



تصميم وتنفيذ خوارزميات الحماية المسافية الرقمية لخطوط النقل الهوائية باستخدام متحكم أردوينو

عبدالله حسين^{1*}، خالد أبو جلاله²

¹ قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية، كلية الهندسة، مصراتة، ليبيا، a.hussein@eng.misuratau.edu.ly

² قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية، كلية الهندسة، مصراتة، ليبيا، Kh.abojlala@eng.misuratau.edu.ly

* المؤلف المراسل

| المخلص | تاريخ الورقة |
|--|--|
| تمثل شبكات النقل والتوزيع الجزء الأكبر والأكثر اتساعاً في نظم الطاقة الكهربائية، مما يجعلها معرضة بشكل أكبر للأعطاب، الأمر الذي يستوجب حماية هذه الشبكات لتقليل الأضرار الناجمة عن الأعطاب وضمان استقرارية عمل الشبكة الكهربائية. ولعل أهم أنواع الحماية المستخدمة في خطوط النقل هي الحماية المسافية والتي تعتمد على خوارزميات حساب معاوقة الخط ومن تم تحديد مكان العطب. | استلمت الورقة بالكامل في: 10 نوفمبر 2025 وروجعت في: 11 ابريل 2026 وقبلت للنشر في: 14 ابريل 2026 ونشرت على الشبكة العنكبوتية في: 16 ابريل 2026 |
| تتناول هذه الورقة تصميم وتنفيذ خوارزمية نظام حماية مسافية رقمي لحماية خطوط النقل الهوائية في شبكات الطاقة الكهربائية باستخدام متحكم أردوينو، بما يجعلها ملائمة للشبكات الكهربائية الصغيرة والأغراض التعليمية. حيث يتم حساب المعاوقة رقمياً لتحديد موقع العطب، باستخدام خوارزميات دقيقة لتحسين الاستجابة وسرعة عزل العطب. ويعتمد تنفيذ خوارزمية على طريقة التقريب التفاضلي بهدف تقليل الخطأ الناتج عن تأثير التوافقيات ومركبة التيار المستمر. وقد شملت مراحل العمل محاكاة النظام باستخدام برنامج MATLAB Simulink، وفي الجانب العملي تصميم وتنفيذ دوائر قياس الجهد والتيار ودوائر تكيف الإشارة، إضافة إلى برمجة متحكم الأردوينو. جرى اختبار الأداء عملياً على خط نقل معلمي من شركة LabVolt، وأظهرت النتائج تحقيق دقة جيدة في المحاكاة وقابلية النظام للتطبيق العملي. | DOI: https://doi.org/10.36602/ijeit.v14i2.598 الكلمات المفتاحية حماية مسافية، أردوينو، معاوقة، عطل، خط نقل |

Design and Implementation of Digital Distance Protection Algorithms for Overhead Transmission Lines Using an Arduino Microcontroller

Abdallah Hussein^{1*}, a.hussein@eng.misuratau.edu.ly, Khaled Abojlala², Kh.abojlala@eng.misuratau.edu.ly

¹ Electrical and Electronic Engineering, Faculty, Misurata University, Misurata, Libya.

² Electrical and Electronic Engineering, Faculty, Misurata University, Misurata, Libya.

* Corresponding author

Abstract

Transmission and distribution networks represent the most extensive part of electric power systems, making them more susceptible to faults. This necessitates protecting these networks to reduce damages to the equipment and ensure the stability of the power system. One of the most important types of protection used in transmission lines is distance protection, which relies on impedance algorithms to calculate the fault location.

This paper addresses the design and implementation of a digital distance protection algorithm for overhead transmission lines in power networks using an Arduino microcontroller, making it suitable for small-scale power systems and educational purposes. The impedance is calculated digitally to determine the fault location, utilising accurate algorithms to enhance response and speed up fault isolation.

The algorithm implementation is based on the differential approximation method to reduce errors caused by the effects of harmonics and the DC component. The work stages included system simulation using MATLAB Simulink, and on the practical side, the design and implementation of voltage and current measurement circuits and signal conditioning circuits, in addition to programming the Arduino microcontroller. The system's performance was tested practically on a laboratory transmission line from LabVolt, and the results showed good accuracy in the simulation and the system's applicability to real-world implementation.

Index Terms

Distance Protection, Arduino, Impedance, Fault, Transmission line.

1- مقدمة

تعتبر حماية أنظمة القدرة (Power system Protection) من الركائز الأساسية في تشغيل ومراقبة عمل أنظمة الطاقة الكهربائية، إذ لا يمكن تشغيل وإدارة الشبكات الكهربائية دون وجود خوارزميات تضمن حماية المعدات وتقليل الخسائر الناجمة عن الأعطاب (Faults)، وكذلك ضمان استمرارية تزويد المستهلكين بالكهرباء في الظروف الطبيعية والطارئة مع الحفاظ على استقرارية الشبكات الكهربائية. وتعد الحماية المسافية (Distance Protection) من أشهر أنواع الحماية المستخدمة في شبكات النقل والتوزيع الكهربائية، والتي تم تطويرها لتستخدم مرحلات ومعالجات رقمية وتقنيات معالجة الإشارات الرقمية (DSP) للكشف عن الأعطاب وتحديد مواقعها بدقة ومن ثم فصل الجزء المتضرر من الشبكة بسرعة وفعالية. إلا أن هذا الأداء الفعال ارتبط بالتكلفة المرتفعة والتصميم المعقد لهذه الأنظمة مما جعلها غير ملائمة للتطبيقات صغيرة النطاق أو للأغراض التعليمية (Small Scale applications and Educational Purposes) [2،1].

وعلى الرغم من أن متحكمات الأردوينو (Arduino Microcontrollers) قد لا تلبي جميع المتطلبات الفنية لنظم الحماية إلا أنها توفر مزايا كبيرة كالتكلفة المنخفضة وسهولة التطوير ودمج وظائف حماية متعددة في منصة واحدة، إضافة إلى توفيرها بيئة تعليمية ممتازة لفهم مبادئ الحماية، وسط تزايد فرص استخدام متحكمات الأردوينو مستقبلاً في ظل التطور السريع لخوارزميات المتحكم وتقنيات العزل، لتوفر حلولاً اقتصادية ومرنة لأنظمة الحماية، خاصة في بيئات التدريب الهندسي والبحث والتطبيقات الصغيرة والتي يُعطى فيها الأولوية للجودى الاقتصادية والمرونة على حساب الأداء العالي [3-6].

وقد أثبتت الدراسات امكانية استخدام الأردوينو في تطبيقات متعددة لأنظمة الحماية مثل الحماية من زيادة التيار (Overcurrent Protection) والحماية التفاضلية (Differential Protection) للمحولات والحماية المسافية لخطوط النقل، والحماية من تغيرات الجهد والتردد (Voltage and Frequency Disturbances) أو استخدامهما للتحكم في مرحلات متعددة الوظائف (Multi-function Relays). حيث تعتمد خوارزميات الأردوينو (Arduino Algorithms) في معالجة وتحليل الإشارات على التصفية الرقمية للإشارات الداخلة لتقليل الضوضاء، وأخذ العينات لحساب مقدار الإشارة الداخلة وحساب معدل تغير الإشارة الداخلة مع الزمن. إلا أن هذه الدراسات لم تنطرق إلى عرض الخوارزميات الرقمية المستخدمة في قياس معاوقة خط النقل، كما لم تُظهر التصميم العملي لدوائر تكيف الإشارة الخاصة بمتحكم الأردوينو.

وتعتمد الحماية المسافية الرقمية على خوارزميات حساب المعاوقة (Impedance measurement) بين نقطة تركيب المرحل ومكان العطب وفق قانون أوم كونها تمثل حاصل قسمة الجهد على التيار عند موقع المرحل. وحيث أن معاوقة الخط تتناسب طردياً مع طوله، فإنه بمقارنة المعاوقة المقاسة مع القيمة المرجعية يمكن تحديد مكان العطب بدقة [3].

أما من حيث التركيب فإن نظام التحكم للحماية المسافية الرقمية يتكون من وحدات قياس الجهد والتيار (Voltage and Current Measurement Circuits)، ودوائر تكيف الإشارة (Conditioning Circuits) المقاسة لتكون مناسبة كدخول للمتحكم، والتي يتم معالجتها باستخدام متحكمات دقيقة (Microcontroller) أو معالجات إشارة رقمية (DSP) لتحليل البيانات واتخاذ القرار (Data Analysis and Decision making) [4،3].

تهدف هذه الدراسة إلى استخدام متحكم أردوينو كمرحل حماية مسافية، حيث تم تنفيذ خوارزمية قياس معاوقة الخط اعتماداً على طريقة التقريب التفاضلي، والتي أظهرت نتائج جيدة بسبب قدرتها على التخلص من الأخطاء المترابطة الناتجة عن تأثير التوافقيات ومركبة التيار المستمر. شمل تنفيذ البحث في المرحلة الأولى محاكاة خط نقل هوائي وخوارزمية قياس معاوقة الخط باستخدام برنامج MATLAB Simulink، تلاها تنفيذ خوارزمية قياس المعاوقة لمرحل الحماية المسافية الرقمية عملياً. أشتمل التنفيذ العملي على تصميم وتنفيذ حساسات الجهد والتيار، ودوائر تكيف الإشارة، وتجهيز متحكم الأردوينو وبرمجته. تم تحقيق مفهوم خوارزمية قياس المعاوقة

بطريقة التقريب التفاضلي (Differential Approximation method)، وإجراء الاختبار على خط نقل معلمي من شركة LabVolt.

2- محاكاة خوارزمية الحماية المسافية الرقمية

أ. خوارزمية التقريب التفاضلي [7]:

تعتمد خوارزمية التقريب التفاضلي على حساب التفاضل الأول لموجتي الجهد والتيار لخط النقل، مع أخذ عينات (Samples) لهما بزمان ثابت. وتمتاز هذه الطريقة بإزالة تأثير مركبات التوافقيات والمركبة المستمرة (DC & Harmonic Components) من الإشارة، مما يقلل من الخطأ التراكمي (accumulative error) في حساب معاوقة الخط. ويمكن حساب مفاعلة ومقاومة الخط بالمعادلتين (1) و (2):

$$L = \frac{(I_m V_{m-1}) - (I_{m-1} V_m)}{(I_m I_{m-1}) - (I_{m-1} I_m)} \quad (1)$$

$$R = \frac{(V_m I_{m-1}) - (V_{m-1} I_m)}{(I_m I_{m-1}) - (I_{m-1} I_m)} \quad (2)$$

حيث:

$$I_m = i_m + i_{m-1} \quad I_{m-1} = i_{m-1} + i_{m-2}$$

$$V_m = v_m + v_{m-1} \quad V_{m-1} = v_{m-1} + v_{m-2}$$

$$J_m = \left(\frac{di}{dt}\right)_m + \left(\frac{di}{dt}\right)_{m-1}$$

$$J_{m-1} = \left(\frac{di}{dt}\right)_{m-1} + \left(\frac{di}{dt}\right)_{m-2}$$

وتمثل:

زمن أخذ العينة: $m, m-1, m-2$

عينات التيار: i_m, i_{m-1}, i_{m-2}

عينات الجهد: v_m, v_{m-1}, v_{m-2}

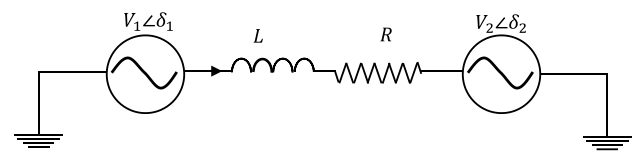
قيم تفاضل التيار: $\left(\frac{di}{dt}\right)_m, \left(\frac{di}{dt}\right)_{m-1}, \left(\frac{di}{dt}\right)_{m-2}$

وتعطي المعادلة (3) خطأ تقريب صفري عند الاختيار المناسب لقيم K_2 و K_1 .

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_m + \left(\frac{di}{dt}\right)_{m-1} = K_1(i_m - i_{m-1}) + K_2(i_{m+1} - i_{m-2}) \quad (3)$$

ب. حساب مقاومة الخط باستخدام MATLAB Simulink:

لأغراض محاكاة خوارزمية الحماية المسافية الرقمية، تم تمثيل خط نقل حقيقي طوله 400km، ومقاومته $0.05\Omega/km$ ، ومحثته $1.59mH/km$ وذلك باستخدام برنامج MATLAB Simulink كما هو موضح بالشكل (1). تم ضبط زاوية القدرة بين المصدرين لإحداث تدفق قدرة على الخط، كما تم تزويد الدائرة بفتح قابل للتحكم لإحداث عطب في خط النقل عند زمن محدد (0.2 s) لبيان تأثير العطب على قيمة المعاوقة وتحديد مكان العطل خلال الخط.



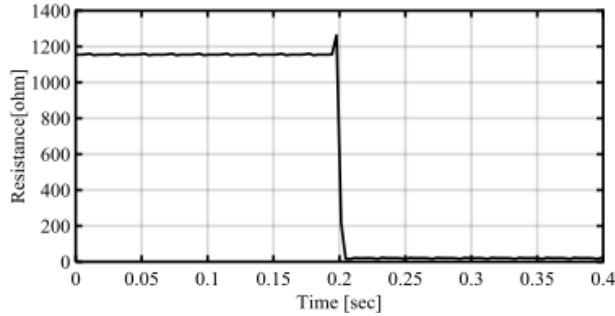
شكل 1. تمثيل خط النقل المستخدم

طبقت خوارزمية الحماية المسافية الرقمية لحساب مقاومة ومفاعلة خط النقل، وقد تم اختيار معدل أخذ عينات قدره 12 عينة لكل دورة

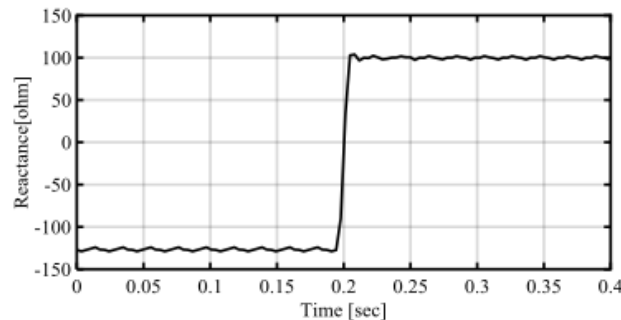
رقم مرجعي: ع.هـ. 598

(Sample/ cycle) لتحقيق توازن بين دقة الحسابات ومتطلبات سرعة معالجة البيانات.

وأظهرت نتائج المحاكاة كما في الشكل (2) أن قيمة المقاومة بعد حدوث عطب ثلاثي الأطوار (Three phase Fault) عند الزمن $t=0.2s$ بلغت 9.5Ω بنسبة خطأ لا تتجاوز 5%، كما بينت النتائج في الشكل (3) أن قيمة المفاعلة المحسوبة بلغت 99.35Ω ونسبة خطأ لا تتجاوز 2.5%. ويعزى ارتفاع نسبة الخطأ في حساب المقاومة مقارنة بالمفاعلة إلى تأثير مقاومة القوس الكهربائي (Electric Arc Resistance) أثناء حدوث العطب.



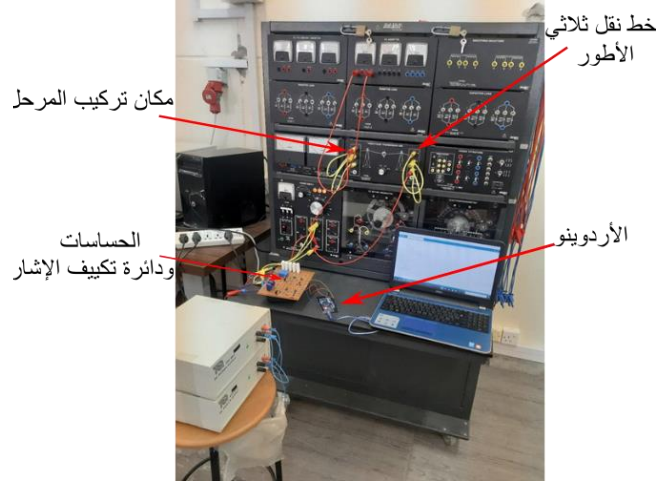
شكل 2. قيمة مقاومة خط النقل قبل وبعد عطب عند الزمن 0.2s



شكل 3. قيمة مفاعلة خط النقل قبل وبعد عطب عند الزمن 0.2s

3- حساب مقاومة الخط عملياً

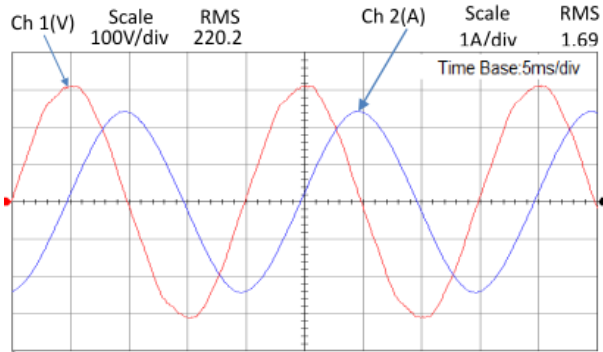
لإثبات مفهوم خوارزمية قياس المعاوقة رقمياً في الكشف عن أعطاب خطوط النقل الهوائية، تم تصميم وتنفيذ نموذج عملي لمرحل حماية مساقية رقمي باستخدام متحكم الأردوينو. جرى تصميم حساسي الجهد والتيار لقياس القيم اللحظية (Instantaneous values) لجهد وتيار خط النقل عند نقطة تركيب المرحل. حيث يقرأ الأردوينو هذه القيم عبر دوائر تكبير إشارة توفر مستويات جهود آمنة تتناسب مع مستوى الجهد التشغيلي للمحول التماثلي الرقمي (ADC) في المتحكم. وقد تم برمجة الخوارزمية بالأردوينو ليقيم بحساب قيمة المعاوقة رقمياً استناداً إلى القيم المقاسة ومن ثم معايرة القيم المقاسة مع القيم الحقيقية لتحسين الدقة في استكشاف الأخطاء وتحديد مكانها. تم تطبيق مفهوم الخوارزمية عملياً على خط نقل معلمي من شركة LabVolt بمعاوقة $133+j7.07\Omega$ ، وجهد تشغيلي مقداره 220V وتيار تشغيلي مقداره 1.69A.



شكل 4. تجهيزات التجربة.

وبين الشكل (4) تجهيزات التجربة التي تتضمن خط النقل (Transmission line) ومصدر التغذية (Power Supply) بجهد 220V، إضافة إلى حساسي الجهد والتيار (Voltage and Current Transducers) عند نقطة تركيب المرحل الرقمي في بداية خط النقل. كما يوضح الشكل وجود دائرة تكبير الإشارة التي توفر مستويات تتوافق مع مدخلات متحكم الأردوينو، والذي يقوم بتنفيذ خوارزمية قياس المعاوقة رقمياً وفق القيم الدخلة للمتحكم.

يوضح الشكل (5) موجتي الجهد والتيار عند طرف الإرسال لخط النقل (نقطة تركيب المرحل)، حيث تكون أقصى قيمة للجهد $220 \times \sqrt{2} = 311V$ وأقصى قيمة للتيار $1.69 \times \sqrt{2} = 2.4A$ في الجزئين الموجب والسالب للموجة. وبما أن هذه القيم لا تتوافق مع متطلبات المنفذ التماثلي الرقمي للأردوينو، والذي يشترط جهود موجبة فقط لا تتجاوز 5V كحد أقصى، فقد كان من الضروري تصميم حساسات الجهد والتيار، إضافة إلى دوائر تكبير الإشارة، لضمان توفير مستويات آمنة ومناسبة للقياس.



شكل 5. موجتي الجهد والتيار عند طرف الإرسال لخط النقل

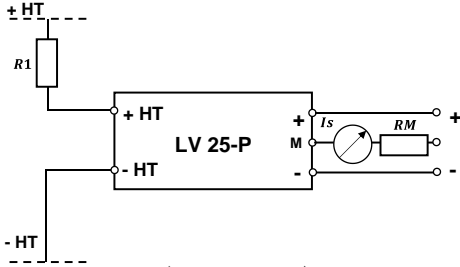
أ. تصميم دائرة حساس الجهد:

- تم تصميم دائرة حساس الجهد من النوع (LV 25-P) Voltage Transducer من شركة LEM والمبين بالشكل (6) وتركيبه الداخلي موضح بالشكل (7)، بحيث تعمل عند أقصى جهد تشغيلي مقداره 311V في الجزئين الموجب والسالب. ويمكن للحساس أن يتحسس جهد قيمته من 10 فولت إلى 500 فولت. وقد تم تصميم معاملات الحساس وفق الآتي:
- تيار دخل الحساس يكون مساوياً لجهد الدخل (220V) مقسوماً بمقاومة الدخل ($25\text{ k}\Omega$) للحد من قيمة التيار الداخل للدائرة عبر المحول والذي قد يسبب احتراق عناصر الدائرة، ليكون التيار $(I_{pn} = 8.8\text{ mA})$.
 - باستخدام معلومات الحساس فإن نسبة تحويل المحول هي (2.5) وبالتالي فإن تيار الثانوي (I_s) يكون مساوياً لـ (22 mA).

- وحيث أن أقصى جهد خرج للحساس هو 2V في الجزئين الموجب والسالب فإن مقاومة الخرج تساوي $R_m \approx 70\Omega$.



شكل 6. حساس الجهد



شكل 7. دائرة حساس الجهد

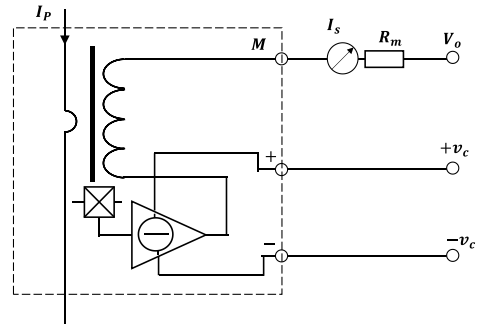
ب. تصميم دائرة حساس التيار:

تم تصميم دائرة حساس التيار نوع (LA 25-P) من شركة LEM كما هو موضح في الشكل (8) وتركيبه الداخلي موضح بالشكل (9)، بحيث تعمل عند أقصى تيار تشغيلي مقداره 2.4A في الجزئين الموجب والسالب. ويمكن لهذا الحساس أن يتحسس ما قيمته 55 أمبير في الاتجاهين الموجب والسالب. ولضمان عمل الحساس ضمن حدوده التشغيلية فإنه يتم تصميمه وفق الآتي:

- بافتراض أن أقصى تيار دخل مسموح به هو (2.33A) في الجزئين الموجب والسالب، فإن القيمة الفعالة لتيار الجانب الابتدائي للحساس يكون (1.65 A).
- بما أن نسبة تحويل الحساس هي (1/1000) ولضمان عدم تجاوز تيار الجانب الثانوي التيارات التشغيلية له فإنه يتم لف السلك حول الحساس أربع لفات، وبالتالي يكون تيار الجانب الثانوي (6.6 mA).
- وحيث أن الحساس صمم لإخراج إشارة جهد بحد أقصى 2V في الجزئين الموجب والسالب، فإن مقاومة القياس تساوي ($R_m \approx 220\Omega$) لضمان عدم تجاوز تيار الثانوي القيمة التصميمية للحساس.

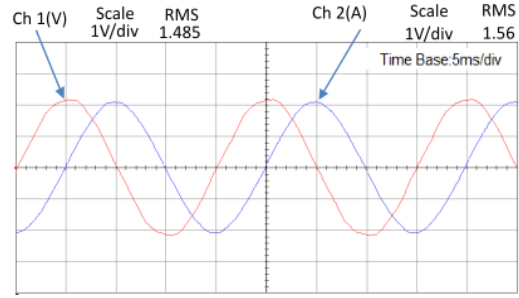


شكل 8. حساس التيار



شكل 9. دائرة حساس التيار

يبين الشكل (9) موجتي خرج حساسي الجهد والتيار، حيث يبلغ اتساع الإشارة (Amplitude) في كل منهما نحو 2V كأقصى قيمة في الجزئين الموجب والسالب، وذلك وفقاً لمتطلبات التصميم. وبما أن منفذ الأردوينو لا يمكنه التعامل مع الإشارات التي تحتوي على جزء سالب، فقد كان من الضروري إزاحة كلتا الإشارتين بمقدار جهد مستمر قيمته 2.5V. ولتحقيق ذلك، تم استخدام دائرة إزاحة تضمن وقوع الإشارتين بالكامل ضمن الجزء الموجب من نطاق القياس.



شكل 10. موجتي خرج حساسي الجهد والتيار

ج. تصميم دائرة الإزاحة

كما تم الإشارة سابقاً فإن الغرض من دائرة الإزاحة هو حل مشكلة عدم تعامل الأردوينو مع القيم السالبة، الأمر الذي يستدعي إزاحة موجة الجهد بالكامل للجزء الموجب. وقد تم تصميم دائرة الإزاحة المعتمدة على مضخم العمليات كما هو موضح في الشكل (11)، وذلك لإحداث إزاحة جهد بمقدار 2.5V بحيث تتوافق الإشارة مع متطلبات منافذ المحول التماثلي الرقمي (ADC) في الأردوينو، والتي لا تسمح بجهد دخل تتجاوز 5V. ويتم حساب مقاومات الدائرة وفق الآتي:

- بما أن الإزاحة المطلوبة هي 2.5V لإزاحة موجة الجهد إلى الأعلى أي أن:

$$V_{out} = V_{in} + 2.5V$$

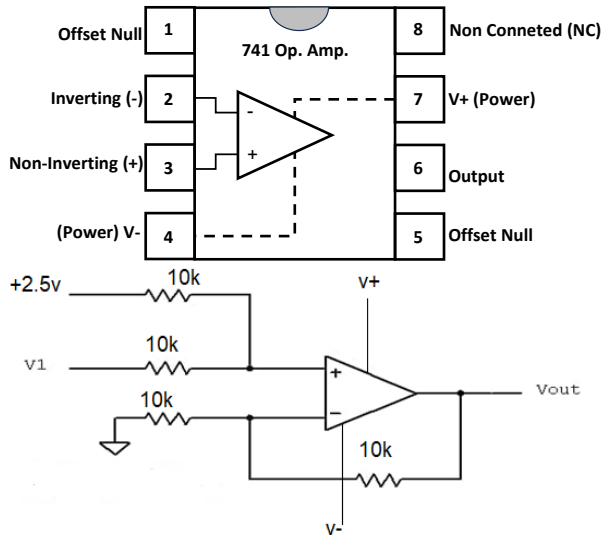
- دالة الانتقال لمضخم التجميع هي:

$$V_{out} = \left(V_1 \frac{R_2}{R_1+R_2} + V_2 \frac{R_1}{R_1+R_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (4)$$

- بوضع ($V_{in} = V_1$) يمكن الحصول على:

$$\left(\frac{R_2}{R_1+R_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 1 \quad (5)$$

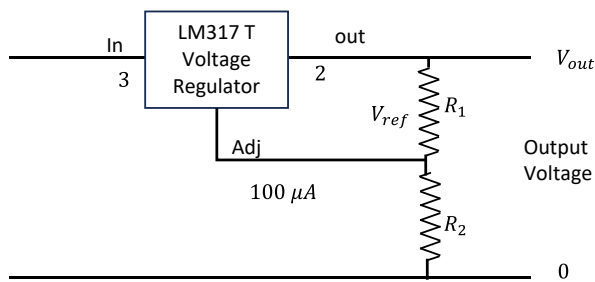
$$\left(V_2 \frac{R_1}{R_1+R_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 2.5 \quad (6)$$



شكل 11. مضخم العمليات ودائرة الإزاحة

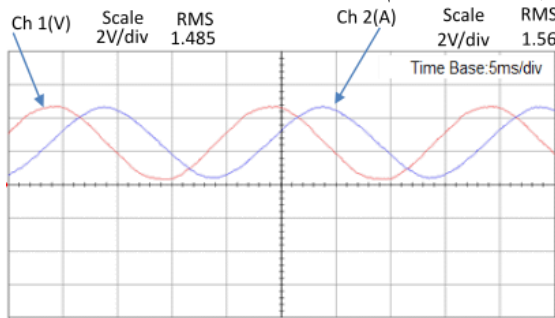
ويشترط لحل المعادلتين (5) و (6) تساوي قيم المقاومات، وبالتالي فقد تم اختيار قيم المقاومات على النحو التالي $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10k\Omega$. للحصول على قيمة ثابتة للجهد تم استخدام منظم جهد نوع (LM317)، وتوصيله كما هو موضح بالدائرة بالشكل (12). يتم التحكم في قيمة الجهد عن طريق المعادلة (7)، وحيث أن جهد الخرج المطلوب هو (2.5V) فإن قيم المقاومات تكون $(R_1 = R_2 = 330\Omega)$:

$$V_{out} = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (7)$$



شكل 12. دائرة منظم الجهد

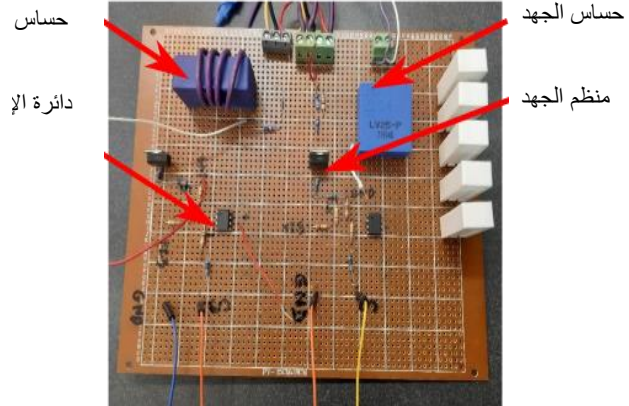
وبين الشكل (13) خرج دائرة الإزاحة والتي يصبح عندها بالإمكان إدخال هذه الإشارات إلى متحكم الأروينو.



شكل (13) خرج دائرة الإزاحة

وبتجميع هذه الدوائر يكون التصميم النهائي للوحة العملية المستخدمة في تنفيذ خوارزمية مرحلة الحماية المسافية الرقمي كما هو مبين بالشكل (14)، حيث تتضمن بشكل أساسي دائرة حساسي الجهد والتيار، ودائرة منظم الجهد، ودائرة إزاحة الإشارة.

وعند تشغيل الدائرة في أول مرة فإن متحكم الأروينو يقوم بقراءة كل من جهد خط النقل والتيار المار به، ومن ثم يقوم بتحويل هذه القيم إلى إشارات رقمية وإرجاع الموجة التي تم إزاحتها إلى طبيعتها (أي موجة مترددة) ومن ثم معايرة الموجة الداخلة ومقارنتها مع الموجة الأصلية لكل من موجتي الجهد والتيار. ويكون بعدها المتحكم جاهزاً لتحديد مكان العطب في الدائرة وفق الخوارزمية التي تم برمجتها.

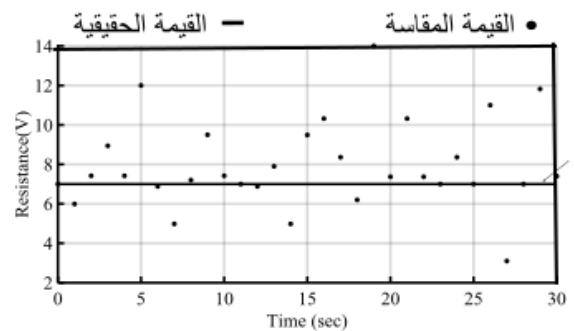


شكل 14. لوحة العملية لدائرة الحساسات ودائرة تكيف الإشارة

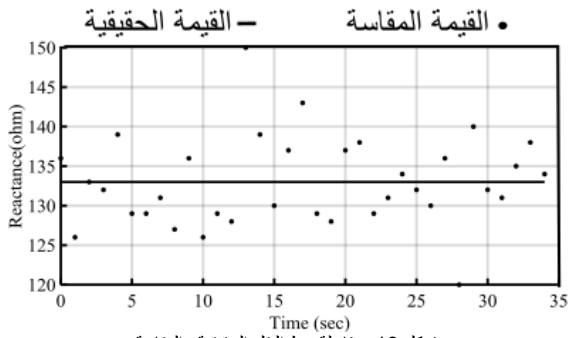
د. تنفيذ الخوارزمية

يقوم الأروينو بتنفيذ خوارزمية الحماية المسافية الرقمية من خلال قراءة القيم اللحظية لموجتي الجهد والتيار باستخدام المحول التماثلي الرقمي (ADC)، ثم استرجاع موجتي الجهد والتيار الفعلية لحظ النقل داخل المتحكم. بعدها يقوم البرنامج بأخذ أربع عينات متتالية من موجتي الجهد والتيار في الزمن الحقيقي، وحساب قيمة المعاوقة وعمل إزاحة للعينات الأربع وقراءة عينة جديدة وحساب المعاوقة في كل مرة عبر نافذة زمنية متحركة (Slide Window) بسعة أربع عينات لكل من الجهد والتيار، مما يسمح بمتابعة التغيرات اللحظية للجهد والتيار بدقة عالية.

تم استخدام نموذج خط نقل هوائي معلمي بمعاوقة خط $Z = 7.07 + j133\Omega$ في تنفيذ خوارزمية الحماية المسافية الرقمية باستخدام الأروينو وكانت نتائج قياس مقاومة ومفاعلة الخط كما هو موضح في الشكل (15) والشكل (16) على الترتيب. على الرغم من وجود بعض الانحرافات والقيم الشاذة في القراءات مقارنة بالقيم المقاسة، ولاسيما في مقاومة خط النقل، فإن هذه القيم تظهر توجهاً متوافقاً مع القيمة الحقيقية. ويمكن تحسين هذه القراءات باستخدام مرشحات رقمية في الدائرة العملية لتقليل التشوهات والتوافقيات في إشارتي جهد والتيار الداخل.



شكل 15. مقاومة خط النقل الحقيقية والمقاسة



شكل 16. مفاعلة خط النقل الحقيقية والمقاسة

4- الخلاصة

تمثل استخدام نظم حماية أنظمة القدرة المعتمدة على الأردوينو أهمية كبيرة لتطوير حلول اقتصادية ومرنة، خاصة للتعليم والبحث والتطبيقات الصغيرة. ورغم أن التطبيقات الحالية تُظهر قدرات وظيفية للأردوينو في مجالات الحماية المختلفة، إلا أن القيود في الأداء تمنعها من أن تكون بديلاً فعالاً للمرحلات المستخدمة تجارياً خصوصاً في التطبيقات الحساسة.

ويتميز الأردوينو بقدرته على تنفيذ وظائف الحماية الرئيسية مثل الحماية من زيادة التيار، الحماية التفاضلية، الحماية من الجهد، والحماية من التردد بتكلفة منخفضة وبما يزيد عن 90% مقارنة بالطول التجارية، إلا أن زمن الاستجابة والدقة يكون أقل من المرحلات التجارية المستخدمة في الشبكات الكهربائية، مما يحد من استخدامها في التطبيقات عالية السرعة وكذلك التي تتطلب دقة عالية في الحسابات. وفي ظل التطور المتسارع في هذا المجال فإنه يتوقع أن تكون للأردوينو أفقاً مستقبلياً واعدة خاصة في مجالات البحث والشبكات الصغيرة المتكاملة مع إنترنت الأشياء وتطبيقات الشبكات الذكية التي توفر مراقبة وتحكماً كاملاً في الشبكة الكهربائية.

وقد بينت نتائج هذه الورقة إمكانية استخدام الأردوينو لتنفيذ مراحل حماية مسافية رقمية منخفضة التكلفة، قادر على تنفيذ خوارزمية قياس المعاودة باستخدام طريقة التقريب التفاضلي، مما يجعله مناسباً للتدريب والتجارب العملية. وقد أظهرت النتائج تحقيق هذه الخوارزمية دقة جيدة في المحاكاة، حيث أن الخطأ في حساب مفاعلة الخط لا يتعدى 2.5%، بينما كان الخطأ في حساب المقاومة لا يتجاوز 5% مقارنة بالقيم المقاسة عملياً. فعلى الرغم من وجود هذه الانحرافات في القيم المقاسة خاصة في مقاومة خط النقل، إلا أنها توافقت في توجيهها مع القيم الحقيقية لمعاملات الخط. وللحصول على قياسات أكثر دقة، يُوصى باستخدام متحكمات ذات قدرة وسرعة أعلى في معالجة البيانات مثل Raspberry Pi وكذلك استخدام مرشحات رقمية لإشارتي جهد والتيار الدخل. وكذلك لاستكمال البحث في تطوير الخوارزمية المبنية في هذه الورقة فإنه سيتم إضافة مبدأ مناطق الحماية على خط نقل ودمج ذلك في خوارزمية المتحكم.

المراجع

- [1] A. M. Tsimtsios and V. C. Nikolaidis, "Application of distance protection in mixed overhead-underground distribution feeders with distributed generation," *The Journal of Engineering*, vol. 2018, no. 15, pp. 950–955, Oct. 2018.
- [2] J. D. Hernández-Santafé and E. Sorrentino, "Problems and Solutions Concerning the Distance Protection of Transmission Lines Connected to Inverter-Based Resources," *Energies*, vol. 18, no. 6, art. 1375, Mar. 2025.
- [3] M. A. Alqasem, A. F. Alqasem, A. A. Alqudah, and M. A. Alhaddad, "Transmission line fault detection using Arduino and GSM," *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, vol. 13, no. 2, pp. 319–324, Feb. 2024.
- [4] A. A. Alwan and A. G. Razzaq, "Design and implementation of a distance relay using Arduino Uno,"

World Journal of Engineering Research and Technology (WJERT), vol. 11, no. 3, pp. 123–133, Apr. 2025.

- [5] G. Dhoke, A. Dhurve, A. Pandagre, S. Farkade, and M. Sune, "Design and implementation of a three-phase transmission line fault detection and protection system using Arduino," *International Journal on Science and Technology (IJSAT)*, vol. 16, no. 1, Jan.–Mar. 2025.
- [6] K. Kumaraswamy, R. Poojitha, M. Vamshi, G. Maneesha, Ch. Prashanth, and B. Bhanu Prakash, "3-Phase transmission line fault detection using Arduino Nano," *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, vol. 5, no. 9, Apr. 2025.
- [7] M. Suzuki, M. Yamaura, Y. Kurosawa, and T. Yokoyama, "Digital distance relay with improved characteristics against distorted transient waveforms," pp. 45–46, 1989., *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 4, pp. 2025–2031, Oct. 1989.