# دراسة نمذجة و محاكاة المحرك التحريضي الثلاثي الطور و تحليل نتائج اختباراته باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي

**د.م.تامر عبد الجليل شتور***

**الملخص**

إن دراسة نمذجة و محاكاة الآلات الكهربائية تمثل جسراً هاماً بين النظرية و التطبيق في التعليم الهندسي حيث تعتبر محاكاة الآلات الكهربائية خطوة ضرورية للمهندسين لتحليل و تحسين أدائها في بيئة افتراضية آمنة قابل للتعديل قبل الانتقال إلى النماذج الأولية المادية المصنعة المكلفة ، كما تلعب المحاكاة دوراً تعليمياً مهماً حيث توفر منصات تفاعلية لطلاب الهندسات لفهم مبادئ عمل الآلات الكهربائية و اختباراتها بشكل آمن وفعال و غير مكلف .

بدايةً تم اختيار المحرك التحريضي الثلاثي الطور الاكثر انتشاراً و أهميةً في الحياة العملية و تم الاعتماد على برامج متخصصة مثل **MATLAB/Simulink** لتطبيق منهجية علمية للمحاكاة بناء على نمذجة دقيقة و الأداة الحديثة المتطورة **Regression Learner** .

كما تم استعراض الأسس النظرية لنمذجة المحرك التحريضي الثلاثي الطور و من ثم الانتقال إلى استراتيجة البحث التي تمت من خلالها محاكاة الاختبارات الأساسية على المحرك : اللاحمل : باعطاء قيم مختلفة للتوتر من Un (0.5−1.1) مع بقاء العزم المطبق صفريا ثم قياس قيم التيار و الاستطاعة مع إنشاء جداول بالنتائج و رسم المنحنيات.

القصر: بإعطاء قيم مختلفة للتيار من(0 حتى Isc )حيث يكونIn=Iscمع تطبيق سرعة زاوية معدومة(ω=0)ثم قياس قيم التوتر والاستطاعة مع إنشاء جداول بالنتائج و رسم المنحنيات .

التحميل : بإعطاء قيم مختلفة للعزم الميكانيكي من (0 حتى Tn) مع تثبيت قيم التوتر و التردد ثم قياس قيم التيار والتوتر والسرعة مع إنشاء جداول بالنتائج و رسم منحنيات العمل.

تُستخدم نتائج المحاكاة، التي غالباً ما تُعرض على شكل منحنيات للأداء (العزم، السرعة، التيار)، لتقييم التصاميم المختلفة ومقارنتها وتحسين الكفاءة وتقليل التكاليف.

و أخيراً تم مناقشة النتائج اعتماداً على الأدوات الرائدة الحديثة للذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات الناتجة ضمن الجداول و المنحنيات للاستفادة منها و مطابقتها للمعايير القياسية .

**الكلمات المفتاحية**:النمذجة و المحاكاة،الآلات الكهربائية،المحرك التحريضي الثلاثي الطور،الذكاء الاصطناعي

* دكتوراه في هندسة الطاقة الكهربائية–مدرس في كلية الهندسة المعلوماتية–الجامعة العربية الخاصة للعلوم و التكنولوجيا

## Studying the modeling and simulation of a three-phase induction motor and analyzing the results of its tests using artificial intelligence tools.

**Dr. E. Tamer Abduljalel Shattour***

**Abstract**

Simulating electrical machines is a crucial step for engineers and researchers to analyze and improve their performance and systems in a safe, customizable virtual environment before moving to costly, manufactured physical prototypes.

Simulation also plays a vital educational role, providing interactive platforms for engineering students to understand the operating principles of electrical machines and their testing safely, efficiently, and cost-effectively.

Initially, the most widespread and important three-phase induction motor in practical applications was chosen. Specialized software such as MATLAB/Simulink and Ansys Motor-CAD were used to implement a scientific simulation methodology

The theoretical foundations of three-phase induction motor modeling were reviewed, followed by the research strategy, which involved simulating the basic motor tests: No-load: applying different voltage values (0.5-1.1 Un) while keeping the applied torque at zero. Current and power values were then measured, and results were tabulated and curved. Short circuit simulation: By

assigning different current values from 0 to Isc (where Isc = In) and applying zero angular velocity ($\omega = 0$), the voltage and power values are measured, and tables of results are generated and curves plotted.Loading simulation: By assigning different torque values from 0 to Tn, while holding the voltage and frequency constant, the current, voltage, and velocity values are measured, and tables of results are generated .

The simulation results, often presented as performance curves (torque, velocity, current), are used to evaluate and compare different designs, improve efficiency .

Finally, the results are discussed using leading modern artificial intelligence tools to analyze the resulting data within the tables and curves, to ensure their relevance and compliance with standard criteria.

**Keywords :** Modeling and simulation , electrical machines , three- phase induction motor , artificial intelligence .

* Lecturer at the Arab Private University for Science and Technology.

## 1- المقدمة :

تعتبر المحركات التحريضية و خاصة الثلاثية الطور من أكثر أنواع الآلات الكهربائية انتشاراً في التطبيقات الصناعية حيث يشكل المحرك التحريضي الثلاثي الطور ذو القفص السنجابي ما يزيد عن 85 ٪ من الحمل الكهربائي في القطاع الصناعي عالمياً **[1]** .

تعتبر النمذجة والمحاكاة أداتان أساسيتان لا غنى عنهما لفهم سلوك المحرك حيث تأتي أهمية المحاكاة من قدرتها على تقليل دورات التطوير وتكاليفه بشكل كبير فبدلاً من بناء و اختبار نماذج مادية متعددة، يمكن للمهندسين إنشاء نماذج افتراضية وتقييمها عبر مجموعة كاملة من ظروف التشغيل . تتيح المحاكاة تحليلاً متعدد الجوانب يشمل الجوانب الكهرومغناطيسية والحرارية والميكانيكية، مما يؤدي إلى تصميمات مُحسَّنة من حيث الأداء والكفاءة والحجم .

تم في هذا البحث دراسة نمذجة و محاكاة المحرك التحريضي الثلاثي الطور انطلاقاً من إدخال المعطيات الأساسية من اللوحة الاسمية للمحرك و حتى الحصول على أدق المعلومات و المخططات النهائية للمحرك مروراً بكل اختباراته الأساسية .

## 2- مشكلة البحث :

يُعدّ المحرك التحريضيي آلة معقدة التصميم حيث تستخدم غالبية المؤسسات الصناعية برامج حاسوبية لمحاكاة الآلة قبل تنفيذ التصميم. و مع ذلك، يُنفَّذ النموذج الديناميكي للمحرك التحريضيي عادةً في محاور dq0 المباشرة، والمحور التربيعي، ومحور التسلسل الصفري. أما تنفيذ النموذج الساكن والديناميكي للمحرك فهو تمثيل رياضي؛ هذه الاستراتيجية تُزيل الخطأ البشري، وتُمكّن من تصميم محركات ذات أداء فائق، وتُوفّر محركات تحريضيية عالية الكفاءة. يُنفّذ هذا البحث نمذجة ساكنة وديناميكية لآلة تحريضيية ثلاثية الأطوار نظراً لاحتمالية حدوث أعطال ومتطلبات الأداء العالي للآلات التحريضية باستخدام طريقة المحور المباشر dq0، تم اشتقاق المعادلات التفاضلية للنموذج الديناميكي أولاً، ثم نُفِّذت في برنامج Matlab/Simulink؛ وتم تقييم أدائها في الاختبارات ضمن أدوات الذكاء الاصطناعي .

## 3- أهمية البحث :

1) التعلم التفاعلي : يتيح الواقع الافتراضي للباحثيين التعامل مع المعدات والأسلاك والمكونات الافتراضية حيث يُعزز هذا التفاعل العملي فهم المفاهيم التي قد يصعب استيعابها من خلال الدراسة النظرية وحدها، ويعزز قدرتهم على تذكرها .
2) التجريب الآمن : السلامة هي الأهم في مختبر الكهرباء حيث يُزيل الواقع الافتراضي المخاطر المرتبطة بالجهد العالي والدوائر الكهربائية النشطة مما يسمح بإجراء التجارب دون خوف من الحوادث أو الإصابات مما يساعد على التعلم من التجارب .
3) تطبيقات واقعية : يبدو مستقبل الواقع الافتراضي في مختبرات الكهرباء واعداً و ذلك مع استمرار تقدم التكنولوجيا حيث نتوقع رؤية محاكاة أكثر تطوراً، وتجارب تعليمية تفاعلية، وتكاملاً أفضل مع التقنيات التعليمية الأخرى. سيعزز هذا التطور طريقة تفاعل الباحثيين مع مفاهيم الهندسة

الكهربائية و يُحسّن الواقع الافتراضي تجارب مختبرات الكهرباء، مما يجعل التعلم أكثر جاذبية وفعالية .

## 4-الدراسات السابقة المرجعية عن البحث :

1) قدم شيترا و برابهاكار بحث عن محاكاة المحرك التحريضي باستخدام نهج المنطق الضبابي. من أجل تنظيم سرعة محرك التحريضي للحصول على عزم الدوران الأمثل بأقل قدر من الفقد. استخدما نهج التحكم الموجه للمجال لإنشاء وحدة تحكم منطقية ضبابية تتيح تحكماً مُحسَّناً في عزم دوران المحرك مع أداء متغير بشكل كبير **[2]** .
2) اقترح الناغي استخدام خوارزمية جينية لمعالجة الأحمال التجريبية على آلة تحريضية. وقد تم إثبات مبدأ التنبؤ ببيانات المحرك من بيانات الاختبار باستخدام تقنية تعتمد على الخوارزمية الجينية. وتم تحديد المواصفات باستخدام تجارب نموذجية بدون حمل وتجارب دوار مقيد**[3]** .
3) قدم جيردهي محاكاة لمحرك تحريضيي باستخدام شبكة عصبية اصطناعية (ANN) ونظام استدلال عصبي ضبابي تكيفي (ANFIS) لدراسة المتغيرات و قارن الباحثون نتائج المحاكاة وفق الأنظمة المقترحة مع النتائج العملية **[4]** .
4) تقترح الدراسة **[5]** المنشورة عام (2022) نهجاً مُدمجاً لنمذجة نظام تبريد المحرك التحريضي عالي الجهد ، الذي يتضمن دمج النموذج الكهربائي والحراري ونموذج المُبرّد باستخدام النموذج الرياضي ، تم تطوير نموذج حراري باستخدام نماذج رياضية ونماذج انحدار خطي (liner regression) مُدمجة ، تم دمج جميع النماذج المُثبتة في نموذج واحد ثم تُستخدم الإشارات الفعلية للتحقق من صحة البنية الكاملة للنموذج . أظهرت النتائج بوضوح دقة النموذج المقترح مع انخفاض كبير في متوسط الخطأ المطلق النسبي (MAPE) وجذر متوسط مربع الخطأ (RMSE).
5) تقترح الدراسة **[6]** المنشورة عام (2022) نموذجاً قائماً على الانحدار regression لتحليل أداء المحركات التحريضية حيث يتم استخدام شبكة (DBN) و هي نموذج متقدم من تعلم

الآلة (deep belief network)المكدسة مع عدة آلات بولتزمان (RBM) للتشخيص الدقيق من خلال اعتماد عملية التدريب للكشف عن الاعطال ، تم اقتراح نهج جديد قائم على التعلم العميق للتخفيف من الخسائر .

6) تقدم الدراسة **[7]** المنشورة عام (2023) نماذج محاكاة لإجراء اختبار التيار المستمر و اختبار اللاحمل واختبار الدوار المقفل على المحرك التحريضي الثلاثي الطور باستخدام MATLAB/Simulink تُعدّ هذه الاختبارات الثلاثة أساسية لتحديد خصائص الدائرة المكافئة للمحرك التحريضي الثلاثي الطور ، كما يستخدم البحث بيئة MATLAB لتحديد خصائص عزم الدوران والسرعة والتيار للمحرك ، وقد وُجد أن نتائج المحاكاة تتطابق بشكل كبير مع القيم التي تم الحصول عليها في التجارب العملية ، تم إجراء العديد من التجارب الافتراضية على المحركات التحريضية بدقة محسّنة باستخدام نماذج المحاكاة ، تم في اختبار اللاحمل تقييم تباين بنسبة 10% بين نتيجة النموذج والنتيجة المختبرية ، هذا التباين كبير و يتطلب البحث عن نموذج أكثر كفاءة لتقليل الخطأ إلى أقل قيمة ممكنة .

## 5-الهدف من البحث :

للمساهمة في تطوير نماذج محاكاة المحركات التحريضية ضمن المختبرات الكهربائية فكان الهدف من البحث يتضمن مجموعة نقاط أهمها :

1) تطبيق تقنية نمذجة إطار مرجعي للمحور dq0 لآلة دوارة وفق المعادلات الرياضية .
2) محاكاة محرك تحريضيي ثلاثي الأطوار باستخدام برنامج Matlab/Simulink .
3) تحليل الأداء الديناميكي :دراسة الاختبارات الرئيسية الثلاثة اللاحمل و القصر و التحميل.
4) استنتاج الجداول و رسم المنحنيات المميزة للاختبارات الرئيسية الثلاثة .
5) تقييم المحاكاة و تحسينها وفقاً لأدوات الذكاء الاصطناعي .

## 6- استراتيجية البحث :

### أ : مواد و طرق البحث :

تم الاعتماد على المحرك التحريضي الثلاثي الطور **[8]** :

- ❖ لأنه أكثر المحركات انتشاراً وأهمها استخداماً في الحياة العملية .
- ❖ لأنه يتميز بموثوقية عالية و كفاءة العمل .
- ❖ لأنه يعتبر من المحركات الاقتصادية ذات المردود الجيد .
- ❖ لأنه يتميز بقلة أعطاله و سهولة صيانته و تواجده باستطاعات مختلفة .

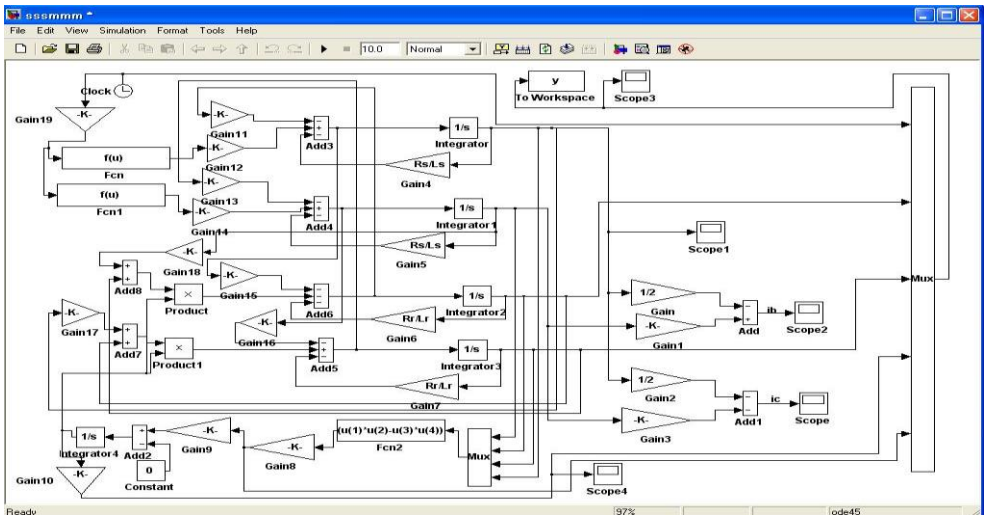
تم الاعتماد على MATLAB **[9]** :

- ❖ يعتبر MATLAB/Simulink الأداة الأكثر شيوعاً لنمذجة ومحاكاة الأنظمة الديناميكية .
- ❖ لأنه يعتبر لغة برمجة متطورة جداً و يتضمن البرمجة (GUI)والنمذجة (SIMULINK).
- ❖ لأنه يتمتع بمرونة عالية وقابلية للتعديل و التطور .
- ❖ لأنه يملك أضخم مكتبة لأنظمة الطاقة (simpower system) تحوي العديد من الأدوات و الوسائل المساعدة للنمذجة في النظم الكهربائية .

### ب: نمذجة المحرك التحريضي الثلاثي الطور باستخدام معادلاته الرياضية :

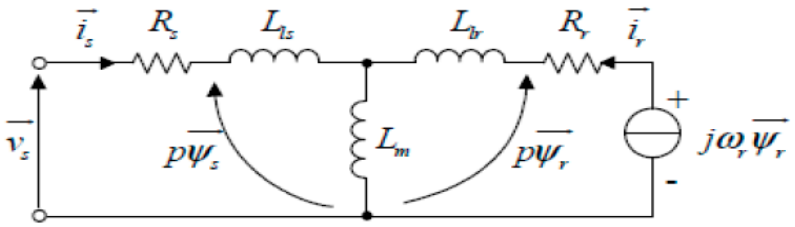
يحتوي MATLAB على (Block Diagrams) للمحرك التحريضي يتألف من عدة دارات ممثلة داخله حسب التمثيل الرياضي حيث يمكن تمثيل المحرك التحريضي بدارة يمثل فيها الثابت و الدائر بمعادلات رياضية خاصة به وتمثل هذه المعادلات في MATLAB بعناصر تمثيل المعادلات من مكاملات ومضخمات ومصفوفات و توابع رياضية وغيرها .

ويعبر الشكل عن تمثيل المحرك التحريضي وفق المعادلات الرياضية المميزة له :




**الشكل (1) تمثيل المحرك التحريضي وفق المعادلات الرياضية في MATLAB**

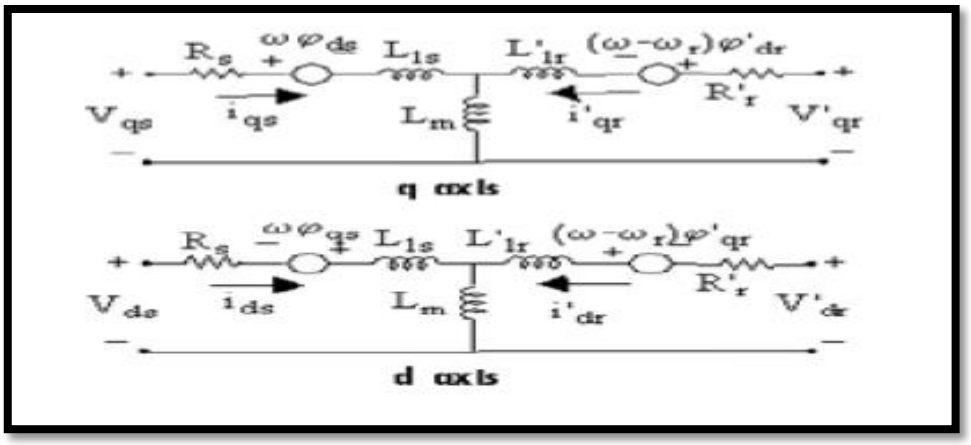
يتم تمثيل المحرك التحريضي بدارة مكافئة على شكل حرفTو يوضح الشكل التالي ذلك:




**الشكل (2) تمثيل المحرك التحريضي بدارة على شكل حرف T [1]**

وقد اعتُبر نموذج d–q للمحوريين المباشر و المتعامد مناسباً تماماً ليكون بمثابة تصميم أساسي

الذي يكافئ بالدارات التالية :




**الشكل (3) تمثيل المحرك التحريضي بالمحوريين d-q [1]**

حيث سيوضح : **الجدول (1) دلالة الرموز في تمثيل المحرك التحريضي بالمحورين d-q**

| الرمز | الدلالة |
|---|---|
| $R_s$ , $L_{1s}$ | المقاومة و المحارضة التسريبية للثابت |
| $L_s$ | المحارضة الكلية للثابت |
| $V_{ds}$ , $i_{ds}$ | توتر و تيار الثابت وفق المحور d |
| $\omega_m$ | السرعة الزاوية لمحرك كهربائي ثلاثي الطور |
| $\omega_r$ | السرعة الزاوية الكهربائية |
| P | عدد ازواج الاقطاب |
| $T_m$ | العزم الميكانيكي لمحرك كهربائي ثلاثي الطور |
| H | معامل العطالة للحمولة و ممانعة المسار |
| $R_r$ , $L_{1r}$ | المقاومة و المحارضة التسريبية للدوار |
| $V_{dr}$ , $I_{dr}$ | توتر و تيار الدوار وفق المحور d |
| Lm | المحارضة المغناطيسية |
| Vqs , $I_{qs}$ | توتر و تيار الثابت وفق المحور q |
| $\varphi_{ds}$ , $\varphi_{qs}$ | فيض الثابت وفق المحور d و q |

| | |
|---|---|
| $\Theta_m$ | زاوية موضع المحرك الكهربائي |
| $\Omega$ | السرعة الزاوية للإطار المرجعي |
| $T_e$ | العزم الكهرومغناطيسي |
| F | معامل الإحتكاك |
| $V_{qr}$ , $I_{qr}$ | توتر و تيار الدوار وفق المحور q |
| $\varphi_{dr}$ , $\varphi_{qr}$ | فيض الدوار وفق المحور dو q |
| $L_r$ | المحارضة الكلية للدوار |

حيث إن أسلوب النمذجة المقترح لمحرك تحريضيي يتم بتزويد المحرك بجهد التغذية ثلاثي الأطوار ثم يتم تحويل الجهود باستخدام المحور dq0 لإنتاج المتجهين Vq و Vd ومن ثم يتم حساب تيارات وجهود الجزء الثابت، ثم تُؤخذ بيانات الجزء الدوار في الاعتبار .

سنوضح طريقة استنتاج المعادلات الرياضة وفق الدراسات المرجعية **[10]** كما يلي:

إن النموذج الرياضي للمحرك التحريضي ثلاثي الطور في الإطار المرجعي الثلاثي الطور (ABC) يُشتق مباشرة من قوانين كيرشوف للفولطية وقوانين فارادي للتحريضي حيث تتميز معادلاته بأنها شديدة الاقتران و غير خطية لذا يعد هذا النموذج معقد حسابياً .

لذا يعتمد على النموذج الرياضي للمحرك التحريضي في الإطار المرجعي الدوار (dq) – تحويل بارك : لتبسيط التحليل، يُطبق تحوير بارك (Park Transformation) لتحويل المتغيرات من الإطار الثلاثي الثابت (abc) إلى إطار مرجعي دوار (dq0) بمحوريه المباشر (d) والمتعامد (q) ، هذا التحويل يحول النظام إلى معادلات تفاضلية بمعاملات ثابتة **[10]**:

$$U_{1d} = R_{1d} i_{1d} + \frac{d_{\psi 1d}}{dt} \qquad U_{1q} = R_{1q} i_{1q} + \frac{d_{\psi 1q}}{dt} \qquad (1)$$

$$\Psi_{1d} = L_{1d} i_{1d} + M i_{2d} \qquad \Psi_{1q} = L_{1q} i_{1q} + M i_{2q}$$

يمكن بطريقة ثانية من العلاقتين الأخيرتين حساب ما يلي: $i_{1d} = \frac{\Psi_{1d} - M i_{2d}}{L_{1d}}$

و بنفس الأسلوب حيث تشير M إلى المحارضة المغناطيسية بين الثابت و الدوار :

$$U_{2d} = R_{2d} i_{2d} + \frac{d_{\psi_{2d}}}{dt} + W_r \psi_{2q}$$

$$U_{2q} = R_{2q} i_{2q} + \frac{d_{\psi_{2q}}}{dt} + W_r \psi_{2d} \qquad (2)$$

$$\Psi_{2d} = L_{2d} i_{2d} + M i_{1d} \qquad \Psi_{2q} = L_{2q} i_{2q} + M i_{1q}$$

أيضاً من المعادلتين الأخيرتين نجد أن: $i_{2d} = \frac{\Psi_{2d} - M i_{1d}}{L_{2d}}$

نستبدل العلاقة الأخيرة في العلاقة $i_{1d}$ فنحصل على:

$$i_{1d} = \frac{\psi_{1d} - M\left[\left(\frac{\psi_{2d} - M i_{1d}}{L_{2d}}\right)\right]}{L_{1d}}$$

$$i_{1d} = \frac{L_{2d} \cdot \Psi_{1d} - M[\Psi_{2d} - M \cdot i_{1d}]}{L_{1d} \cdot L_{2d}} \quad \gg$$

$$i_{1d} = \frac{L_{2d} \cdot \Psi_{1d} - M\Psi_{2d} + M^2 \cdot i_{1d}}{L_{1d} \cdot L_{2d}} \quad \gg$$

$$i_{1d} \cdot L_{1d} \cdot L_{2d} = L_{2d} \cdot \Psi_{1d} - M \cdot \Psi_{2d} + M^2 \cdot i_{1d} \quad \gg$$

$$i_{1d} \cdot [L_{1d} \cdot L_{2d} - M^2] = L_{2d} \cdot \Psi_{1d} - M \cdot \Psi_{2d} \quad \gg$$

بالتالي بنفس الأسلوب يمكن حساب جميع التيارات كما يلي:

$$i_{1d} = \frac{L_{2d}\psi_{1d} - M\psi_{2d}}{L_{1d} . L_{2d} - M^2} \qquad (3)$$

$$i_{1q} = \frac{L_{2q}\psi_{1q} - M\psi_{2q}}{L_{1q}.L_{2q} - M^2} \quad (4)$$

$$i_{2d} = \frac{L_{1d}\psi_{2d} - M\psi_{1d}}{L_{1d}.L_{2d} - M^2} \quad (5)$$

$$i_{2q} = \frac{L_{1q}\psi_{2q} - M\psi_{1q}}{L_{1q}.L_{2q} - M^2} \quad (6)$$

بتبديل هذه القيم في معادلات الجهود نجد ما يلي:

$$U_{1d} = R_{1d}\left[\frac{L_{2d}\psi_{1d} - M\psi_{2d}}{L_{1d}.L_{2d} - M^2}\right] + \frac{d\psi_{1d}}{dt}$$

$$\frac{d\psi_{1d}}{dt} = U_{1d} - \frac{(R_{1d}L_{2d})\ \psi_{1d}}{L_{1d}.L_{2d} - M^2} + \frac{R_{1d}M\psi_{2d}}{L_{1d}.L_{2d} - M^2} \quad (7)$$

بنفس الطريقة يمكننا أن نوجد تفاضلات التحريض المغناطيسي بالنسبة لباقي الملفات عند المحورين المباشر و العكسي d – q كما يلي **[7]** :

$$\frac{d\psi_{1q}}{dt} = U_{1q} - \frac{(R_{1q}L_{2q})\ \psi_{1q}}{L_{1q}.L_{2q} - M^2} + \frac{(R_{1q}M)\psi_{2q}}{L_{1q}.L_{2q} - M^2} \quad (8)$$

$$\frac{d\psi_{2d}}{dt} = U_{2d} - \frac{(R_{2d}L_{1q})\ \psi_{2q}}{L_{1d}.L_{2d} - M^2} + \frac{(R_{2d}M)\psi_{1d}}{L_{1d}.L_{2d} - M^2} - W_r\psi_{2q} \quad (9)$$

$$\frac{d\psi_{2q}}{dt} = U_{2q} - \frac{\left(R_{2q}L_{1d}\right)\ \psi_{2q}}{L_{1q}.L_{2q} - M^{2}} + \frac{\left(R_{2q}M\right)\ \psi_{1q}}{L_{1q}.L_{2q} - M^{2}} - W_{r}\psi_{2d} \qquad (10)$$

لحل هذه المعادلات استخدمنا برنامج (Matlab) الذي يحتوي طريقة حل هذه المعادلات حيث يلزمنا

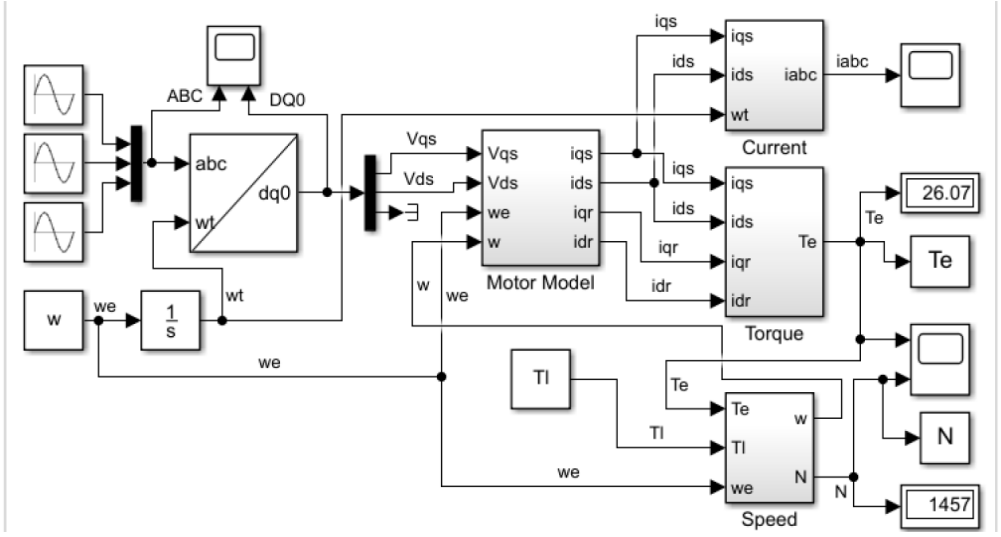
$$T_c = \frac{3}{2} MP^2 \left(i_{1d} i_{2q} - i_{2d} i_{1q}\right)$$

عندها أيضاً معادلة العزوم:

وكذلك معادلة الحركة الميكانيكية:

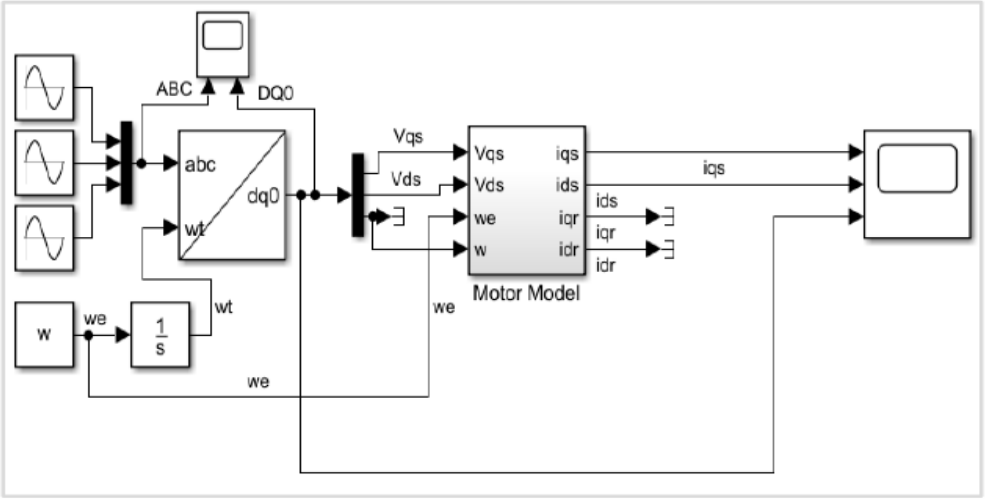
$$\frac{dW_r}{dt} = \frac{3}{2} MP^2 \left(i_{1d} i_{2q} - i_{2d} i_{1q}\right)$$

النموذج الديناميكي المقترح المتكامل مع معادلات العزوم و الاستطاعات **[11]** :




**الشكل (4) النموذج الديناميكي للمحرك التحريضي**

بينما يتحول النموذج للنموذج ستاتيكي ساكن عندما تكون السرعة و التسارع و العزوم المطبقة صفرية أي يصبح :




**الشكل(5) النموذج الستاتيكي للمحرك التحريضي**

**ج : محاكاة المحرك التحريضي الثلاثي الطور و اختباراته :**

يعتبر SIMULINK من أكثر برامج الحاسوب الهندسية شيوعاً و استخداماً في مجالات الأبحاث الأكاديمية و الصناعية لبناء نماذج تقليدية للأنظمة الديناميكية و تحليلها و محاكاتها يمكن للباحثين باستخدام هذا البرنامج في بناء نماذج للأنظمة الحقيقية و محاكاتها كما يمكن تعديل متغيرات هذه الأنظمة أثناء المحاكاة و ملاحظة التغيرات**[12]**.

في هذا البحث تتم عملية بناء النماذج باستخدام المخططات الصندوقية المخزنة فيه على عكس البرامج الأخرى و التي تستهلك جهد ووقت الباحث في كتابة برامج طويلة و معقدة .

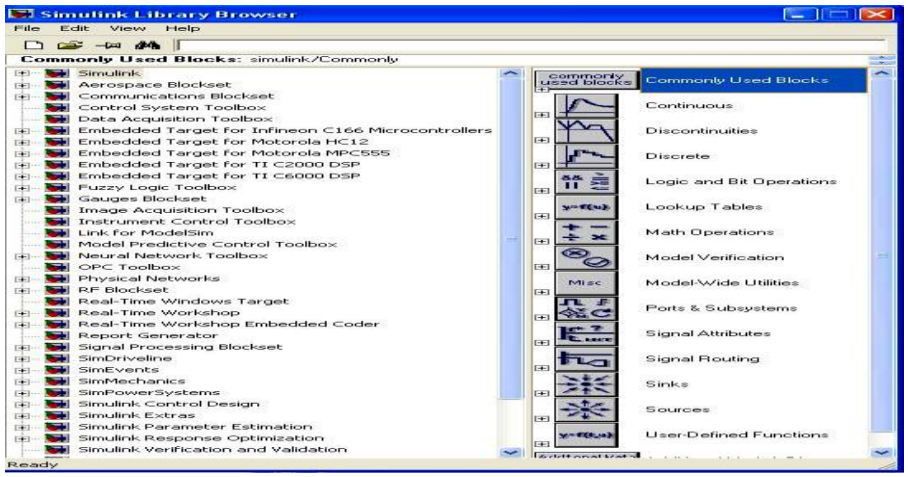
عند اكتمال بناء نموذج للمنظومة تبدأ عملية المحاكاة و ذلك باختيار طريقة التكامل المناسبة في SIMULINK يحتوي على عدة طرق لإنجاز عملية التكامل (Integration) .

و يمكن مشاهدة النتائج أثناء عملية المحاكاة على هيئة منحنيات و ذلك باستخدام راسم الإشارات الموجود أصلاً في SIMULINK أو على هيئة قيم تعطيها المقاييس الموجودة ضمن البرنامج .

و بعد بناء النموذج نقوم بتشغيل النموذج لعمل الـ simulation ويمكننا اختيار خصائص الـ simulation وطريقة التكامل وهذا يكون في non-real time كما يمكننا أيضا عمل محاكاة للنماذج في الـ real time وهذا باستخدام مجموعة Blocks الموجودة في باسم Xpc Target و Real Time Workshop

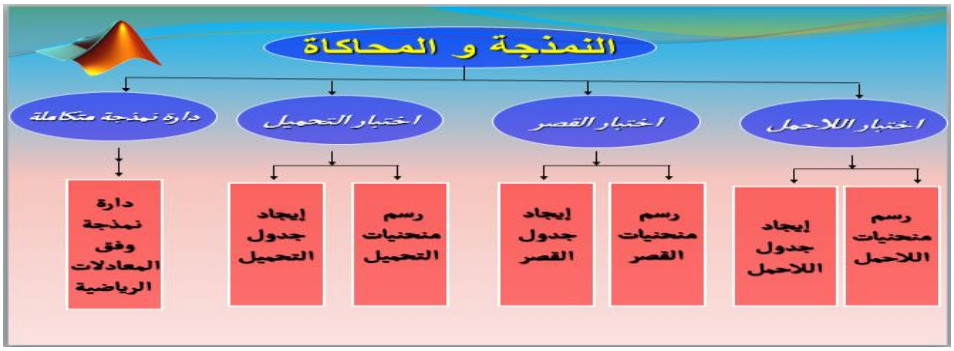
ويمكننا التحكم في الـ Simulation من خلال سطر أوامر MATLAB وهذا يكون مفيد جداً في حالة الرغبة لعمل Simulation لأكثر من نموذج ويمكن تخزين النتائج و استخدامها مع الـ Toolboxs الموجودة في MATLAB.

يمكن فتح برنامج المحاكاة من خلال الأيقونة الموجودة في شريط الأدوات أو من خلال كتابة كلمة Simulink في نافذة الـCommand window فتظهر الصورة الآتية توضح الواجهة الرئيسية :




**الشكل (6) الواجهة الرئيسية لـ simulink**

تم تصميم المخطط الصندوقي العام للبحث الذي يتضمن الاختبارات الثلاثة و نتائجها :




**الشكل (7) المخطط الصندوقي العام للبحث**

فيما يلي سنبين طريقة تشكيل الدارة في البحث وتحديد خصائص عناصرها وتنفيذها ولنأخذ **الدارة الأولى على سبيل المثال وهي اختبار اللاحمل للمحرك التحريضي :**

الغاية من الدارة محاكاة عمل المحرك التحريضي في حالة اللاحمل وتحديد تيار اللاحمل واستطاعة اللاحمل وعامل الاستطاعة ورسم المنحنيات المميزة للمحرك في هذه الحالة وهي

$$Po,Io,COS(\varphi o)=f(Uo)$$

يتم في هذه التجربة قياس استطاعة اللاحمل وتيار اللاحمل عند قيم مختلفة للتوتر المطبق .

سنبدأ بكيفية جلب Blocks المطلوبة إلى ساحة العمل فبعد طلب SIMULINK يتم فتح نافذة عمل جديدة لكي يتم العمل ضمن هذه النافذة :

1.منبع ثلاثي الطور متغير (Three-Phase Programmable Voltage Source):

وهذا المنبع موجود في مكتبة أنظمة الطاقة (SimPowerSystems) وفي صفحة المنابع الكهربائية (Sources Electrical)حيث يتم التحكم ببارامترات العناصر من خلال تعليمة الربط بين الـ GUI وال SIMULINK وقد غيرنا التوتر بـ المطال والزاوية وأيضا التردد.

2.المحرك التحريضي (Asynchronous Machine) :

وهو موجود في نفس المكتبة السابقة وفي صفحة الآلات الكهربائية (Machines) ويتم التحكم ببارامترات هذا العنصر الاسمية من توتر وتردد واستطاعة كما يتم تحديد نوع المحرك قفص سنجابي أو دائر ملفوف ونوع الوصل نجمي مثلثي من خلال الواجهة الأساسية .

3.قضيب القياس (Bus Selector) :

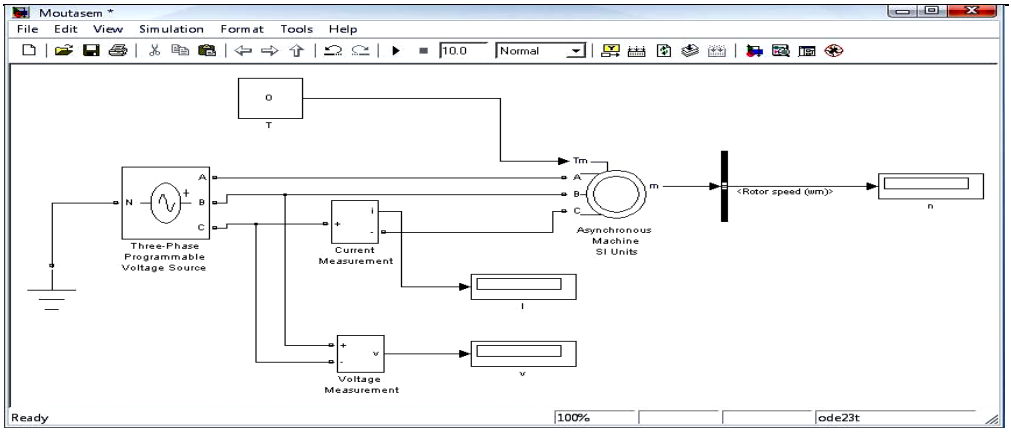
وهو موجود في القائمة الأكثر استخداماًCommonly Used Blocks حيث نستطيع من خلاله أخذ المقاييس التي نريدها للثابت والدائر (سرعة، تيار،عزم،توتر...).

4.حمولة معدومة ممثلة بعزم قيمته صفر .

5. مقاييس للتيار والتوتر المطبقين على الثابت .

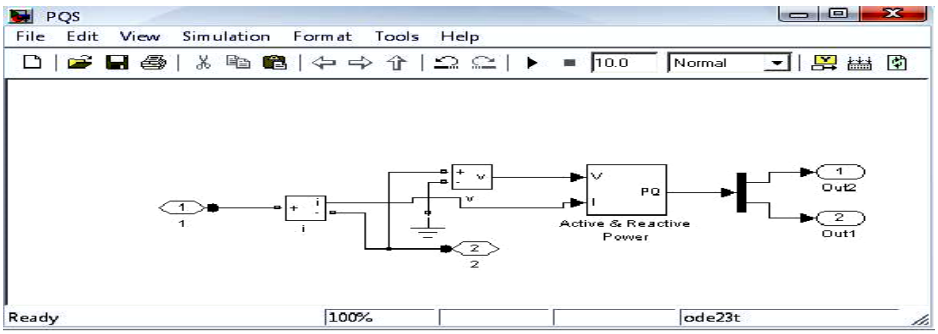
6.وصلة تأريض للمنبع الثلاثي .

7.شاشات إظهار المقاييس (Display) .




**الشكل (8) الدارة الأولية للاختبارات**

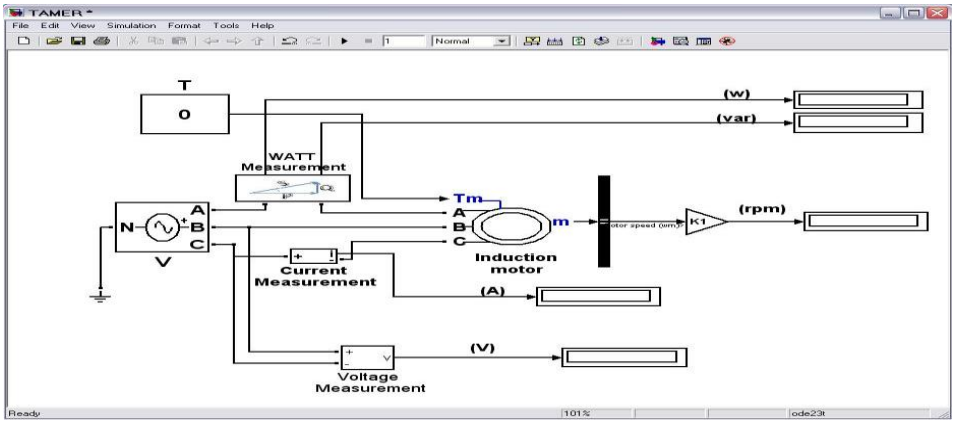
ولحساب الاستطاعة قمنا بإنشاءBlock لقياس الاستطاعة يتألف من: مقياس للتيار و مقياس للتوتر و مقياس الاستطاعة و قيمتان للخرج تعبران عن كل من الاستطاعتين الفعلية و الردية ولجعل هذه Blocks عبارة عن Block واحدة نختار منها الخيار (Craete Subsystem)




**الشكل (9) مقياس الاستطاعة المصمم للاختبارات**

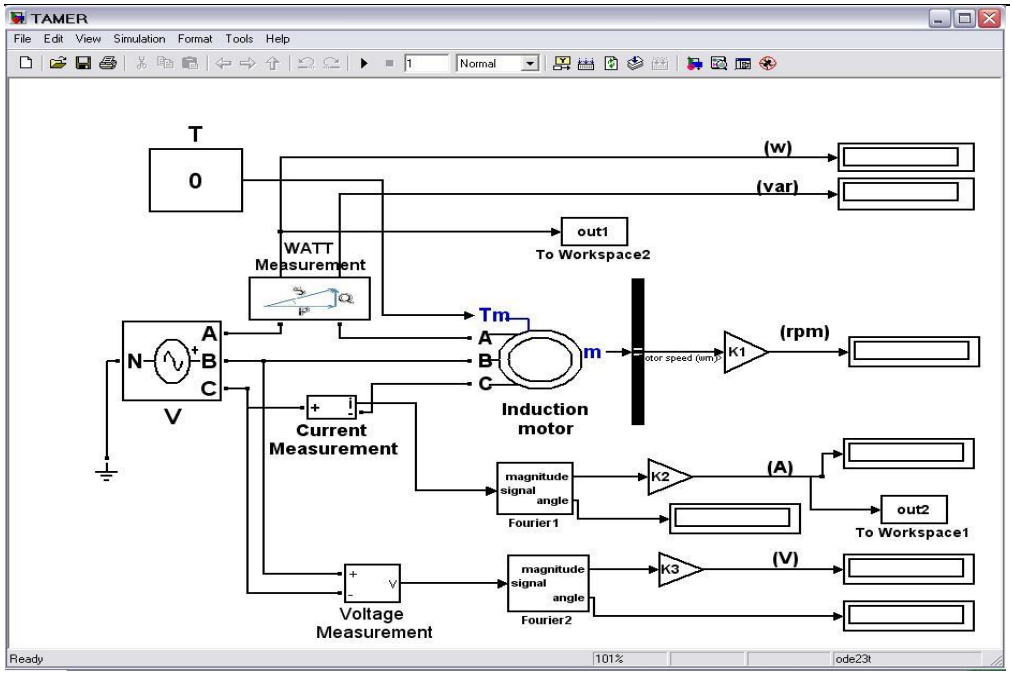
وتصبح عندها هذه الدارة كأنهاBlock واحد له قيمتين للدخل وهما التيار والتوتر وقيمتين للخرج وهما الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الرد فعلية أو الرديّة .

وعند إضافة Block حساب الاستطاعة إلى الدارة الرئيسية تصبح الدارة على الشكل التالي :




**الشكل (10) الدراة الرئيسية للاختبارات**

ولكي نستطيع رسم المنحنيات المميزة لحالة العمل على فراغ قمنا بإضافة صندوق لسحب القيم التي نريد استخدامها إلى (work space) وهو موجود في مكتبة (Simulink) في (Skins) ونغير في إعداداته بحيث تكون القيم التي يسجلها على شكل مصفوفات .ولكي تكون القيم التي يعطيها كل من مقياسي التيار والتوتر قيم فعالة دقيقة و متوافقة مع توازن الأطوار و نظام ODE23T اللاخطي ونظام الإستمرار للقيمة مع الزمن حتى الاستقرار "continous" يوضع صندوق فوريه **[13]**ويوجد هذا الصندوق في مكتبة أنظمة الطاقة (SimPowerSystems) وفي صفحة مكتبات إضافية ضمن أدوات القياس وهذا الصندوق يقوم بتحليل القيم إلى طويلة وزاوية وعلى خرجه نقسم على ( $\sqrt{3}$ ) فيصبح شكل الدارة كما :




**الشكل (11) التصميم النهائي لدارة الاختبارات**

وقد قمنا برسم بقية الدارات التي استخدمت في بحثنا بطريقة مماثلة للطريقة السابقة مع الأخذ بعين الإعتبار الخصائص المميزة لكل دارة طبقاً لعملها المطلوب .المعلومات التي يجب على الباحث أن يدخلها هي المعلومات التي توجد على اللوحة الاسمية لأي محرك تحريضي: التوتر الاسمي ، التيار الاسمي ،السرعة الاسمية ، التردد الاسمي ،الاستطاعة الاسمية ، عامل الاستطاعة ، نوع المحرك التحريضي وطريقة توصيل ملفات الثابت للمحرك .

وقد قمنا بتزويد البرنامج بعدد من هذه اللوحات المأخوذة من لوحات اسمية لمحركات تحريضية لكي يستطيع من يستخدم البرنامج لأول مرة أن يتعرف عليه بحيث تكون المنحنيات والقيم التي يظهرها البرنامج صحيحة ومتناسقة بالنسبة لهذه المحركات .

لتغيير بارامترات أي عنصر موجود في SIMULINK إلى قيم يريدها المبرمج أو المستخدم نستخدم التعليمة التالية :set_param('اسم العنصر','القيم المطلوب تغييرها',[القيم الجديدة])

بعد تشغيل البرنامج نختار ملف – فتح ونختار ملف (محاكاة)فتظهر النافذة بالشكل التالي بعد إدخال القيم الافتراضية المأخوذة من لوحة اسمية للمحرك المراد اختباره من الملف :




**الشكل (12) الواجهة الرئيسية لإدخال بارامترات اللوحة الاسمية**

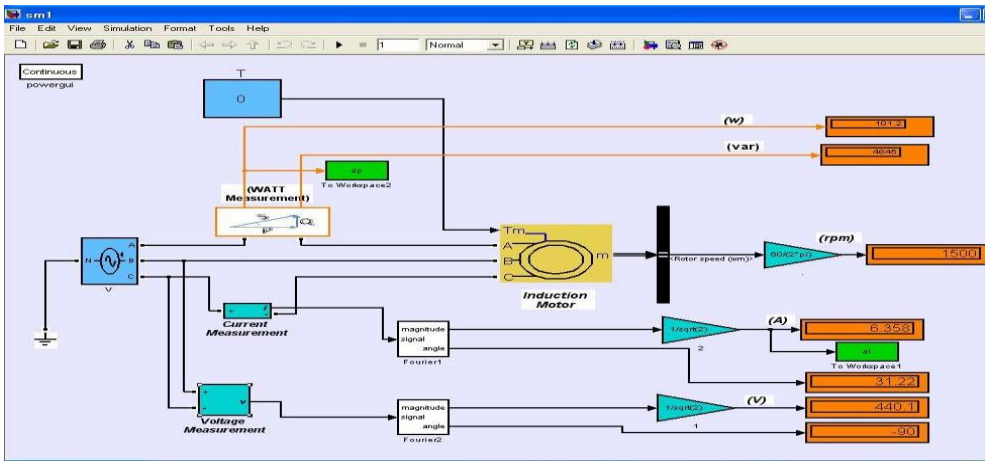
عند الضغط على زر نمذجة المحرك التحريضي ننتقل للصفحة التالية :




**الشكل (13) واجهة محاكاة الاختبارات الرئيسية الثلاثة**

**أولاً:اختبار اللاحمل:**

نضغط على"محاكاة اختبار اللاحمل" فتظهر الدارة التالي و بالضغط على "Enter" تعمل :




**الشكل (14) دارة اختبار اللاحمل**

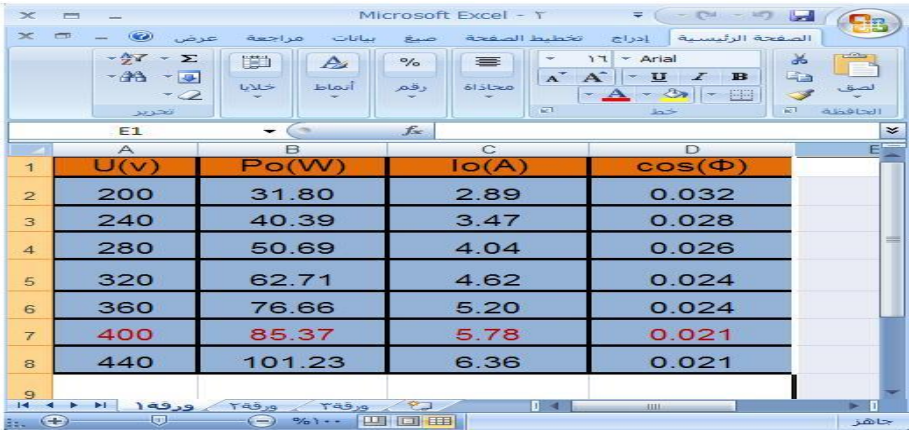
عند تنفيذ (عمل) الدارة نلاحظ أن البرنامج يقوم في كل خطوة بإعطاء قيمة للتوتر وهي من 0.5- Un (1.1) ويحاكي الدارة مع بقاء قيمة العزم المطبق مساوية للصفر (أي بدون حمل) في كل مرحلة و يقيس بالمقابل قيم التيار و الاستطاعة ويحفظها بذاكرته وذلك لاستدعائها عند حساب العلاقات و رسم المنحنيات ، وبعد الانتهاء من عمل الدارة نضغط على "نتائج الاختبار" فتظهر لنا النتائج الأولية من التجربة وهي عناصر الدارة الفرعية للدارة المكافئة :




**الشكل (15) نتائج محاكاة دارة اللاحمل**

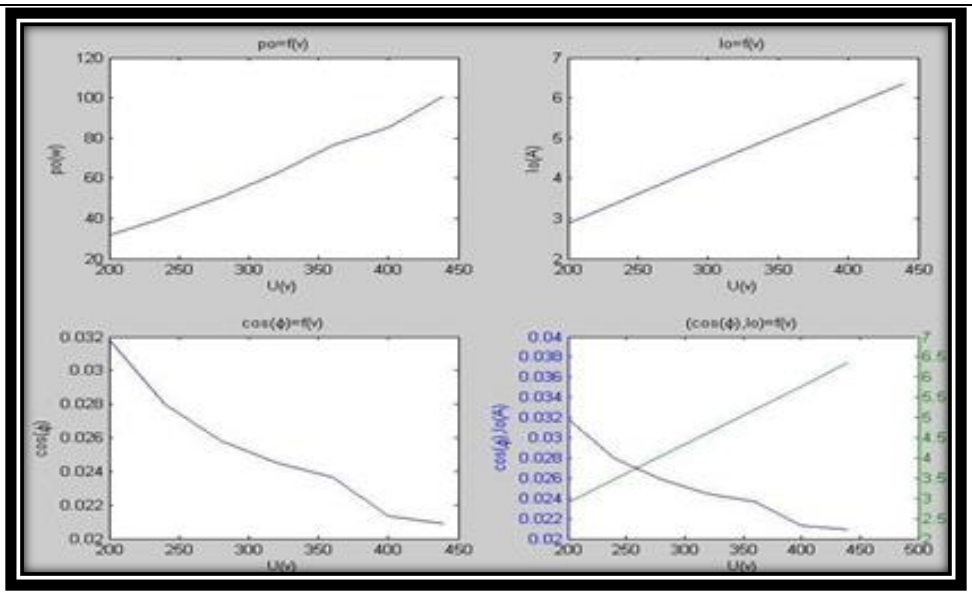
ويمكن إظهار جدول النتائج بالضغط على "جدول اللاحمل" فيظهر الجدول التالي :

**الجدول (2) جدول نتائج محاكاة دارة اللاحمل**




| U(v) | Po(W) | Io(A) | cos(Φ) |
|---|---|---|---|
| 200 | 31.80 | 2.89 | 0.032 |
| 240 | 40.39 | 3.47 | 0.028 |
| 280 | 50.69 | 4.04 | 0.026 |
| 320 | 62.71 | 4.62 | 0.024 |
| 360 | 76.66 | 5.20 | 0.024 |
| 400 | 85.37 | 5.78 | 0.021 |
| 440 | 101.23 | 6.36 | 0.021 |

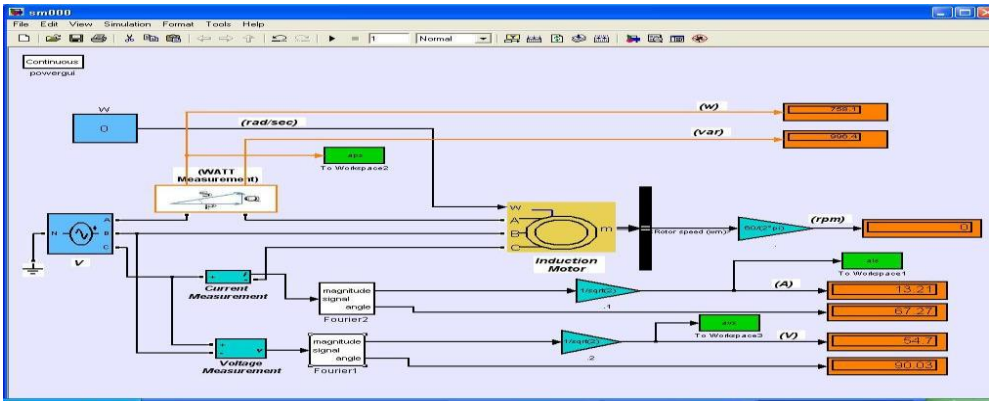
ويمكن إظهار منحنيات اللاحمل بالضغط على "منحنيات اللاحمل" فيقوم البرنامج برسم المنحنيات تبعاً لقيم نتائج الدارة حيث نلاحظ ازدياد تيار اللاحمل مع زيادة التوتر المطبق:




**الشكل (16) منحنيات نتائج دارة اللاحمل**

**ثانياً :اختبار القصر (Short Circuit Test) :**

الغرض من الاختبار تحديد الممانعات التسريبية (Leakage Reactances) والمقاومات :




**الشكل (17) دارة اختبار القصر**

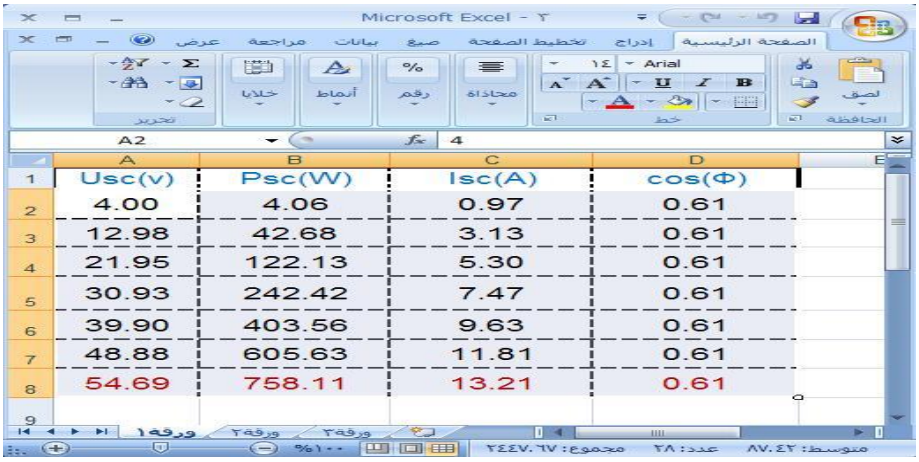
يتم تنفيذ الاختبار والمحرك في حالة كبح حيث طبقنا عليه سرعة زاوية معدومة ($\omega = 0$) و يتم في كل خطوة إعطاء قيمة للتيار وهي من (0 وحتى $Isc$ )حيث يكون( $Isc = In$) فقط لتجنب الاجهادات الحرارية و يقيس بالمقابل قيم التوتر والتيار و الاستطاعة ويحفظها بذاكرته وذلك لاستدعائها عند حساب العلاقات و رسم المنحنيات ، و بعد الانتهاء من عمل الدارة نضغط على زر "نتائج الاختبار" فتظهر لنا النتائج الأولية :




**الشكل (18) نتائج محاكاة دارة القصر**

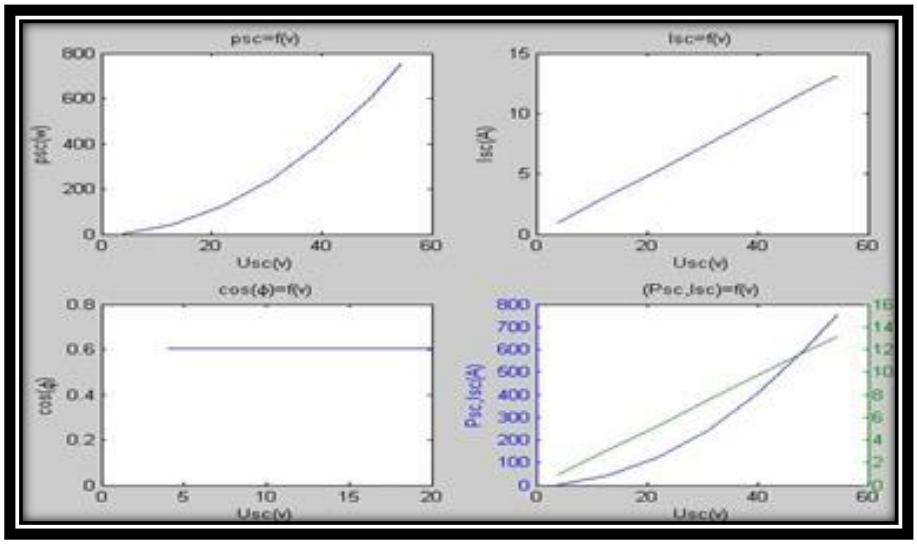
ويمكن إظهار جدول النتائج بالضغط على "جدول القصر" فيظهر الجدول التالي :

**الجدول (3) جدول نتائج محاكاة اختبار القصر**



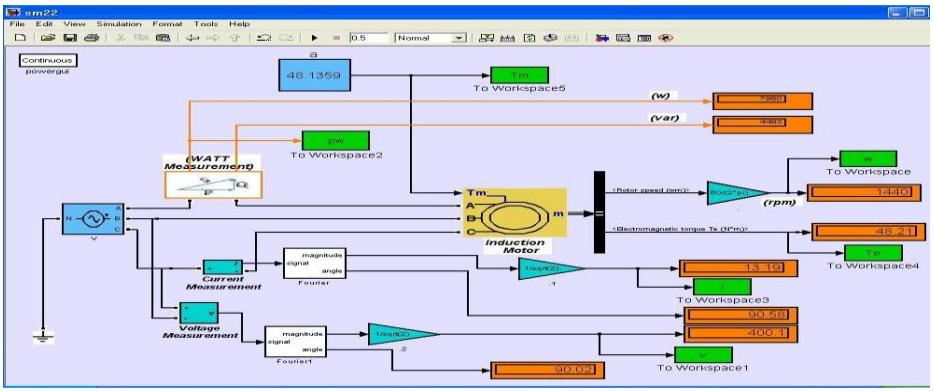
| Usc(v) | Psc(W) | Isc(A) | cos(Φ) |
|---|---|---|---|
| 4.00 | 4.06 | 0.97 | 0.61 |
| 12.98 | 42.68 | 3.13 | 0.61 |
| 21.95 | 122.13 | 5.30 | 0.61 |
| 30.93 | 242.42 | 7.47 | 0.61 |
| 39.90 | 403.56 | 9.63 | 0.61 |
| 48.88 | 605.63 | 11.81 | 0.61 |
| 54.69 | 758.11 | 13.21 | 0.61 |

ويمكن إظهار منحنيات القصر بالضغط على "منحنيات القصر" فيقوم البرنامج برسم المنحنيات تبعاً لقيم نتائج الدارة حيث نلاحظ ثبات عامل الاستطاعة مع زيادة تيار القصر:




**الشكل (19) منحنيات نتائج محاكاة دارة القصر**

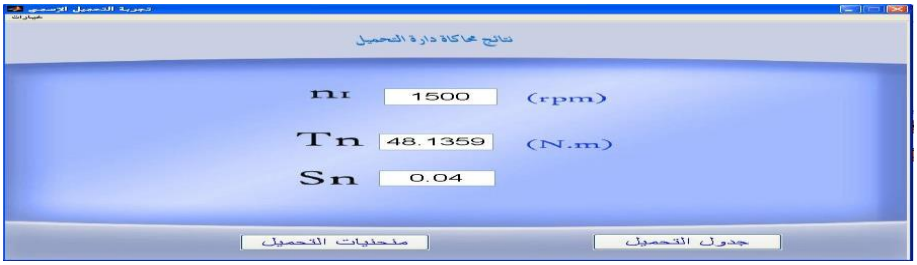
**ثالثاً :اختبار التحميل (Load Test) :**




الغرض من الاختبار قياس الأداء الكامل للمحرك تحت ظروف التشغيل الفعلية :

**الشكل (20) دارة اختبار التحميل**

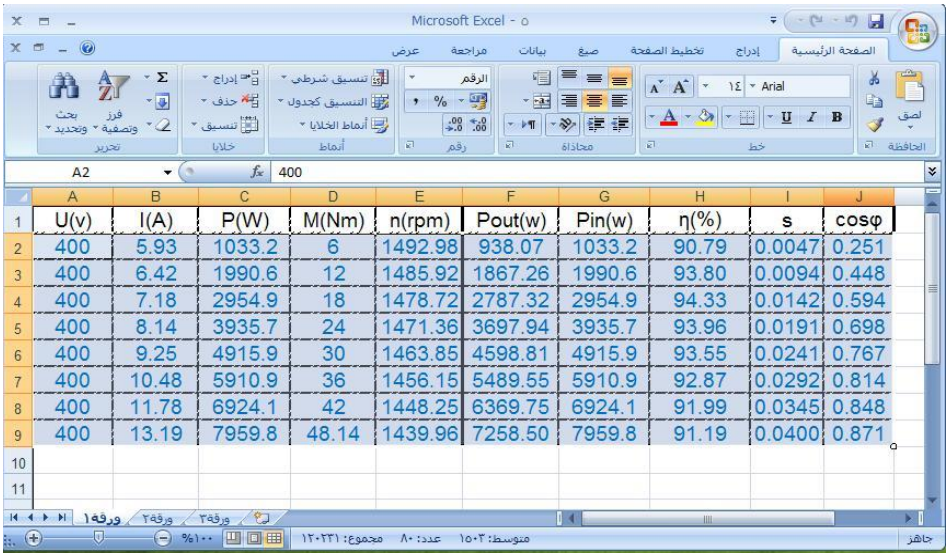
ونقوم بتنفيذ هذا الاختبار بتغيير حمولة المحرك وتثبيت قيم التوتر والتردد وذلك من خلال تغيير العزم المطبق على المحرك من (0 وحتى Tn) وفي كل مرة يقوم البرنامج بقياس التيار والتوتر والسرعة وعزم الخرج (العزم الميكانيكي) ويسجل القيم في ذاكرته ليستفيد منها في رسم المنحنيات المميزة لحالة عمل المحرك ، وبعد الانتهاء من عمل الدارة نضغط على زر "نتائج الاختبار" فتظهر لنا النتائج الأولية :




**الشكل (21) نتائج محاكاة دارة التحميل**

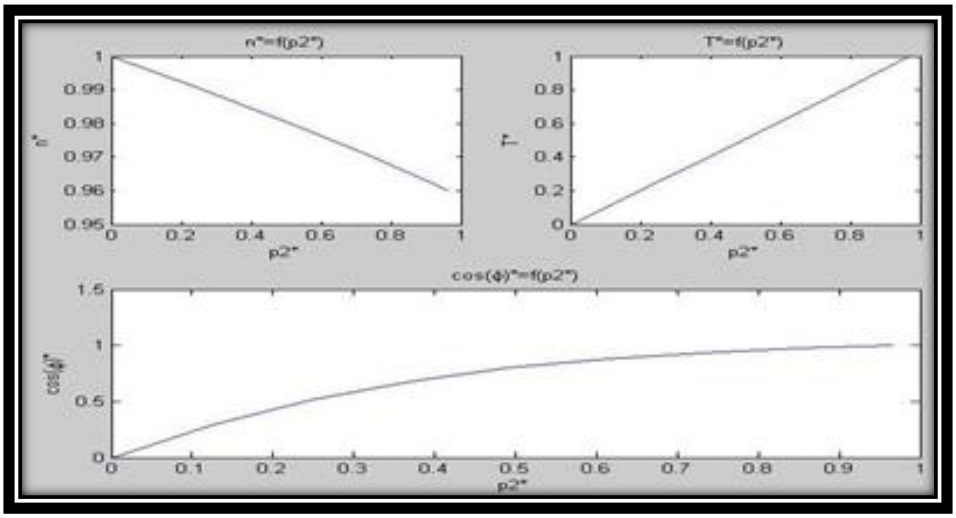
ويمكن إظهار جدول النتائج بالضغط على "جدول القصر" فيظهر الجدول التالي :

**الجدول (4) جدول نتائج محاكاة دارة التحميل**



| U(v) | I(A) | P(W) | M(Nm) | n(rpm) | Pout(w) | Pin(w) | η(%) | s | cosφ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 400 | 5.93 | 1033.2 | 6 | 1492.98 | 938.07 | 1033.2 | 90.79 | 0.0047 | 0.251 |
| 400 | 6.42 | 1990.6 | 12 | 1485.92 | 1867.26 | 1990.6 | 93.80 | 0.0094 | 0.448 |
| 400 | 7.18 | 2954.9 | 18 | 1478.72 | 2787.32 | 2954.9 | 94.33 | 0.0142 | 0.594 |
| 400 | 8.14 | 3935.7 | 24 | 1471.36 | 3697.94 | 3935.7 | 93.96 | 0.0191 | 0.698 |
| 400 | 9.25 | 4915.9 | 30 | 1463.85 | 4598.81 | 4915.9 | 93.55 | 0.0241 | 0.767 |
| 400 | 10.48 | 5910.9 | 36 | 1456.15 | 5489.55 | 5910.9 | 92.87 | 0.0292 | 0.814 |
| 400 | 11.78 | 6924.1 | 42 | 1448.25 | 6369.75 | 6924.1 | 91.99 | 0.0345 | 0.848 |
| 400 | 13.19 | 7959.8 | 48.14 | 1439.96 | 7258.50 | 7959.8 | 91.19 | 0.0400 | 0.871 |

ويمكن إظهار منحنيات التحميل فيقوم البرنامج برسم المنحنيات تبعاً لقيم نتائج الدارة :




**الشكل (22) منحنيات نتائج محاكاة دارة التحميل**

حيث نلاحظ مع زيادة العزم المطبق على الخرج يزداد سحب التيار و تنخفض السرعة

## 7-تحليل نتائج اختبارات المحاكاة باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي :

يعتبر دمج الذكاء الاصطناعي مع محاكاة المحرك التحريضي من أحدث الأبحاث في الهندسة الكهربائية و يسمى التوأم الرقمي المعزز بالذكاء الاصطناعي .

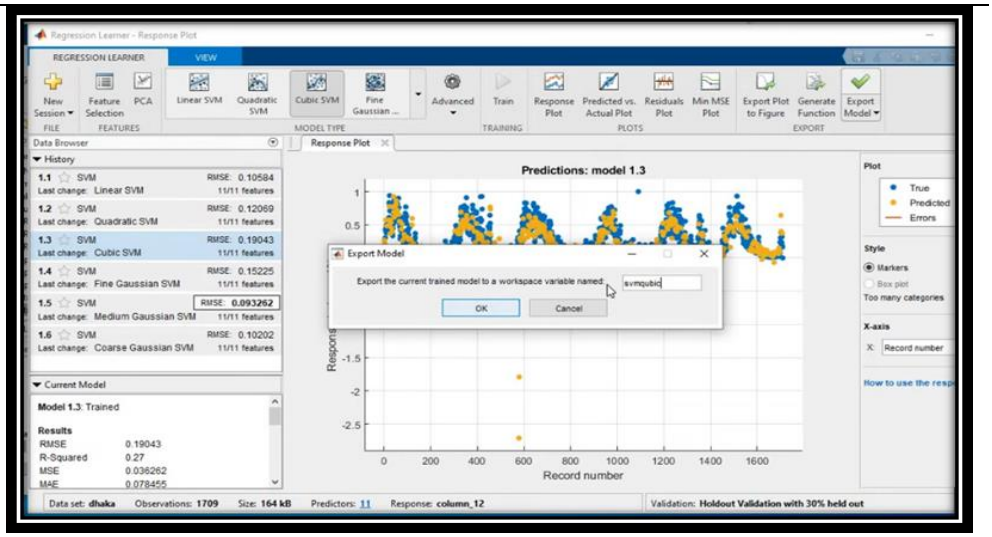
الهدف من استخدم أدوات الذكاء الاصطناعي هو فهم الكميات الهائلة من بيانات المحاكاة و استخلاص العلاقات بين التصميم و الأداء و التنبؤ بسلوك المحرك في ظروف لم تتم محاكاتها بعد كما يمكن تحليل الأعطال و تحسين التصميم ( optimization ) بتحقيق افضل موازنة بين ( أعلى عزم بأقل حرارة و أقل وزن و اقل تكلفة ) **[16]**.

بعد تصميم النموذج و اجراء المحاكاة نقوم بتنظم المخرجات في قاعدة البيانات حيث أن المدخلات هي بارمترات التصميم للوحة الاسمية و المخرجات هي نتائج المحاكاة من تيار و عزم و معامل قدرة و....**[14]** **[15]**.

لاختيار أداة الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات حيث سنحتاج إلى بيئة برمجية تستطيع قراءة بيانات المحاكاة و تطبيق خوارزميات الذكاء الاصطناعي عليها نجد أن الأداة **Regression Learner** الأقوى و الأكثر مرونة سواء بمقارنته مع أدوات الذكاء الاصطناعي للمحادثة العامة أو أدوات الذكاء الاصطناعي المختصة بتحليل البيانات و الاحصاءات للأرقام العامة لذا تم اعتماده في هذا البحث .

**Regression Learner :** تتيح لنا هذه الأداة استرداد البيانات مباشر من Excel أو Workspace كما يمكن تجربة العشرات من النماذج بنقرة زر و مقارنة أدائها بشكل تلقائي كما تصور النتائج برسوم بيانية تفاعلية و يتم تصدير النموذج النهائي إلى كود**[17]**.

نقوم باستيراد جداول البيانات التي تعبر عن برامترات التصميم من Predictors و نأخذ النتيجة المرجوة من Response لنحصل على نمذج ذكاء اصطناعي يتنبأ بكفاءة التصميم في أجزاء من الثانية .




**الشكل (23) أداة الذكاء الاصطناعي Regression Learner**

تم تقديم النموذج الاولي للأداة Regression Learner في الاصدار MATLAB R2017 لذا فإنها غير متوفرة في الإصدارات القديمة كما يجب تثبيت Statistics and Machine Learning Toolbox لضرورة التشغيل **[18]**.

كما يمكننا استخدام Response plot و predicted vs Actual لمعرفة أي بارمتر في تصميم المحرك هو الأكثر تأثيراً على الأداء ، كما يمكن اجراء تدريب تلقائي لجميع النماذج مع جدول مقارنة لاختيار الأفضل من خلال TRAIN ALL . Scatter Plot : لبيان مدى دقة التنبؤات مقارنة بالمحاكاة الحقيقية حيث كلما اقتربت النقاط المرسومة من الخط البياني كان النموذج أفضل . Residuals Plot : يوضح لنا بالضبط أخطاء النموذج المقترح .

أخيراً نقوم بالتصدير إلى workspace لاستخدام الفوري أو إلى Simulink للمحاكاة كما يمكن انشاء كود برمجي في MATLAB . الخطوات العملية للبحث :

1) نجهز البيانات في ملف Excelو نفتحMATLABو نكتب regression Learner
2) نسترد البيانات بالظغط على New Session و نختر الجداول مع تحديد متغيرات الادخال و متغيرات الإخراج .

3) نختر مجموعة نماذج (مثلاً All Trees ) ثم نضغط Train .
4) نقارن بجدول الدقة RMSE , R-squared في القائمة اليمنى .
5) نحسن من الاعدادات بتجريب نماذج أخرى غير خطية مثلاً .
6) بعد اختيار أفضل نموذج نضغط على Export Model .

```
% استيراد البيانات
data = readtable('نتائج_محاكاة_المحرك.xlsx');
% تحديد المدخلات والمخرجات
predictors = data{:, {'تيار_التغذية' ,'عدد_اللفات' ,'
response = data.كفاءة_المحرك;
% تدريب نموذج (Bagged Trees = Random Forest)
model = fitrensemble(predictors, response, 'Me
% تقييم النموذج
predictions = predict(model, predictors);
plot(response, predictions, 'o');
xlabel('القيم الحقيقية'); ylabel('القيم المتوقعة');
```

إن قيم RMSE و R-squared تعتبران مقاييس إحصائية تستخدم لتقييم أداء النماذج :

1- **RMSE** هو متوسط حجم أخطاء النموذج Root Mean Square Error أي مقدار الاختلاف بين توقعات النموذج و القيم الفعلية في المتوسط و في بحثنا وصلنا لقيم صغيرة تتراوح بين 1.0 إلى 1.5 من وحدات القيم المقاسة في مختلف نماذج اختبارات المحرك الاحمل و القصر و التحميل أي قريبة جداً من القيم الحقيقية بدون قيم شاذة.

2- **R-squared** : هو مقياس لنسبة التباين في القيم الحقيقية التي يفسرها النموذج و في بحثنا وصلنا لقيم مرتفعة تصل إلى 0.92 أي تفسر أكثر من 92 % لمعظم القيم .

و بالتالي تعتبر النماذج المستنتجة ضمن البحث جيد و يمكن الاعتماد عليها بناءاً على قيم RMSE المنخفضة المعبرة عن حجم الخطأ بالوحدات الملموسة و قيم R-squared المرتفعة المعبرة عن الكفاءة ، و بمقارنتها مع الأبحاث السابقة **[5]** و **[6]** و **[7]** الحديثة نجدها أفضل و

أحسن مع امكانية التطوير و التوسع المستقبلي، و كمثال عن النتائج يوضح الجدول التالي (5) مقارنة بين قيمة Req المحاكاة و المخبرية في اختبار اللاحمل :

| اختبار اللاحمل | simulation | experiment | Error % |
|---|---|---|---|
| Req | 1.44 Ω | 1.43 Ω | 0.70 % |

**8-مجال الذكاء الاصطناعي المعتمد في البحث و الخوارزمية المستخدمة لتحليل النتائج :**

إن من أهم التحديات الحديثة التي تواجه النمذجة والمحاكاة هي التكامل مع الذكاء الاصطناعي لذا تم الاعتماد على الأداة **Regression Learner** في مجال التعلم الآلي "**خوارزمية تعلم الانحدار**" التي تنسجم مع بيئات البرمجة مثلMATLAB و تستخدم لتدريب ومقارنة نماذج الانحدار حيث أنها مصممة لتبسيط عملية تعلم الآلة بدلاً من كتابة أكواد معقدة ، يمكننا من خلالها استيراد البيانات و تدريب النماذج و مقارنتها و تحسينها حيث أن :

- **الانحدار :(Regression)** هي تقنية إحصائية تُستخدم للتنبؤ بقيمة عددية مستمرة بناءاً على بيانات وعلاقات سابقة.
- **المتعلم :(Learner)** في التعلم الآلي(Machine Learning) ، تعني "الخوارزمية" أو "النموذج" الذي يتعلم من البيانات لإجراء هذه التنبؤات .

أهم ميزات هذه الاداة : واجهة سهلة – تدريب تلقائي – تقييم النماذج و مقارنتها عبر جزر متوسط مربع الخطأ RMSE و معامل التحديد R-squared – التحسين optimization

كما يمكن تصدير النموذج بإرساله إلى ساحة العمل و إنشاء كود برمجي في الماتلاب مع إمكانية النشر في Simulink .

لذا تعتمد هذه الأداة على تقنيات تعلم الآلة **Machine Learning** بهدف التنبؤ بالقيم المستمرة بناءاً على مجموعة مدخلات حيث تتعلم النماذج العلاقة بين هذه المتغيرات .

**سنوضح بالجدول التالي ( 6 ) مقارنة بين الخوارزميات المختلفة حسب المعيار :**

| المعيار | تعلم الآلة Regression Learner | الأنظمة الخبيرة Expert Systems | التحكم الضبابي Fuzzy logic | الشبكات العصبونية Neural networks |
|---|---|---|---|---|
| مصدر المعرفة | البيانات الرقمية | خبرة الإنسان | معرفة غامضة | البيانات |

| طبيعة المعرفة | تعلم ضمني | منطق ثنائي | منطق متعدد | صندوق أسود |
|---|---|---|---|---|
| الشفافية و التفسير | متوسطة إلى عالية | عالية جداً | عالية جداً | منخفضة جداً |
| المرونة و التعلم | قوية جداً | ضعيفة جداً | متوسطة | قوية جداً جداً |
| متطلبات التشغيل | بيانات كثيرة | خبراء | معرفة مهندس | بيانات ضخمة جداً |

كما توفر لنا هذه الأداة مجموعة واسعة من الخوارزميات الجاهزة أهمها :

- الانحدار الخطي(Linear Regression):التنبؤ بقيم مستمرة باستخدام علاقة خط مستقيم .
- **أشجار القرار للانحدار (Regression Trees):**توقع القيم عبر تقسيم البيانات إلى بنية هرمية تشبه الشجرة وهي الخوارزمية التي تم اعتمادها ضمن نماذج الاختبارات في بحثنا.

الفكرة الأساسية هي تقسيم مساحة البيانات إلى مناطق أصغر فأصغر بحيث تصبح البيانات في كل منطقة متجانسة من حيث قيمة المخرج ، لتتنبأ الخوارزمية بقيمة رقم مستمر مثل عزم المحرك تسير الخوارزمية في الشجرة من الجزر إلى أقرب ورقة بناءاً على قيم المدخلات ثم تخرج القيمة المخزنة في تلك الورقة و هي غالباً متوسط قيم جميع نقاط التدريب التي وصلت إلى تلك الورقة ، كما تعتمد أشجار القرار على خوارزمية CART ( CLASSIFICATION AND REGRESSION TREES ) تعمل على قياس النقاء باستخدام التباين و تختار أفضل تقسيم عند الانتقال من العقدة الأم إلى عقد الأبناء .

يكمن دور الخوارزمية في تحليل نتائج المحاكاة بما يلي :

1) تقدير بارامترات النموذج MODEL PARAMETER ESTIMATION :يتم تدرب الشجرة على قاعدة بيانات ضخمة لمحركات حقيقية تربط بين بيانات بسيطة من كتالوج المصنع (استطاعة ، السرعة ، معامل القدرة ، .....) و بين البارامترات الدقيقة للنموذج و هذه الطريقة تكون أسرع و أقل حساسية لأخطاء القياس .
2) التحقق من صحة النموذج MODEL VALIDATION : يتم تدريب شجدرة القرار على بناء نموذج بديل باستخدام بيانات مأخوذة من محاكاة مرجعية معروفة الدقة أو من قياسات

مخبرية فعلية على محرك حقيقي (تيار ، جهد ، ...) و يصبح هذا النموذج المدرب هو المقياس الأساسي المرجعي .

من خلال استخدامنا لهذه الأداة تم تحسين المحاكاة عن طريق تحديد أفضل المتغيرات حيث توفر لنا رسوم بيانية لمدى تأثير كل متغير (جهد ، عزم ، ...)على المخرج ،كما تم فهم القرارات حيث يمكننا رؤية شجرة القرار كمخطط انسيابي يمنحنا الثقة في منطق النموذج بعكس الشبكات العصبونية ،كما تم اختيار النموذج المناسب اعتماداً على مقياس RMSE .

عند التطبيق العملي جمعنا البيانات ضمن جداول وجعلنا أعمدة المدخلات تمثل ظروف التشغيل حسب نوح الاختبار و أعمدة المخرجات القيم المستهدفة ثم بعد فتح الأداة من تبويب APPs قمنا باستيراد البيانات و حددنا المخرجات كـ Respone و الباقي كـ predictors ، و في التدريب و الاختيار قمنا باختيار عدة نماذج Trees و قارن بينها بمقياس RMSE .

**9-النتائج و مناقشتها :**

1) أثبت هذا البحث أن النمذجة الرياضية و المحاكاة الحاسوبية ليستا مجرد أدوات نظرية بل هما عمودا التصميم الحديث لأنظمة القيادة الكهربائية. تبدأ الرحلة بنموذج دقيق ومعقد في الإطار الطبيعي ABC، ثم يتم تبسيطه عبر تحويل بارك إلى نموذج dq القابل للتحكم، وأخيراً يتم اختبار وتنقيح هذا النموذج وأي خوارزميات تحكم مصممة له في بيئة محاكاة آمنة ومرنة مثل Simulinkولضرورة تحقيق أقصى كفاءة ستستمر النمذجة والمحاكاة في التطور نحو مزيد من الدقة و السرعة والتكامل بين التخصصات .
2) أظهرت النتائج أن محاكاة اختبارات المحرك التحريضي في MATLAB يوفر الوقت ويقلل من الجهد المطلوب من الباحث ، مما يجعل المنصة المقترحة أكثر كفاءة . علاوة على ذلك، أظهر المحرك التحريضي أداءً مستقراً فيما يتعلق بالتيار و الطاقة الفعالة و الغير الفعالة و معامل القدرة ، أخيراً قورنت نتائج التقنية المقترحة بنتائج المعايير المقاسة وتبين أنها توفر تقديرات دقيقة بانحراف لا يتجاوز ±2% عن المعايير المقاسة.
3) أوضحت نتائج محاكاة اختبار اللاحمل قيم تيار العمل على فراغ و الضياعات الأساسية بالإضافة لجدول اللاحمل و منحنيات العمل على فراغ .

4) أوضحت نتائج محاكاة اختبار القصر الممانعات والمقاومات التسريبية بالإضافة إلى جدول القصر و منحنيات العمل على القصر .
5) أوضحت نتائج محاكاة اختبار التحميل العزم و الانزلاق و السرعة الإسمية بالإضافة إلى جدول التحميل و منحنيات العمل عند حالات مختلفة .
6) أظهر تحليل نتائج محاكاة الاختبارات عن طريق أداة الذكاء الاصطناعي Regression Learner مرونة علية و انسيابية كبير في التعديل و المقارنة ، مما يحفز الباحثيين على استخدام هذه الأداة بشكل دائم مع أي عملية محاكاة مستقبلية .
7) لربط الأسس النظرية بالتطبيق العملي وفرت المحاكاة المقترحة للاختبارات الافتراضية بيئة آمنة وفعالة للطلاب لتعلم طرق الاختبارات و تحليل النتائج في الآلات الكهربائية .

## 10-الاستنتاجات و التوصيات :

1) مع توافر أدوات الذكاء الاصطناعي Artificial Intelligence Tools المجانية و المدفوعة و توافر البرامج الهندسة التخصصية المدعومة من AI أصبح من الممكن التوسع في نمذجة و محاكاة أي نوع من أنواع الآلات الكهربائية و بطريقة الذي يريدها البحث عن طريق تصميم برنامج عام وشامل مع ضمان نتائج دقيقة للمخرجات و سرعة عالية في المحاكاة إضافة لسهولة التعامل وحسن الإظهار .
2) بالطرق التقليدية الباحث مُحكم بعدد المقايس و الأجهزة ومنصة التجارب أما بالبرنامج فيوجد مرونة أكبر حيث يمكننا إضافة أو حذف أي مقياس أو جهاز بكل سهولة .
3) بالطرق التقليدية النتائج تقريبية وليست دقيقة بسبب عمر التجهيزات و كفاءتها ، أما بالبرنامج فالنتائج ذات دقة عالية جداً وحساسة لأي تغير بسيط (خاصة simulink )
4) بالطرق التقليدية يوجد خطورة على المستخدم لتماسه المباشر مع الآلة و الضغط على الأزرار و القواطع الكهربائية و أي خطأ بالتوصيل يمكن أن يسبب خطورة كبيرة على الأجهزة و المستخدم

، أما بالبرنامج فيكتفي بالضغط على زر لوحة المفاتيح لإنجاز أي عملية فالأمور أكثر أماناً و أسهل تعاملاً .

5) بالطرق التقليدية هناك كلفة عالية جداً ثمن الآلات و الأجهزة و المقاييس وهذا يتناسب مع كفاءتها ، أما بالبرنامج فالجانب الإقتصادي واضح ...

6) نوصي بتطبيق مختلف طرق الإقلاع بدارات محاكاة بـ(SIMULINK) و استخلاص القيم من المحاكاة و وضعها ضمن جدول ومن ثم رسم منحنيات الإقلاع(w=f(T,I)).

7) نوصي بتطبيق مختلف أنظمة الكبح بدارات محاكاة بـ(SIMULINK) و استخلاص القيم من المحاكاة و وضعها ضمن جدول ومن ثم رسم منحنيات الكبح المختلفة (w=f(T,I)).

8) نوصي بزيادة عدد الأبحاث المستقبلية المتعلقة بالاستفادة من أدوات الذكاء الاصطناعي و تطبيقاته في النمذجة والمحاكاة لمختلف أنواع الآلات الكهربائية .

## المراجع (References )


1) الدكتور المهندس جرجس سليم سعادة . الآلات الكهربائية 4 الآلات التحريضية . جامعة حمص

2) Chitra, V.; Prabhakar, R. (**2006**) – **Induction motor speed control using fuzzy logic controller** – World Acad. Sci. Eng. Technol. 17–22.

3) Elnaghi, B.E.; ( **2019**) – **Load test of induction motors based on PWM technique using genetic algorithm**– Int. J. Eng. Manuf.

4) Jirdehi, M.A.; Rezaei, A. (**2016**) – **Parameters estimation of squirrel**–**cage induction motors using ANN and ANFIS**– Alex. Eng. J357–368.

5) Nurfatihah Syalwiah Rosli , Rosdiazli Ibrahim , Idris Ismail , Madiah Omar (**2022**)– **Modeling of high voltage induction motor cooling system using linear regression mathematical models** – research article/plos one/Malaysia–p.24

6) Pradeep Katta , Karunanithi Kandasamy , Ramesh Subramanian and Chandrasekar Perumal (2022)- **Regression Based Performance Analysis and Fault Detection in Induction Motors by Using Deep Learning Technique** - Vol. 11 N. 3 / India .

7) Kehinde Adeleye Makinde , Mutiu Shola Bakare , Uthman Oluwatosin Zubair (2023) - **Simulation based testing and performance investigation of induction motor drives using matlab Simulink** -SN Applied Sciences/journal p.14 .

8) Wang, H.; Chau, K.; Lee, C.H.; Cao, L.; Lam, W.H. ( 2020) - **Design, Analysis, and Implementation of Wireless Shaded-Pole Induction Motors IEEE Trans** - Ind. Electron. 6493–6503.

9) Rahaman, N.; Govindraju, H. (2014) -**Modeling and Simulation of a Three-Phase Electric Traction Induction Motor Using MATLAB/ Simulink**- Int. J. Electr. Electron. Comput.

10) Rajput, S.; Bender, E.; Averbukh, M. ( 2020) - **Simplified algorithm for assessment equivalent circuit parameters of induction motors**- IET Elec. Power Appl. 14, 426–432.

11) Maleki, M.G.; Chabanloo, R.M.; Farrokhifar, M. (2019) -**Accurate coordination method based on the dynamic model of overcurrent relay for industrial power networks taking contribution of induction motors into account**- IET Gener. Transm. Distrib., 645–655.

12) Duan, N.; Ma, X.; Lu, S.;Wang, S.; Wang, S. (2021) -**Simulation Calculation of Loss of Induction Traction Motor**- In The Proceedings of the 9th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 599–606.

13) Elnaghi, B.E.; Mohammed, R.H.; Dessouky, S.S.; Shehata, M.K. (2019) –**Load test of induction motors based on PWM technique using genetic algorithm**– Int. J. Eng. Manuf. 9, 1.

14) Iegorova; Miroshnyk ; Savchenko. (2020) –**Improving the accuracy of determining the parameters of induction motors in transient starting modes**– Energetika 66, 15–23.

15) Chen, J.; Severson, E.L. (2019) –**Design and modeling of the bearingless induction motor**– In Proceedings of the IEEE International Electric Machines Conference (IEMDC), San Diego, USA, pp. 343–350.

16) Goolak, S.; Gubarevych, O.; Yermolenko, E.; Slobodyanyuk, M.; Gorobchenko, O.( 2020) – **Mathematical modeling of an induction motor for vehicles**– East. J. Enterp. Technol. 2, 104.

17) Hameed H. S., Al Azze Q., and Hasan M. S., (2023)–**Speed control of switched reluctance motors based on fuzzy logic controller by MATLAB / Simulink**– vol. 31, no. 2, pp. 647–657,doi:10.11591/ijeecs.

18) Giuseppe Ciaburro , (2024) **– MATLAB for Machine Learning –** part 4 , from classic methods to deep learning , new verision .