة.

أهمية البحث وأهدافه:

الهدف من هذا البحث تصميم واختبار نموذج مقترح لعداد كهربائي ذكي، يقيس تدفق القدرة الكهربائية بالاتجاهين، ويرسل بيانات القياس عن بعد بالاعتماد على شبكة الإنترنت حيث يتم توضيح المكونات الإلكترونية اللازمة لعمل العداد المقترح. وشرح الخوارزميات المنفذة لإجراء عمليات القياس وإرسال البيانات عن بعد. بالإضافة لتوضيح آلية المعايرة المتبعة بحيث نحصل على عداد كهربائي ذكي، يقيس بارامترات الطاقة الكهربائية بدقة واختبار أدائه.

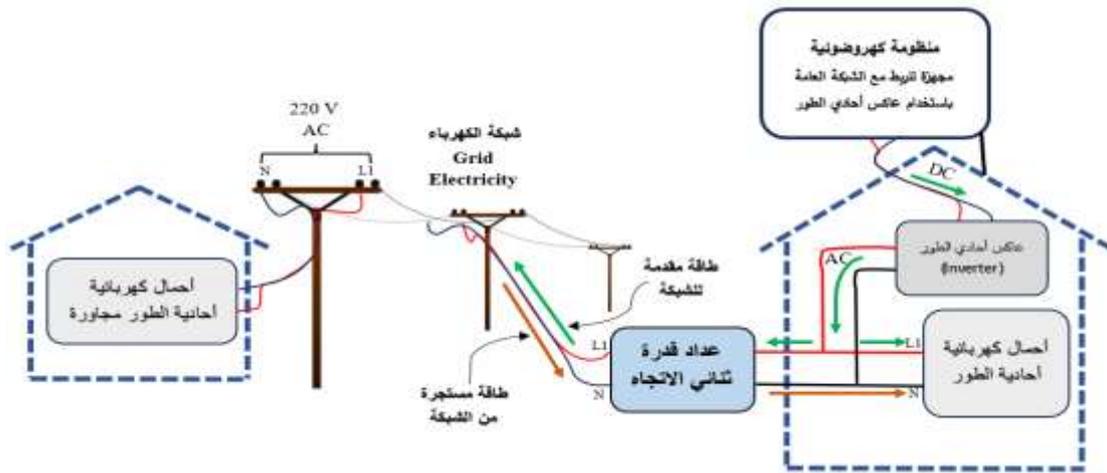
تكمُن أهمية تنفيذ هذا النوع من العدادات في تعزيز دمج الطاقات المتجددة مع الشبكة العامة، وتوطين عملية التصنيع محلياً بما ينعكس بالفائدة الاقتصادية في ظل الحصار وصعوبة استيراد هذا النوع من العدادات ذو الكلفة العالية.

طرائق البحث ومواده:

1- النظام المقترح لعمل العداد الذكي:

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 استرجار 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 يجب 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، مع توفير إمكانية إرسال بيانات القياس عن بعد، وتلقي أوامر التشغيل والفصل.

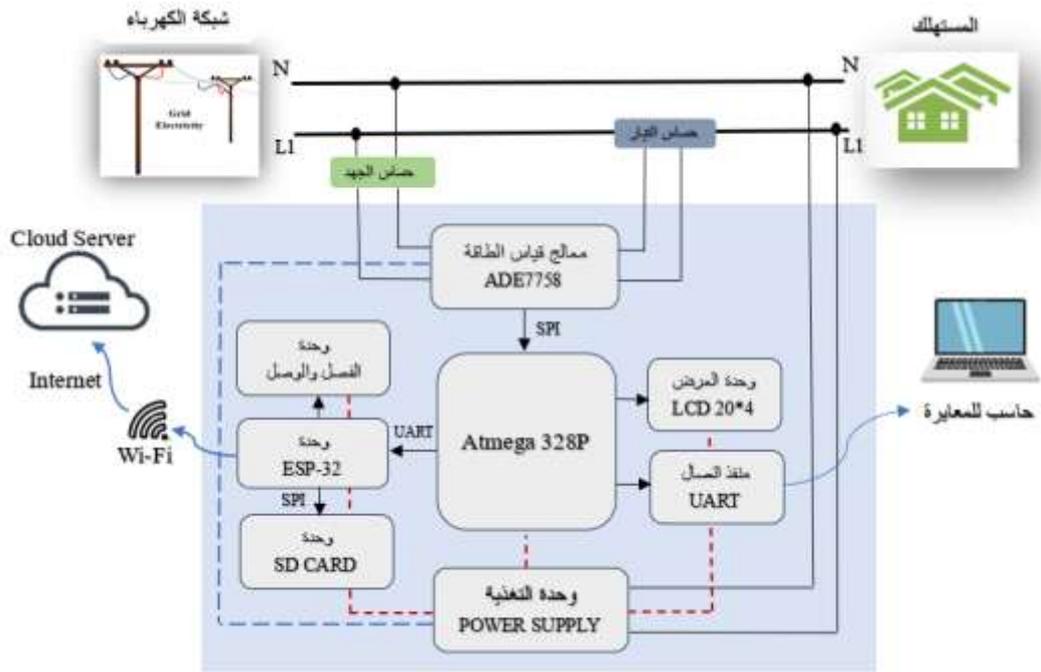


الشكل (1) شبكة كهربائية منزلية أحادية الطور مرتبطة بمنظومة كهروضوئية

2- المخطط العام للعداد الكهربائي:

يوضح الشكل (2) المخطط العام للعداد الكهربائي المصمم، حيث يتكون من وحدة تحكم ممثلة بالمعالج Atmega328p متصل باستخدام بروتوكول الاتصال التسلسلي SPI مع معالج قياس الطاقة ADE7758 المستخدم لقياس الطاقة وتحليل إشارات الحساسات الكهربائية المستخدمة لقياس التيار والجهد، بالإضافة لوجود وحدة ESP32-WROOM-32 من شركة Espressif وهي وحدة تحكم دقيقة توفر خدمات اتصال قوية WI-FI و Bluetooth تستخدم لإرسال بيانات القياس عبر شبكة الانترنت لخوادم سحابية مرتبطة بشركة الكهرباء المشغلة للعداد وتلقي أوامر التشغيل والفصل عن بعد.

تم تجهيز العداد بوحدة قارئ ذاكرة SD Card Reader متصلة مع المعالج Esp-32 لتسجيل قراءات العداد بشكل مجدول مرتبط مع زمن ورود العينة، ليتم إرسالها عبر شبكة الأنترنت عبر وحدة المعالجة ESP-32. العداد مزود بوحدة عرض ممثلة بشاشة LCD 20*4 لعرض بارامترات القياس بشكل لحظي، بالإضافة لوجود وحدة قطع ووصل للتيار الكهربائي، تسمح بفصل ووصل التيار الكهربائي عن بعد وفقاً لأوامر التشغيل القادمة عبر شبكة الإنترنت من الشركة العامة المشغلة للعداد الكهربائي، بالإضافة لوجود وحدة تغذية تؤمن الجهود الكهربائية اللازمة لتشغيل العداد الكهربائي.



الشكل (2) المخطط العام للعداد الكهربائي

1-2 معالج قياس الطاقة ADE7758:

يستخدم معالج قياس الطاقة ADE7758 لقياس التيار والجهد وغيرها من بارامترات الطاقة الكهربائية، يعتبر هذا المعالج دقيق للغاية (خطأ 0.1% في الطاقة الفعالة) عبر نطاق التيار والجهد المحدد، ويدعم معايير IEC 60687 ومعايير IEC الأخرى. يمكن قياس البارامترات الكهربائية في نظام متعدد الأطوار. لاحتوائه على ثلاث محولات تشابهية رقمية مرتبطة مع ثلاثة مداخل لحساسات التيار، بالإضافة لوجود ثلاث محولات تشابهية أخرى مرتبطة مع ثلاث مداخل لحساسات الجهد.

تتألف البنية الداخلية لمعالج قياس الطاقة من مرشحات ومجموعة من المسجلات بأطوال مختلفة (8-Bit, 12-Bit, 16-Bit, 24-Bit)، تستخدم في ضبط ومعايرة قياس بارامترات الطاقة (القيمة الفعالة RMS لموجة الجهد والتيار، وقيمة الطاقة الفعالة والرديئة).

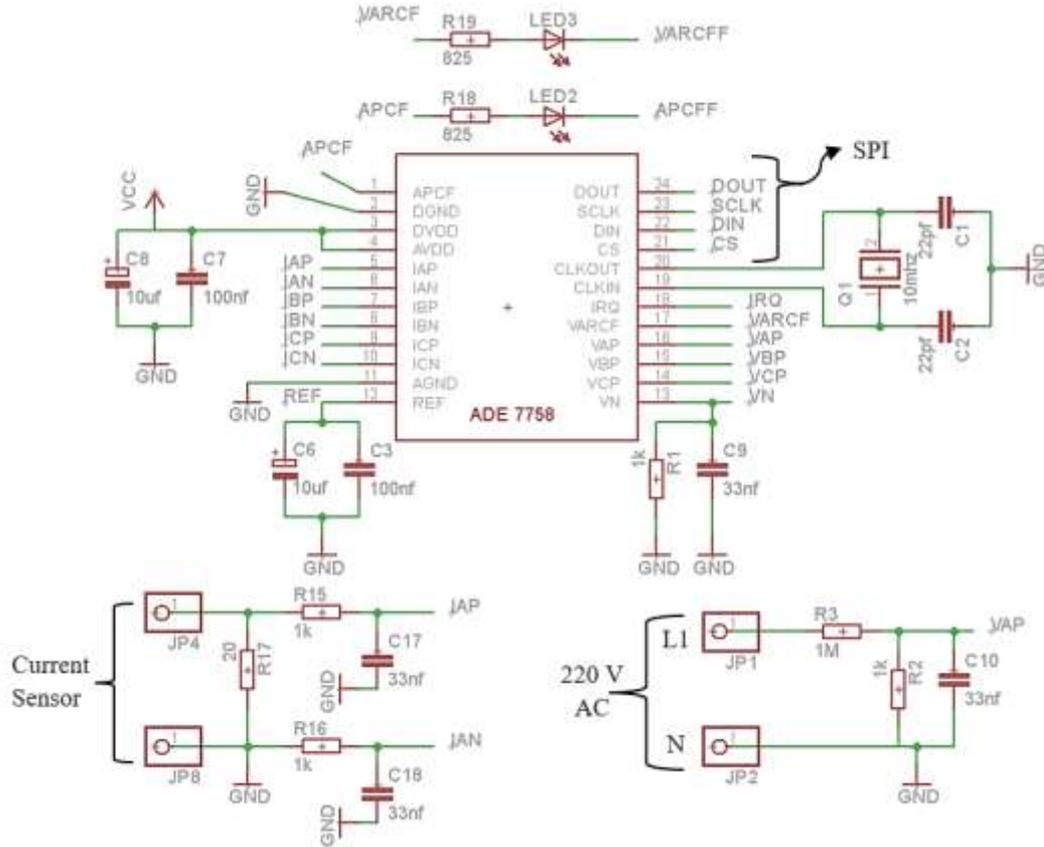
يحتوي المعالج على مخرجين للنضبات متغيرة التردد (مخرج APCF يوفر المعلومات عن الطاقة الفعالة، ومخرج VARCF يوفر المعلومات عن الطاقة الرديئة أو الطاقة الظاهرية حسب الإعداد المضبوط سابقاً).

يتم قراءة البيانات من ADE7758 عبر واجهة تسلسلية SPI تستخدم للاتصال مع المعالج Atmega328p ليقيم بقراءة المسجلات الداخلية لـ ADE7758 والكتابة عليها لضبط الإعدادات الداخلية والمعايرة، بالإضافة لمخرج طلب الانقطاع

(IRQ) هو مخرج منطقي منخفض بتنسيق open-drain. يصبح مخرج IRQ منخفض النشاط عندما يحدث انقطاع واحد أو أكثر في ADE7758. يشير سجل الحالة STATUS إلى طبيعة الانقطاع.

• قياس الطاقة في نمط أحادي الطور

يوضح الشكل (4) مخطط الدارة الإلكترونية لمعالج ADE 7758 لقياس الطاقة في نمط أحادي الطور، حيث تم قياس التيار باستخدام وحدة قياس التيار المرتبطة بالطور A، ويتم قياس الجهد باستخدام وحدة قياس الجهد المرتبطة بالطور .A.



الشكل (4) الدارة الخاصة بمعالج ADE 7758 لقياس الطاقة في نمط أحادي الطور

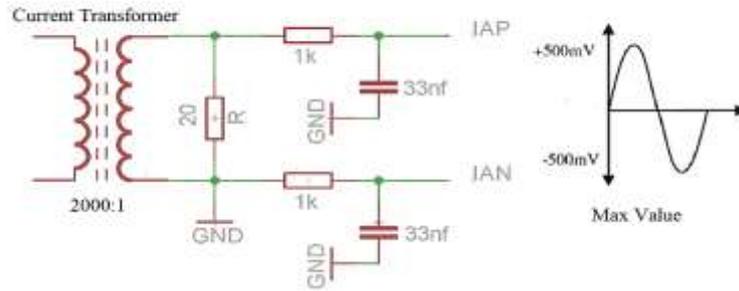
• وحدة قياس التيار

يحتوي ADE7758 على ثلاث قنوات للتيار تتكون من ثلاثة أزواج من المداخل التماثلية للجهد IAP و IAN و IBP و IBN و ICP و ICN. تتميز هذه الأزواج الداخلية التماثلية بإشارة تفاضلية قصوى تبلغ ± 0.5 فولت. في هذا التصميم، استخدمنا محولات تيار بنسبة تحويل 2000:1 بدقة 0.1%. الموضحة بالشكل (5) أقصى تيار يمكن قياسه 40 أمبير، يعطي عندها حساس التيار على خرجه 0.02 أمبير.



الشكل (5): محولة تيار بنسبة تحويل 2000:1

في نمط أحادي الطور تم استخدام قناة التيار A ذات المدخلين التماثلين للجهد IAP و IAN وبإشارة تماثلية ذات جهد أقصى $0.5 \pm$ فولت، كما هو موضح بالشكل (6).



الشكل (6) وحدة قياس التيار لمعالج ADE 7758

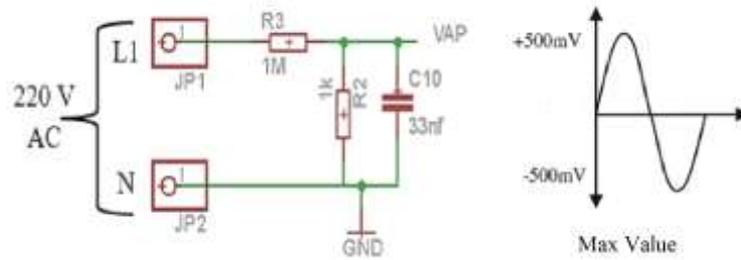
يتم حساب قيمة المقاومة R الموضحة بالشكل (6) لنتناسب مع قيمة التيار الأعظمي المراد قياسه بحيث لا تتجاوز قيمة الإشارة الناتجة على خرج وحدة القياس $0.5 \pm$ فولت [12].

في حالتنا أقصى قيمة للتيار مراد قياسها 35 أمبير، تعطي إشارة تيار على خرج محولة التيار 17.5 ميلي أمبير بمطال أعظمي $17.5 \times \sqrt{2} = 24.7 \text{ mA}$. بما أن أقصى مطال لموجة الجهد 500 mV فإن قيمة المقاومة R تعطي بالعلاقة:

$$R = \frac{500}{24.7} \approx 20 \Omega \quad (1)$$

• وحدة قياس الجهد

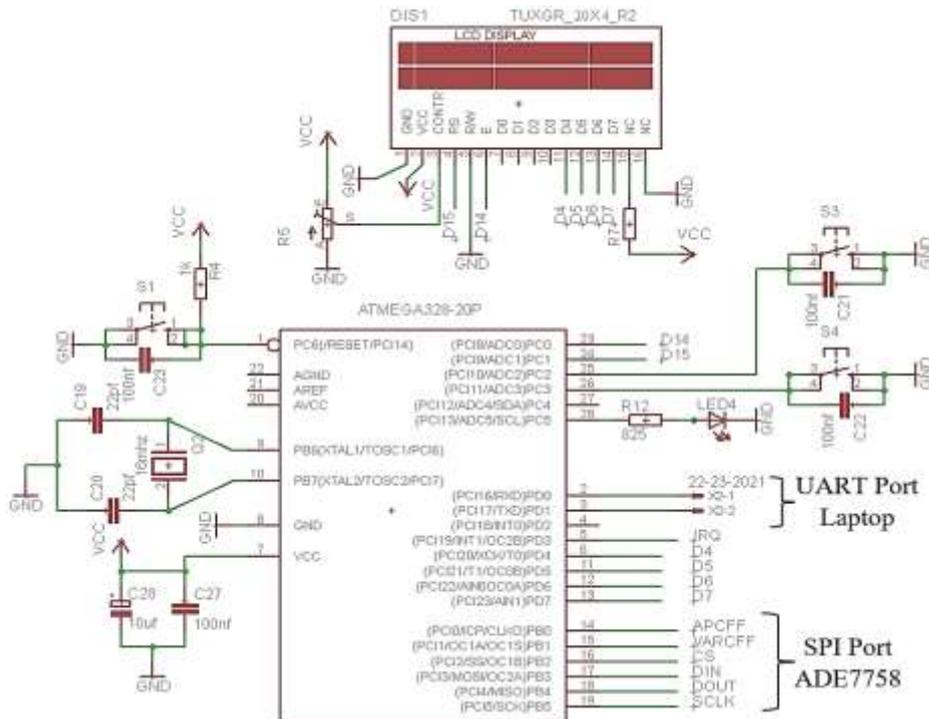
يحتوي ADE7758 على ثلاث مداخل للجهد: VAP و VBP و VCP. تتمتع هذه المداخل بجهد إشارة أقصى يبلغ $0.5 \pm$ فولت بالنسبة لـ VN. نظرًا لأن الجهد الفعال VRMS للطور الواحد يبلغ حوالي 230 فولت، وبالتالي يمكن استخدام دائرة مقسم جهد بسيطة لتقليص إشارة الجهد الواردة إلى القناة لتصبح ضمن الحد الملائم [13]، كما هو موضح بالشكل (7) قيم المقاومتين هما 1 كيلو أوم و 1 ميغا أوم، وعليه فإن نسبة تخفيض إشارة الجهد هي 1:1001 فإذا كانت إشارة الجهد الواردة بقيمة فعالة 220V إي بمطال أعظمي $220 \times \sqrt{2} \approx 311 \text{ V}$ وعليه فإن الإشارة على خرج مقسم الجهد $0.310 \text{ V} = \frac{311}{1001}$ وهي ضمن مجال إشارة جهد الدخل لـ ADE 7758 البالغ $0.5 \pm$ فولت.



الشكل (7): وحدة قياس الجهد لمعالج ADE 7758

2-2 وحدة المعالجة الرئيسية:

تتمثل وحدة المعالجة الرئيسية للعداد الذكي بالمتحكم الدقيق Atmega328P، كما هو موضح بالشكل (8) حيث تتمثل وظيفة المتحكم بإرسال بيانات الضبط والمعايرة لمعالج ADE7758 من خلال نافذة SPI (حيث يتم الكتابة على المسجلات الداخلية لضبط ومعايرة معالج قياس الطاقة ADE7758 بالإضافة لقراءة مسجلاته الداخلية). لتسهيل عملية المعايرة والضبط يتم ربط وحدة المعالجة مع واجهة تحكم على الحاسب باستخدام منفذ UART لتسهيل عملية القراءة والكتابة على المسجل المطلوب. تم تزويد وحدة المعالجة الرئيسية بشاشة عرض LCD 20*4 ببارامترات الطاقة المقاسة وقيمة الاستهلاك المسجلة.

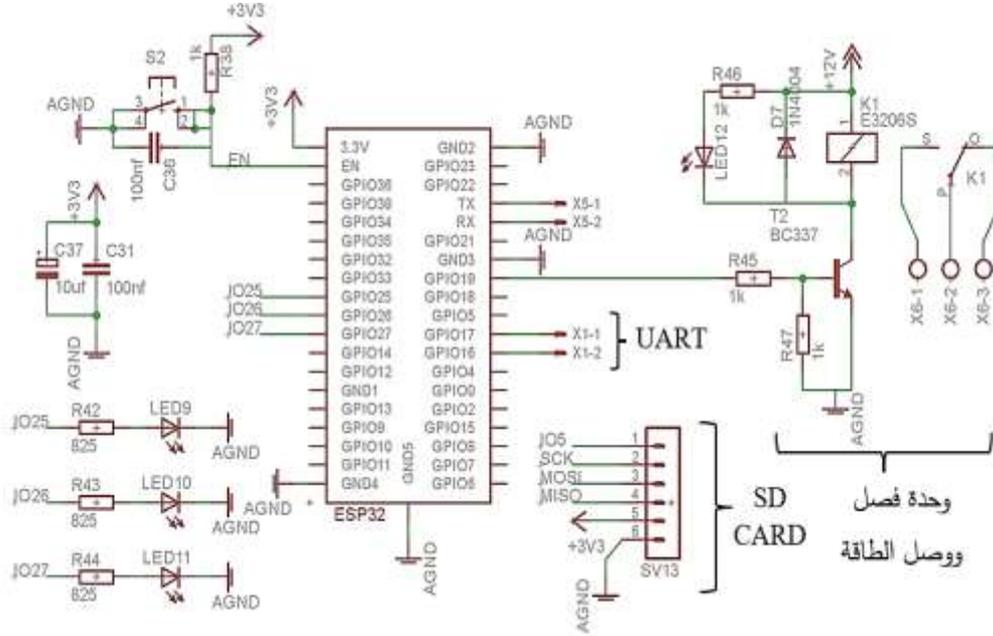


الشكل (8): الدارة الخاصة بوحدة المعالجة الأساسية Atmega 328p

2-3 وحدة إرسال المعطيات عن بعد:

تم تزويد نظام العداد الذكي بوحدة إرسال واستقبال للأوامر عن بعد بالاعتماد على معالج Esp32، كما هو موضح بالشكل (9) حيث يتم إرسال بارامترات الطاقة المقاسة عبر شبكة الإنترنت إلى خوادم سحابية مرتبطة بشركة الكهرباء

المشغلة للعداد بالإضافة إلى تلقي أوامر التشغيل والفصل عن بعد، تم تزويد المعالج بوحدة ذاكرة خارجية SD Card لتخزين البارومتري المراد إرسالها عن بعد بشكل مجدول مع توقيت قياسها، ليتم إرسالها عند توفر اتصال ناجح بشبكة الإنترنت. معالج ESP32 يتحكم بفصل ووصل الطاقة الكهربائية عن المستهلك بناءً على الأوامر الواردة من شركة الكهرباء المشغلة للعداد لأسباب مختلفة متعلقة بتسديد الفواتير أو تطبيق أنظمة تقينين كهربائي.



الشكل (9) الدارة الخاصة بالمتحكم ESP32 لإرسال بيانات الطاقة واستقبال أوامرها التحكم عن بعد

4-2 وحدة التغذية الكهربائية للعداد:

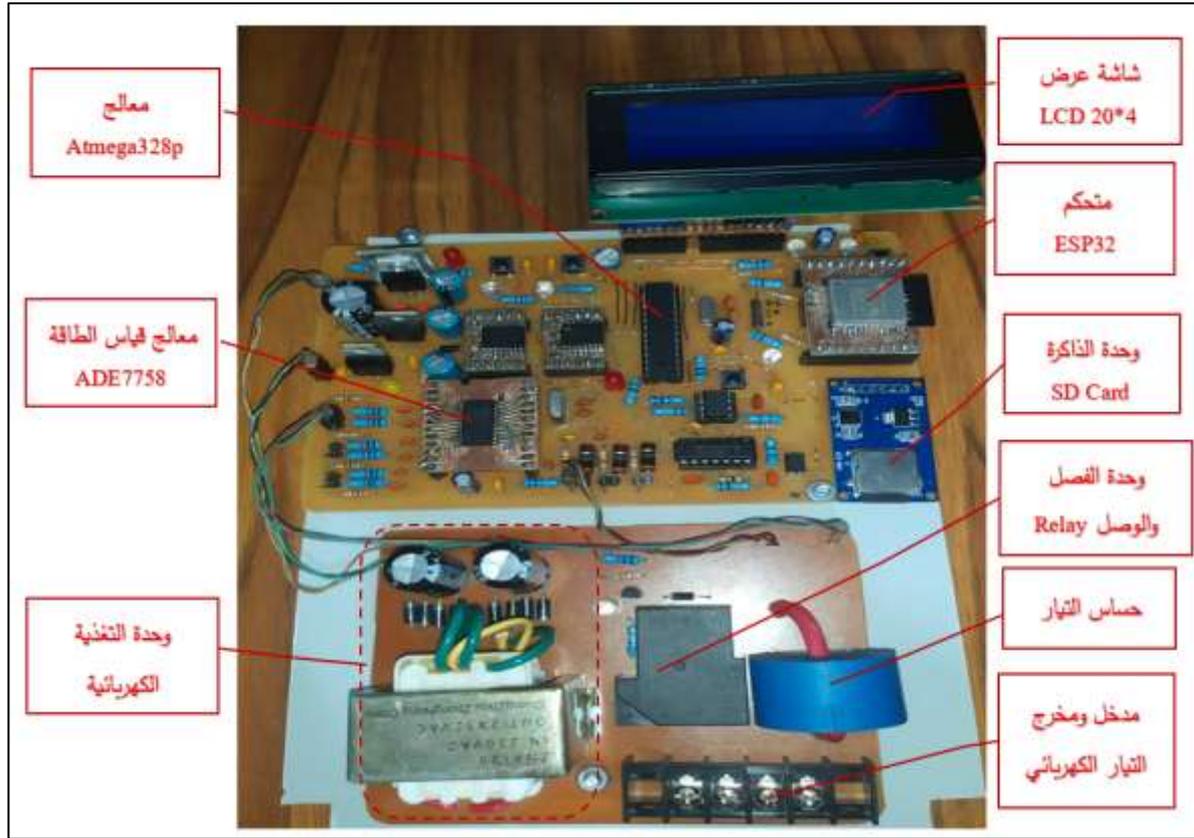
تم تصميم دارة التغذية الكهربائية لتأمين الجهود الكهربائية اللازمة لتشغيل العداد الكهربائي، حيث يتم الحصول على الجهود الكهربائية:

- +5v: لتغذية المتحكم Atmega328p وشاشة العرض LCD.
- +3.3v: لتغذية المتحكم ESP32 و كرت الذاكرة SD CARD.
- +12v: لتشغيل ريلي فصل ووصل الطاقة الكهربائية.
- +5v: لتغذية معالج قياس الطاقة ADE7758 بشكل منعزل عن خط التغذية السابق الخاص بالمتحكم Atmega328p.

3- خوارزميات القياس والمعايرة للعداد الكهربائي المصمم:

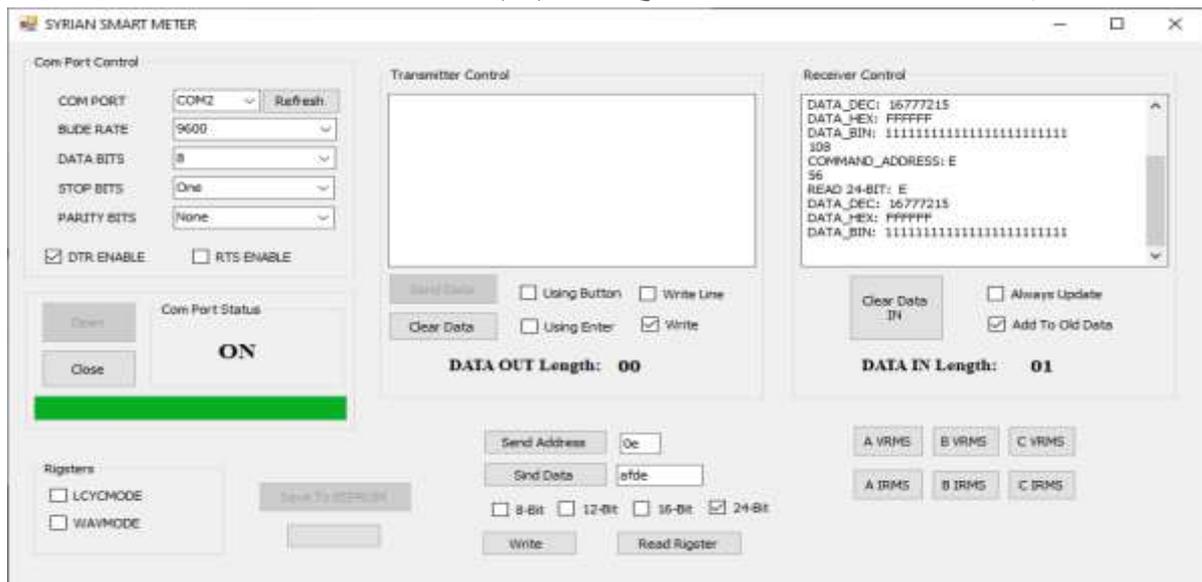
• معايرة العداد الكهربائي:

يوضح الشكل (10) العداد الكهربائي المصمم، تمت عملية المعايرة للعداد الكهربائي من خلال ضبط قيم المسجلات الداخلية لمعالج قياس الطاقة ADE7758 باستخدام بروتوكول الاتصال SPI. عملية إرسال البيانات تتم عبر وحدة المعالجة Atmega328p حيث يتم إرسال البيانات اللازمة ليتم كتابتها على المسجل المطلوب.



الشكل (10) العداد الكهربائي المنفذ

معالج قياس الطاقة ADE7758 يحتوي على مجموعة مختلفة من المسجلات بأطوال مختلفة (8-Bit, 12-Bit, 16-Bit, 24-Bit) ولكل مسجل عنوان خاص به موضح بالصيغة الست عشرية في ورقة البيانات الخاصة بالمعالج ADE7758. لتسهيل عملية المعايرة تم تصميم واجهة حاسوبية باستخدام برنامج Visual Studio تتصل مع وحدة المعالجة باستخدام منفذ الاتصال UART كما هو موضح بالشكل (11).



الشكل (11) واجهة التحكم المصممة لتسهيل عملية المعايرة

لتنفيذ عملية المعايرة واختبار أداء العداد الكهربائي المصمم بالشكل الصحيح نحتاج لاستقرار قيم مختلفة من التيار الكهربائي وتطبيق جهود كهربائية متنوعة، وعليه تم تنفيذ لوحة اختبار بأحمال كهربائية أومية مختلفة القيم متمثلة بمقاومات حرارية كما هو موضح بالشكل (12-a) يمكن من خلالها استقرار التيار الكهربائي المطلوب، بالإضافة لإمكانية ربطها مع مكثف سعوي للحصول على حمل سعوي يستخدم لتطبيق إزاحة طوريه بين موجة التيار وموجة الجهد، وبالتالي يمكن اختبار أداء العداد في قياس قيم الاستطاعة الفعلية والردية. للحصول على جهود كهربائية مختلفة تم استخدام محول كهربائي متغير موضح بالشكل (12-b).



الشكل (12): a- لوحة الاختبار مجهزة بأحمال كهربائية متنوعة. b- محول كهربائي متغير.

1- معايرة القيمة الفعالة RMS للجهد والتيار:

تهدف عملية المعايرة إلى إزالة الانحراف الحاصل على إشارات الدخل وتقليل الضوضاء التي قد تظهر أثناء عملية القياس أو الانحرافات الناتجة عن حساسات التيار والجهد المستخدمة، تم تحقيق ذلك عن طريق تعديل المسجلات الخاصة بالقناة (A) لمعالج ADE7758 (كون العداد المصمم أحادي الطور) وهي:

- AVRMSOS مسجل تصحيح الإزاحة بالقيمة الفعالة لموجة الجهد عنوان المسجل (0x33).
 - AIRMSOS مسجل تصحيح الإزاحة بالقيمة الفعالة لموجة التيار عنوان المسجل (0x36).
- خطوات المعايرة:

1. تفعيل كشف التقاطع الصفري على القناة A عن طريق كتابة القيمة (0x48) في المسجل (0x17) LCYCMODE.
2. تفعيل حدث المقاطعة عند حدوث التقاطع الصفري على الطور A عن طريق كتابة القيمة (0x200) في المسجل (0x18) MASK.
3. إعداد نظام المعايرة للحصول على التيارات والجهود اللازمة لعملية المعايرة.
4. قراءة قيمة مسجلات القيمة الفعالة لموجة الجهد والتيار (AIRMS(0x0A) و AVRMS(0x0D) بعد حصول التقاطع الصفري على الطور A، (يفضل أخذ القيمة المتوسطة لمجموعة N من القراءات).
5. حساب الانحرافات باستخدام المعادلات (1) و (2).

$$AIRMSOS = \frac{1}{16384} \times \frac{(I_{TEST}^2 \times AIRMS_{IMIN}^2) - (I_{MIN}^2 \times AIRMS_{ITEST}^2)}{I_{MIN}^2 - I_{TEST}^2} \quad (2)$$

$$AVRMSOS = \frac{1}{64} \times \frac{V_{NOM} \times AVRMS_{VMIN} - V_{MIN} \times AVRMS_{VNOM}}{V_{MIN} - V_{NOM}} \quad (3)$$

تمت عملية المعايرة عند تيارات $I_{TEST} = 10 \text{ A}$ ، $I_{MIN} = 250 \text{ mA}$ ، $V_{NOM} = 220 \text{ v}$ ، $V_{MIN} = 25 \text{ v}$. عند استرجار تيار $I_{TEST} = 10 \text{ A}$ تمت قراءة القيمة الفعالة المسجلة في المسجل $AIRMS(0x0A)$ بعد حدوث التقاطع الصفري وتكرار العملية لأخذ عشر عينات ثم أخذ المتوسط الحسابي فكانت القيمة المسجلة $AIRMS_{ITEST} = 150255.5$ ، ويتكرر ذات العملية عند $I_{MIN} = 250 \text{ mA}$ فكانت القيمة المسجلة $AIRMS_{IMIN} = 3988.5$ ، بتطبيق المعادلة (1):

$$AIRMSOS = \frac{1}{16384} \times \frac{(10^2 \times 3988.5^2) - (0.250^2 \times 150255.5^2)}{0.25^2 - 10^2} = -109.7 \approx -110 = 0xF92 \quad (4)$$

عند تطبيق جهد $V_{NOM} = 220 \text{ v}$ تمت قراءة القيمة الفعالة المسجلة في المسجل $AVRMS(0x0D)$ بعد حدوث التقاطع الصفري وتكرار العملية لأخذ عشر عينات ثم أخذ المتوسط الحسابي فكانت القيمة المسجلة $AVRMS_{VNOM} = 754580.7$ ، ويتكرر ذات العملية عند $V_{MIN} = 25 \text{ v}$ فكانت القيمة المسجلة $AVRMS_{VMIN} = 87543.4$ ، بتطبيق المعادلة (2):

$$AVRMSOS = \frac{1}{64} \times \frac{220 \times 87543.4 - 25 \times 754580.7}{25 - 220} = -31.6 \approx -32 = 0xFE0 \quad (5)$$

2- معايرة قيم القدرة المقاسة:

تستخدم هذه المعايرة بشكل أساسي لضبط قياسات القدرة الفعلية والردية والظاهرية للطور A. تم ذلك من خلال ضبط قيم المسجلات $AWG(0x2A)$ ، $AVARG(0x2D)$ و $AVAG(0x30)$ ، والتي يمكن استخدامها لزيادة أو تقليل قيمة القراءة. ولحساب هذه القيم، تم اتخاذ الخطوات التالية:

- 1- مسح قيم السجلات AWG و $AVARG$ و $AVAG$.
- 2- اختيار الطور A ليصبح مرجع قياس دور موجة الجهد الواردة من خلال كتابة القيمة $(0xFC)$ في المسجل $MMODE(0x14)$.
- 3- ضبط معالج $ADE7758$ ليعمل في نمط تراكم الخط $(Line Accumulation)$ من خلال كتابة القيمة $(0xBF)$ في المسجل $LCYCMODE(0x17)$.
- 4- تعيين عدد أنصاف دورات موجة الجهد الواردة لتراكم الخط وكتابته في المسجل $LINECYC(0x1C)$ (في حالتنا تم اعتبار عدد أنصاف موجة الجهد 20 وعليه فإنه يتم كتابة القيمة $(0x14)$ في المسجل $LINECYC$).
- 5- تفعيل حدث مقاطعة نهاية تراكم دورة الخط من خلال كتابة القيمة $(0x1000)$ في المسجل $MASK(0x18)$.
- 6- إعداد نظام المعايرة للحصول على التيارات والجهود اللازمة لعملية المعايرة، يجب العمل مع تيار اختبار وجهد معياري بمعامل قدرة يساوي الواحد.
- 7- إعادة ضبط سجل حالة الانقطاع عن طريق قراءة مسجل $RSTATUS(0x1A)$.
- 8- قراءة سجلات الطاقة $AWATTHR(0x01)$ و $AVAHR(0x07)$ بعد ورود حدث مقاطعة نهاية تجميع الخط وتخزين القيم:

- يتم حساب القيم التي سيتم كتابتها في مسجل AWG(0x2A) وفقاً للمعادلة التالية:

$$AWG = \left(\frac{AWATTHR_{EXPECTED}}{AWATTHR_{MEASURED}} - 1 \right) \times 2^{12} \quad (6)$$

قبل الحصول على AWG، يجب تحديد القيمة المتوقع تسجيلها في مسجل الطاقة الفعلية:

$$AWATTHR_{EXPECTED} = \frac{4 \times 3200 \times I_{TEST} \times V_{NOM} \times \cos(\theta) \times AccumTime \times APCFDEN}{1000 \times 3600} \quad (7)$$

حيث تمثل θ زاوية الطور بين الجهد والتيار، ويمثل AccumTime إجمالي وقت تراكم الطاقة داخل ADE7758 وفقاً لعدد الدورات النصفية للخط المحددة. يمكن تحديد AccumTime كما يلي:

$$AccumTime = \frac{\text{No. of hal } f \text{ cycles}}{2 \times \text{line frequency}} = \frac{20}{2 \times 50} = 0.2 \text{ sec} \quad (8)$$

لحساب قيمة المسجل APCFDEN(0x46):

$$APCFDEN = INT \left(\frac{16000 \times \frac{V_{NOM}}{V_{MAX}} \times \frac{I_{TEST}}{I_{MAX}}}{\frac{3200 \times I_{TEST} \times V_{NOM}}{1000 \times 3600} \times \cos(\theta)} \right) \quad (9)$$

- يتم حساب القيم التي سيتم كتابتها في مسجل AVAG(0x30) وفقاً للمعادلة التالية:

$$AVAG = \left(\frac{AVAHR_{EXPECTED}}{AVAHR_{MEASURED}} - 1 \right) \times 2^{12} \quad (10)$$

AVAHRR_{EXPECTED} هو نفسه كما في AWATTHR_{EXPECTED} عندما يتم استخدام عامل قدرة يساوي الواحد في نظام المعايرة.

9- كتابة نتائج الحسابات السابقة في المسجلات AWG(0x2A) و AVAG(0x30).

10- إعداد نظام المعايرة للحصول على التيارات والجهود اللازمة لعملية معايرة الطاقة الرديية، بحيث يتم التعامل مع تيار اختبار وجه اسمي بمعامل قدرة 0.5.

11- إعادة ضبط سجل حالة الانقطاع عن طريق قراءة مسجل RSTATUS (0x1A).

12- قراءة مسجل الطاقة الرديية AVARHR(0x04) بعد ورود حدث مقاطعة نهاية تجميع الخط وتخزين القيم:

- يتم حساب القيم التي سيتم كتابتها في مسجل AVARG(0x2D) وفقاً للمعادلة التالية:

$$AVARG = \left(\frac{AVARHR_{EXPECTED}}{AVARHR_{MEASURED}} - 1 \right) \times 2^{12} \quad (11)$$

لحساب قيمة AVARHR_{EXPECTED} تطبيق المعادلة التالية:

$$AVARHR_{EXPECTED} = \frac{4 \times 3200 \times I_{TEST} \times V_{NOM} \times \sin(\theta) \times AccumTime \times VARCFDEN}{1000 \times 3600} \quad (12)$$

حيث أن VARCFDEN تساوي:

$$VARCFDEN = INT \left(\frac{16000 \times \frac{V_{NOM}}{V_{MAX}} \times \frac{I_{TEST}}{I_{MAX}}}{\frac{3200 \times I_{TEST} \times V_{NOM}}{1000 \times 3600} \times \sin(\theta)} \right) \quad (13)$$

13- كتابة نتائج الحسابات السابقة في المسجل (AVARG(0x2D).

وفقاً للعداد الكهربائي المصمم لمعايرة مسجلات قياس الطاقة الفعلية والظاهرية، تم تجهيز لوحة الاختبار الخاصة بنظام المعايرة بمقاومة حرارية 22Ω لاسترجار تيار كهربائي $I_{TEST} = 10A$ عند تطبيق جهد معياري $V_{NOM} = 220V$ وذلك بفرق صفحة $(\theta = 0)$ ، أي طبيعة حمل أومي فقط.

أعظم قيمة للجهد يمكن قياسها وفقاً لوحدة قياس الجهد في العداد المصمم كانت $V_{MAX} = 353V$ ، وكذلك أعظم قيمة للتيار يمكن للعداد قياسها وفقاً لوحدة قياس التيار $I_{MAX} = 35A$.

مما سبق نجد أن: $APCFDEN = 1453$ ، القيم المتوقع قراءتها من قبل العداد:

$AWATTHR_{EXPECTED} = AVAHR_{EXPECTED} = 2273$ ، عند قراءة القيم المسجلة من قبل العداد بعد ورود حدث مقاطعة نهاية تجميع الخط كانت كما يلي:

$$AWATTHR_{MEASURED} = AWATTHR(0x01) = 2364$$

$$AVAHR_{MEASURED} = AVAHR(0x07) = 2340$$

وعليه مما سبق نجد أن القيم الواجب كتابتها في المسجلات:

$$AWG(0x2A) = -157 = 0xF63$$

$$AVAG(0x30) = -117 = 0xF8B$$

لمعايرة مسجل قياس الطاقة الردية، نعيد تجهيز لوحة الاختبار الخاصة بنظام المعايرة لاسترجار تيار كهربائي من خلال ربط مقاومة حرارية 46Ω مع مكثف سعوي $80 \mu F$ على التسلسل للحصول على حمل سعوي، قيمة التيار الكهربائي المسترجع $I_{TEST} = 2.38A$ ، عند تطبيق جهد معياري $V_{NOM} = 220V$ ، وبفرق صفحة $(\theta = 60.1^\circ)$.

مما سبق نجد أن: $VARCFDEN = 1680$ ، القيم المتوقع قراءتها من قبل العداد:

$AVARHR_{EXPECTED} = 542$ ، عند قراءة القيمة المسجلة من قبل العداد بعد ورود حدث مقاطعة نهاية تجميع الخط كانت كما يلي:

$$AVARHR_{MEASURED} = AVARHR(0x04) = 568$$

وعليه مما سبق نجد أن القيم الواجب كتابتها في المسجل:

$$AVARG(0x2D) = -187 = 0xF45$$

3- معايرة القياس الطوري

يتضمن معالج قياس الطاقة ADE7758 سجلاً للمعايرة الطورية لقنوات التيار، يدعى المسجل الخاص بالقناة (A) بـ APHCAL(0x3F) لتعويض الأخطاء الطورية الصغيرة التي تسببها في الغالب محولات التيار. تتم المعايرة الطورية بإضافة تأخير زمني يمكن أن يكون في الاتجاه الإيجابي أو السلبي. لحساب درجة التحول الطوري للإشارة والقيمة التي يجب كتابتها في سجل APHCAL، تم اتباع الخطوات التالية:

- 1- تكرار الخطوات السابقة من عملية معايرة القدرة 1 و 2 و 3 و 4 و 5 لتحديد الطور المطلوب للمعايرة، وتعيين وضع تجميع الخط، وتحديد عدد أنصاف الدورات في نمط تجميع الخط، وتفعيل حدث مقاطعة نهاية تراكم الخط.
- 2- إعداد نظام المعايرة. تتطلب هذه المعايرة قياسين للطاقة الفعالة، أحدهما بجهد محدد وتيار اختبري بمعامل قدرة واحد، والآخر بمعامل قدرة 0.5.
- 3- إعادة ضبط سجل حالة الانقطاع عن طريق قراءة مسجل RSTATUS (0x1A).

- 4- قراءة مسجل الطاقة الفعالة (AWATTHR(0x01) بعد انقطاع تجميع الخط وتسجيل القيم.
 5- تكرار الخطوات 2 و 3 و 4 ولكن باستخدام معامل القدرة 0.5 في نظام المعايرة.
 6- حساب خطأ المرحلة بالدرجات باستخدام المعادلة:

$$\text{phaseError} (^\circ) = \text{Arcsin} \left(\frac{\text{digitalError}}{\sqrt{3}} \right) \quad (14)$$

لتحديد الخطأ الطوري بالدرجة، في البداية نقوم بحساب الخطأ الطوري الرقمي كما يلي:

$$\text{digitalError} = \frac{\frac{AWATTHR_{pf=0.5}}{2} - \frac{AWATTHR_{pf=1}}{2}}{\frac{AWATTHR_{pf=1}}{2}} \quad (15)$$

- 7- تحديد القيمة المطلوب لكتابتها في مسجل APHCAL(0x3F) باستخدام المعادلة التالية:

$$APHCAL = \text{phaseError} (^\circ) \times \frac{9.6\mu\text{s}}{\text{Ph/Lsb/W}} \times \frac{1}{360} \times \frac{\text{line frequency} \times 9.6\mu\text{s}}{360} \quad (16)$$

حيث أن:

$$\text{PH / Lsb / W} = \begin{cases} 1.2\mu\text{s} & \text{digitalError} < 0 \\ 2.4\mu\text{s} & \text{digitalError} > 0 \end{cases}$$

وفقاً للعداد الكهربائي المصمم، لعمل معايرة طوريه نحتاج لتعديل لوحة الاختبار في المرة الأولى بحيث يتم استجرار التيار 2.38A عند تطبيق جهد معياري بمقدار 220v ، ويرفق صفحة (0°)، حيث يتم استخدام مقاومة حرارية بمقدار (92.4Ω) ، في المرة الثانية استجرار تيار 2.38A عند تطبيق جهد معياري بمقدار 220v ، ويرفق صفحة (60°) خلال ربط مقاومة حرارية Ω 46 مع مكثف سعوي 80 μF على التسلسل. وقراءة قيمة المسجل AWATTHR(0x01) في كلتا الحالتين:

في الحالة الأولى عند معامل استطاعة Pf=1 كانت قيمة المسجل $AWATTHR_{pf=1} = 541$

في الحالة الثانية عند معامل استطاعة Pf=0.5 كانت قيمة المسجل $AWATTHR_{pf=0.5} = 284$

وبالتالي فإن قيمة الخطأ الرقمي $\text{digitalError} = 0.049$ وعليه فإن قيمة الخطأ بالدرجات $\text{phaseError} (^\circ) = 1.62^\circ$

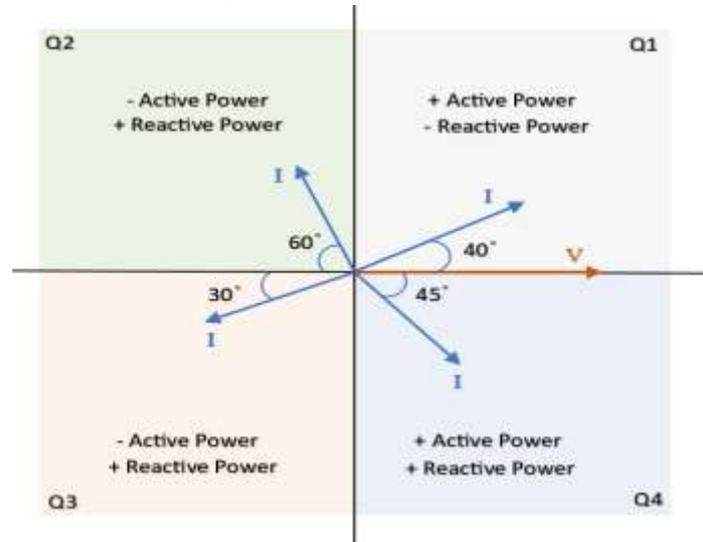
مما سبق يمكننا حساب القيمة الواجب كتابتها في المسجل APHCAL لإلغاء الخطأ الطوري وهي:

$$APHCAL(0x3F) = 37 = 0x25$$

• تحديد اتجاه تدفق القدرة:

يحتوي معالج ADE7758 على مسجلات خاصة لتحديد قطبية الطاقة الكهربائية المتدفقة، حيث يمكن باستخدام وحدة المعالجة الرئيسية Atmega328P تحديد اتجاه تدفق الطاقة، وبالتالي قياس الطاقة الفعالة الواردة والصادرة، والطاقة الرديئة الواردة والصادرة بشكل منفصل، وتخزينها وعرضها. يوضح الشكل (13) تغير قطبية الطاقة الرديئة والفعالة تبعاً لتغير زاوية فرق الصفحة بين الجهد والتيار، حيث يكون قياس الطاقة الفعالة إيجابياً عندما يكون زاوية الطور بين الجهد والتيار بين 0° و 90° (الربع الأول) وبين 270° و 360° (الربع الرابع). في الربع الأول والربع الرابع، يتم توصيل الطاقة الفعالة من المنبع إلى المستهلك. تكون الطاقة الفعالة سالبة عندما تكون

زاوية المرحلة بين الجهد والتيار بين 90° درجة و 180° درجة (الربع الثاني) وبين 180° درجة و 270° درجة (الربع الثالث). في الربع الثاني والربع الثالث، يتم إرجاع الطاقة الفعالة إلى المنبع من المستهلك [13].



الشكل (13) تغير قطبية الطاقة الفعالة والردية تبعاً لتغير زاوية فرق الصفحة بين الجهد والتيار

يكون قياس الطاقة الردية إيجابياً عندما تكون زاوية الطور بين الجهد والتيار بين 180° درجة و 270° درجة (الربع الثالث) وبين 270° درجة و 360° درجة (الربع الرابع). يتم توصيل الطاقة الردية للمستهلك في الربع الثالث والربع الرابع. عندما يكون زاوية الطور بين الجهد والتيار بين 0° درجة و 90° درجة (الربع الأول) وبين 90° درجة و 180° درجة (الربع الثاني)، يكون قياس الطاقة الراكدة سلبياً. في الربع الأول والثاني، يتم إرجاع الطاقة الردية إلى المصدر من المستهلك.

لضبط عملية الكشف عن اتجاه تدفق القدرة نتبع الخوات التالية:

- 1- اختيار الطور (A) ليصبح المرجع في تحديد اتجاه تدفق القدرة، من خلال كتابة القيمة $0x04$ في المسجل `COMPmode(0x16)`.
 - 2- تفعيل حدث مقاطعة تغير قطبية الطاقة الفعالة من خلال تفعيل البت المخصص لذلك (`REVPAP`) في مسجل قناع المقاطعة (`INTERRUPT MASK (0x18)`).
 - 3- تفعيل حدث مقاطعة تغير قطبية الطاقة الردية من خلال تفعيل البت المخصص لذلك (`REVPRP`) في مسجل قناع المقاطعة (`INTERRUPT MASK (0x18)`).
- عند حدوث تغير في اتجاه تدفق الطاقة، يؤدي ذلك إلى إرسال إشارة تفعيل على القطب (`IRQ`) المتصل بوحدة المعالجة الرئيسية `Atmega328P`، التي بدورها تقوم بقراءة المسجل `INTERRUPT STATUS(0x19)` لتحديد نوع المقاطعة الواردة، فإذا كان البت (`REVPAP`) مفعل فهذا يدل على أن اتجاه تدفق القدرة الفعلية يكون بالاتجاه العكسي، أما إذا كان البت (`REVPRP`) مفعل فهذا يدل على أن اتجاه تدفق القدرة الردية يكون بالاتجاه العكسي. بالتالي أصبح بالإمكان تسجيل قيمة الطاقة المستجرة من الشبكة والطاقة المقدمة للشبكة العامة كلاً منها على حدى بالاعتماد على إشارة تحديد اتجاه تدفق الطاقة.

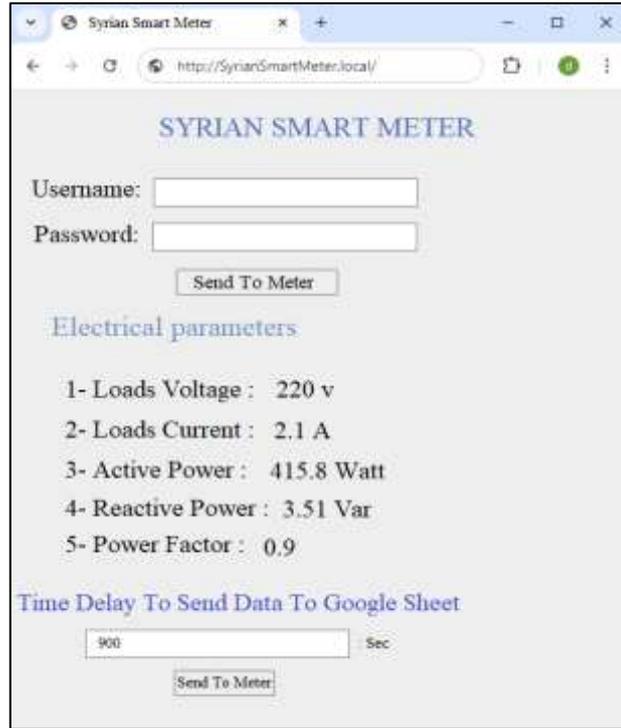
• إرسال واستقبال البيانات عن بعد:

يتميز العداد الكهربائي المصمم بالقدرة على إرسال واستقبال المعطيات عن بعد باستخدام شبكة الإنترنت، يعود الفضل بذلك إلى وحدة ESP32، حيث تقوم هذه الوحدة باستقبال بيانات القياس من وحدة المعالجة الرئيسية Atmega328P عبر منفذ UART، لتقوم بعدها وحدة ESP32 بتخزين هذه المعطيات في الذاكرة SD Card، ليتم إرسالها لاحقاً عبر شبكة الإنترنت وتخزين سحابياً بشكل مجدول مع تاريخ أخذ العينة ضمن صفحة Google Sheet كما هو موضح بالشكل (14).

SMART METER DATA LOGGER								SMART METER RELAY ON/OFF			
Date	Time	Reading Status	Voltage (volt)	Current (Amp)	Active Power	Reactive Power	cos(φ)	Date	Time	Status	Switch 1
07/06/2024	23:47:49	Success	225	0.6	99	47.3	0.9	07/06/2024	23:47:49	Success	ON
09/06/2024	1:53:29	Success	215	5	1021.25	333.25	0.95	09/06/2024	1:53:29	Success	ON
09/06/2024	1:53:48	Success	214	5	1016.5	331.7	0.95	09/06/2024	1:53:48	Success	ON
09/06/2024	1:54:17	Success	213	4.9	991.51	323.54	0.95	09/06/2024	1:54:17	Success	ON
09/06/2024	1:56:07	Success	214	4.8	965.66	349.24	0.94	09/06/2024	1:56:07	Success	ON
09/06/2024	2:58:44	Success	220	2.1	323.4	328	0.7	09/06/2024	2:58:44	Success	ON
09/06/2024	2:59:20	Success	221	2	304.98	318.24	0.89	09/06/2024	2:59:20	Success	ON
09/06/2024	3:01:38	Success	210	1	178.5	109	0.85	09/06/2024	3:01:38	Success	ON
09/06/2024	3:03:58	Success	217	1.8	330.1	203.1	0.85	09/06/2024	3:03:58	Success	ON
09/06/2024	3:04:33	Success	215	1.8	328.95	201.24	0.85	09/06/2024	3:04:33	Success	ON
09/06/2024	17:44:56	Success	220	0.7	152.46	21.56	0.99	09/06/2024	17:44:56	Success	ON
09/06/2024	17:45:17	Success	222	0.8	175.82	24.86	0.99	09/06/2024	17:45:17	Success	ON
09/06/2024	17:45:35	Success	216	0.8	169.34	34.21	0.98	09/06/2024	17:45:35	Success	ON
09/06/2024	17:45:56	Success	213	1	208.74	42.174	0.98	09/06/2024	17:45:56	Success	ON
09/06/2024	17:46:40	Success	0	0	0	0	0	09/06/2024	17:46:40	Success	OFF
09/06/2024	17:47:01	Success	0	0	0	0	0	09/06/2024	17:47:01	Success	OFF
09/06/2024	17:47:28	Success	0	0	0	0	0	09/06/2024	17:47:28	Success	OFF

الشكل (14): صفحة Google Sheet لتخزين بيانات القياس

لضبط إعدادات الاتصال تم بناء نظام برمجي Webserver يسمح لوحدة Esp32 باستضافة وعرض صفحات ويب للعملاء عبر شبكة Wi-Fi محلية، حيث تم تصميم صفحة ويب تسمح بإدخال إعدادات شبكة Wi-Fi من اسم المستخدم وكلمة المرور لتحقيق الاتصال بشبكة الإنترنت، بالإضافة لعرض بارامترات القياس بشكل لحظي وتحديد الفاصل الزمني لكل عملية إرسال بيانات لصفحة Google Sheet كما هو موضح بالشكل (15).



الشكل (15): صفحة Webserver للعداد الكهربائي المصمم

4- اختبار أداء العداد:

لاختبار أداء العداد الكهربائي المصمم، تم استخدام لوحة الاختبار المكونة من مجموعة من المقاومات الحرارية التي يمكن ربطها مع مكثف سعوي بسعات مختلفة ومقارنة نتائج قياس العداد الكهربائي مع جهاز محلل الاستطاعة Power Analyzer الموضح بالشكل (16) لتحديد دقة العداد الكهربائي المصمم.



الشكل (16) جهاز محلل الاستطاعة Quali star C.A 8332

• اختبار قياس القيمة الفعالة للتيار

باستخدام لوحة الاختبار تم استرجار مجموعة مختلفة من التيارات بمعامل استطاعة ($PF=1$) إي تم استخدام المقومات الحرارية كحمل فقط، بمقارنة القيم المقاسة بالعداد المصمم مع القيم المسجلة بجهاز محلل الاستطاعة، تم تحديد نسبة

الخطأ عند كل قراءة كما هو موضح بالجدول (1). فكانت قيمة المتوسط الحسابي للخطأ عند قياس القيمة الفعالة للتيار تساوي 0.1772 %.

الجدول (1): نسبة الخطأ في قراءة القيمة الفعالة للتيار للعداد الكهربائي المصمم مقارنة بجهاز محلل الاستطاعة

جهاز محلل الاستطاعة	العداد الكهربائي المصمم	نسبة الخطأ (%)
10.031	10.036	0.0498
8.06	8.058	0.0248
6.532	6.529	0.0459
4.028	4.025	0.0745
2.582	2.58	0.0775
1.553	1.55	0.1932
0.516	0.512	0.7752
المتوسط الحسابي لنسبة الخطأ		0.1772

• اختبار قياس القيمة الفعالة للجهد

باستخدام لوحة الاختبار (المحول الكهربائي المتغير) تم تطبيق مجموعة مختلفة من الجهود على دخل العداد الكهربائي المصمم، بمقارنة القيم المقاسة بالعداد المصمم مع القيم المسجلة بجهاز محلل الاستطاعة، تم تحديد نسبة الخطأ عند كل قراءة كما هو موضح بالجدول (2). وكانت قيمة المتوسط الحسابي للخطأ عند قياس القيمة الفعالة للجهد تساوي 0.184 %.

الجدول (2): نسبة الخطأ في قراءة القيمة الفعالة للجهد للعداد الكهربائي المصمم مقارنة بجهاز محلل الاستطاعة

جهاز محلل الاستطاعة	العداد الكهربائي المصمم	نسبة الخطأ (%)
220.156	220.145	0.004
205.560	205.551	0.0043
175.982	175.958	0.013
140.78	140.771	0.0063
115.42	115.461	0.0355
90.01	89.874	0.1511
55.15	54.82	0.5984
20.16	20.026	0.6647
المتوسط الحسابي لنسبة الخطأ		0.184

• اختبار قياس قيمة معامل الاستطاعة

باستخدام لوحة الاختبار تم تطبيق مجموعة مختلفة من الأحمال السعوية (مقاومات حرارية متصلة مع مكثفات سعوية) على خرج العداد الكهربائي المصمم للحصول على زوايا إزاحة طورية متنوعة، ثم قياس قيمة معامل الاستطاعة بالعداد المصمم ومقارنتها مع القيم المسجلة بجهاز محلل الاستطاعة، تم تحديد نسبة الخطأ عند كل قراءة كما هو موضح بالجدول (3). وكانت قيمة المتوسط الحسابي للخطأ عند قياس قيمة معامل الاستطاعة تساوي 0.909 %.

الجدول (3): نسبة الخطأ في قراءة قيمة معامل الاستطاعة للعداد الكهربائي المصمم مقارنة بجهاز محلل الاستطاعة

جهاز محلل الاستطاعة	العداد الكهربائي المصمم	نسبة الخطأ (%)
0.9512	0.95	0.1262
0.8508	0.848	0.3291
0.7024	0.697	0.7688
0.6028	0.598	0.7963
0.5037	0.5	0.7346
0.3511	0.346	1.4526
0.2486	0.245	1.4481
0.1667	0.164	1.6197
المتوسط الحسابي لنسبة الخطأ		0.909

• اختبار قياس قيمة الاستطاعة الفعلية والردية

بذات الطريقة السابقة وعند تطبيق مجموعة مختلفة من الأحمال على خرج العداد الكهربائي المصمم تم قياس قيمة الاستطاعة الفعلية والردية ومقارنتها مع القيم المقاسة باستخدام جهاز محلل الاستطاعة، فكانت قيمة المتوسط الحسابي للخطأ عند قياس قيمة الاستطاعة الفعلية تساوي 0.349 %، وكذلك كانت قيمة المتوسط الحسابي للخطأ عند قياس قيمة الاستطاعة الردية تساوي 0.278 %.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- تم في هذا البحث تصميم وتنفيذ عداد كهربائي ذكي أحادي الطور ومعياريته واختبار أداءه، بحيث كان قادراً على:
 - قياس بارامترات الطاقة الكهربائية من قيمة فعالة للتيار والجهد وقيمة الاستطاعة الفعلية والردية بالإضافة لمعامل الاستطاعة.
 - تحديد اتجاه تدفق القدرة الكهربائية وقياس بارامترات الطاقة في كلا الاتجاهين.
 - إرسال بيانات الطاقة الكهربائية المقاسة بشكل مجدول عن بعد عبر شبكة الانترنت إلى خوادم سحابية Google Sheet، واستقبال أوامر الفصل والوصل للطاقة الكهربائية.
 - تحقيق دقة عالية في قياس بارامترات الطاقة، حيث تمكن العداد من توفير قراءات صحيحة بمعدل خطأ نسبي يقل عن 1% في جميع البارامترات الكهربائية المقاسة مقارنة بالجهاز المرجعي المستخدم (Power Analyzer)، حيث بلغت قيمة المتوسط الحسابي للخطأ النسبي في قياس القيمة الفعالة للتيار والجهد (0.1772 % - 0.184 %) على التوالي، في حين بلغت قيمة المتوسط الحسابي للخطأ النسبي في قياس الاستطاعة الفعلية والردية (0.278 % - 0.349 %) على التوالي، وبلغت قيمة الخطأ النسبي في حساب معامل الاستطاعة 0.909 %.

التوصيات:

تطوير نظام إدارة للطاقة الكهربائية مدمج مع نظام العداد الذكي بحيث يمكن التحكم بالأحمال الكهربائية على خرج العداد لإدارة الاستهلاك اليومي للطاقة بما ينعكس إيجاباً على المستهلك.

References:

- [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] 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
- [8] Balwani, Mayurkumar Rajkumar, et al. "Development of a smart meter for power quality-based tariff implementation in a smart grid." *Energies* 14.19 (2021).
- [9] Orlando, Matteo, et al. "A smart meter infrastructure for smart grid IoT applications." *IEEE Internet of Things Journal* 9.14 (2021).
- [10] 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).
- [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.

