

## Modeling and Designing a Drive System of IM with Scalar Control (v/f const. By Controlling the Slip and Using Microcontroller PIC

Nawal Ali Esmaeel\*

(Received 16 / 8 / 2022. Accepted 21 / 12 / 2022)

### □ ABSTRACT □

This paper concentrates on designing a Scalar Control (V/F Control) to drive a Squirrel Cage Induction Motor IM tri-phase, operating in four-quadrants, according to the V/F= constant by controlling the slip, using the Pulse Width Modulation (PWM) of a IGBTs voltage source inverter, that uses Microcontroller for controlling magnitudes both frequency and voltage according to V/F const. In order to keep the flux constant, and to keep the max value of torque constant with changing loads.

We have defined the operating conditions for the electrical drive system and then designed the PI Controller, Limeter and Voltage controller for generating trigger signals that control the switches of inverter using the PWM principal by using PIC Microcontroller, and using the Simplorer11 program (Full version).

We have identified advantages and disadvantages of this system, which give fast response during transient conditions (start up- brake), and better performance, so raising the efficiency of the entire driving system.

**Keywords:** Induction motor (IM); Control System; Variable Frequency Drive (VFD); Scalar Control; Pulse Width Modulation (PWM); Voltage Source Inverter; IGBTs Transistors.

---

\* Master, Electrical Power Systems Engineering , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. email: [nawal.esmaeel@tishreen.edu.sy](mailto:nawal.esmaeel@tishreen.edu.sy)

## نمذجة وتصميم نظام قيادة لمحرك تحريضي بنظام تحكم سلمي عبر تنظيم الانزلاق باستخدام المتحكم الصغري PIC

نوال علي اسماعيل\*

(تاريخ الإيداع 16 / 8 / 2022. قُبِلَ للنشر في 21 / 12 / 2022)

### □ ملخص □

تركز ورقة البحث هذه على تصميم نظام تحكم سلمي لقيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور ذي دائر مقصور، يعمل في الأرباع الأربعة، وفق مبدأ التحكم السلمي عن طريق تنظيم الانزلاق باستخدام ميزة تعديل عرض النبضة PWM لقالبية ترانزستورية جسرية ثلاثية الطور ذات النوع IGBT، تستخدم المتحكم الصغري Microcontroller للتحكم بمطالات كل من الجهد والتردد وفق نسبة ثابتة V/F const. من أجل الحفاظ على فيض ثابت، والحفاظ على القيمة العظمى للعزم ثابتة مع تغير الأحمال.

تم تحديد شروط التشغيل لنظام القيادة الكهربائي، وبعد ذلك تم بناء نظام التحكم المطلوب وذلك بتصميم المتحكم التناسبي التكاملي PI Controller والمحدد Limeter ومتحكم الجهد Voltage controller من أجل توليد إشارات القدر التي تتحكم بمفاتيح القالبية باستخدام مبدأ تعديل عرض النبضة PWM عن طريق استخدام المتحكم الصغري PIC واستخدام برنامج Simpler11 النسخة الكاملة.

قمنا بتحديد ميزات ومساوئ نظام القيادة المقترح، الذي يقدم استجابة سريعة خلال الحالات العابرة (إقلاع- كبح) وأداء أفضل، وبالتالي يرفع فعالية نظام القيادة بأكمله.

**الكلمات المفتاحية:** المحرك التحريضي نظام التحكم؛ القيادة بتردد متغير؛ التحكم السلمي؛ تعديل عرض النبضة؛ قالبية الجهد؛ ترانزستورات IGBTs.

\* ماجستير - هندسة نظم القدرة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية، إيميل:

[nawal.esmaeel@tishreen.edu.sy](mailto:nawal.esmaeel@tishreen.edu.sy)

## مقدمة:

تتمتع نظم قيادة المحرك التحريضي ذات التردد المتغير VFD بإيجابيات كثيرة منها: إمكانية تنظيم السرعة والاستجابة العالية والتحكم الدقيق وسهولة البرمجة وتحسين عامل الاستطاعة وعزم إقلاع منخفض ضمن الحدود المسموحة وزيادة مجال منطقة العمل المستقر، بالإضافة إلى إمكانية التحكم بتسارع وتباطؤ المحرك عن طريق تغيير تابع التردد مع الزمن. كما أن التحكم بالمحرك عبر تنظيم التردد يمكن أن يزيد من مردود النظام حوالي 35% عند حمولات قريبة من الحمولات الاسمية. يتم تنفيذ تقنيات مختلفة للتحكم بالسرعة باستخدام أنظمة VFD متطورة، منها التحكم السلمي (Scalar Control (V/F Control)، الذي يعمل على تأمين تغذية ذات تردد متغير ونسبة جهد إلى تردد ثابتة V/F const.، حيث يتم التحكم بمطالات متغيرات التحكم فقط [6-1]. كما تتمتع نظم القيادة والتحكم بمحركات المصاعد والروافع وكذلك السيور المتحركة بأهمية كبيرة كونها أكثر نظم القيادة انتشاراً في كافة القطاعات الخدمية والانتاجية في العالم، حيث تقوم بتأمين الحصول على مسارات حركية محددة تتناسب مع متطلبات التشغيل [2].

إن أنظمة التحكم لبعض التطبيقات مثل المصاعد والروافع والسيور المتحركة تتطلب انجاز عمليات فصل ووصل سريعة ومتكررة مع عكس اتجاه الدوران، لذلك يجب التحكم بعزم المحرك لضبط عمليات التسارع أو التباطؤ للحمل وكذلك حالات التشغيل الخطرة، مثل تنزيل الحمل تحت تأثير ثقله [3].

وباستخدام التحكم السلمي يمكن التحكم بمطال جهد إشارة الدخل المتغيرة وتردها معاً، حيث يتغذى المحرك بإشارات ذات ترددات مختلفة يتم توليدها عن طريق التحكم بتعديل عرض النبضة PWM من قالبية تستخدم ميزة المتحكم الصغري [4].

## أهمية البحث وأهدافه:

نظراً للاستخدام الواسع لأنظمة القيادة والتحكم لمحركات المصاعد والروافع في القطاعات الخدمية والانتاجية، ونظراً لاستخدام المتحكمات في العديد من التطبيقات الصناعية والتجارية والخدمية كعنصر أساس من عناصر الأتمتة، ودورها في تطوير أنظمة التحكم، ولما لها من مزايا هامة منها: فعالية الشيفرة البرمجية والوثوقية وبساطة التعليمات اللازمة للبرمجة والسرعة وضمان السرية. كان لابد من وضع مخطط منهجي لخوارزمية عمل هذه المتحكمات لتشكل أساساً في تصميم وتصنيع هذه الأنظمة محلياً مع إمكانية تطوير وتخفيض تكاليف استثمارها [5].

## هدف البحث:

يهدف البحث لوضع نموذج لنظام قيادة باستخدام برنامج Simpler11، وانجاز دارة عملية للتحكم السلمي عبر تنظيم الانزلاق لمحرك تحريضي يعمل في الأرباع الأربعة باستخدام برنامج Proteus7 Profession، واستخدام PIC C Compiler المسمى اختصاراً CCS لبرمجة المتحكم.

كما يهدف لتحليل نتائج نموذج نظام التحكم في حالات أنظمة العمل المختلفة من خلال:

- دراسة العمل الديناميكي في حالات: الإقلاع، التسارع، التباطؤ، والإيقاف؛
- دراسة متغيرات النظام: السرعة، التردد، التيار، الجهد، والعزم خلال فترات التشغيل الساكنة والديناميكية وتحديد دقة وكفاءة ومردود النظام؛
- تحديد إيجابيات وسلبيات النظام.

يساهم هذا النموذج في تصميم أنظمة قيادة للمصاعد والروافع والسيور المتحركة والروبوتات باستجابة ودقة عالية عبر تنظيم الإنزلاق وفق مبدأ V/F const باستخدام المتحكم الصغري PIC16F877a بهدف تحقيق المتطلبات الرئيسية الآتية:

1. تحقيق شروط التشغيل المطلوبة لأنظمة قيادة المصاعد والروافع الموافقة لعملية تكنولوجية مقترحة من أجل التحكم الدقيق بالسرعة والتوقف وعكس اتجاه الدوران [4]؛
2. تحقيق إقلاع خطي سلس بتسارع منتظم، وكبح سلس بتباطؤ منتظم عند عزم حمولة ثابت والوصول للسرعة المطلوبة بكفاءة عالية مع إمكانية إعادة القدرة إلى الشبكة للحصول لكفاءة عالية لنظام القيادة [11-12]؛
3. تحقيق شروط التشغيل بمرود عالي [5]؛
4. تحقيق شروط التشغيل المطلوبة بعامل تشوه منخفض لتيارات المحرك للحفاظ على المحرك وإطالة عمره [13]؛
5. تحقيق حماية كافية للنظام لنفاذي حدوث قفزات عالية في إشارات الجهد والتيار والعزم [6].

### طرائق البحث ومواده:

لدراسة نظام القيادة وتحليل عمله يجب دراسة العزوم والمسارات الحركية التي توفرها المحركات، وكذلك العزوم والقوى المعاكسة التي تؤثر على هذه المسارات. يعتبر ذلك ضرورياً لتحديد وحساب أبعاد وعناصر نظام القيادة والمحركات، أو لتصميم أنظمة التحكم والتنظيم اللازمة لنظام القيادة [1].

تحدد معادلة توازن العزوم على محور المحرك في نظام القيادة لمحرك تحريضي بمعادلة العزم الديناميكي الآتية:

$$T_d = \Delta T = T_e - T_L = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

حيث:

$T_d$  العزم الديناميكي،  $T_e$  عزم المحرك،  $T_L$  عزم الحمل الميكانيكي  $[N \cdot m]$ .

$\omega$  السرعة الزاوية للمحرك  $[r/s]$ ،

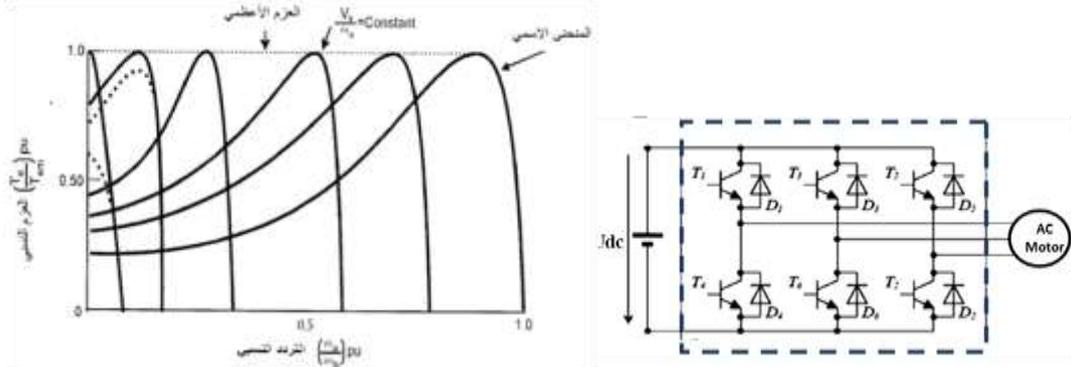
$(J)$  عزم العطالة الكلي للمحرك والحمل الميكانيكي معاً، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$J = m \cdot r^2 = \frac{G \cdot D^2}{4g} \dots [Kg \cdot m^2] \quad (2)$$

وتمثل  $(m)$  كتلة الأجسام المتحركة،  $(G)$  ثقل الأجزاء الدوارة،  $(g)$  الجاذبية الأرضية،  $(r)$  نصف القطر المكافئ للكتلة الدوارة.

- عندما  $(T_e > T_L)$  يكون  $(T_d > 0)$  ويكون بالتالي  $(d\omega/dt = const > 0)$  وهي تمثل حالة تسارع المحرك بقيمة ثابتة، والسرعة تتزايد بشكل خطي.
- لأجل  $(T_e < T_L)$  يكون  $(T_d < 0)$  ويكون بالتالي  $(d\omega/dt = const < 0)$  وهي تمثل حالة تباطؤ المحرك، وبالتالي تناقص سرعته بشكل خطي.
- لأجل  $(T_e = T_L)$  يكون  $(T_d = 0)$  ويكون بالتالي  $(d\omega/dt = 0)$  أي أن تسارع المحرك معدوم، وهي تمثل حالة استقرار المحرك عند سرعة ثابتة  $(\omega = const.)$ .

تعتمد قيادة المحرك التحريضي على توليد إشارات متناوبة بتردد وجهد متغيران عن طريق قالبة جهد ترانزستورية تعمل وفق نظام تحكم سلمي، كما في الشكل (1)، حيث يتم التحكم بمطالات متغيرات التحكم فقط بحيث تبقى النسبة النسبة  $V/F const.$  ثابتة ضمن حدود معينة من أجل تثبيت العزم الأعظمي عند سرعات عمل مختلفة. وهكذا يتعدى المحرك بإشارات ذات ترددات مختلفة يتم توليدها عن طريق التحكم بتعديل عرض النبضة PWM من قالبة تستخدم مميزة المتحكم الصغري.

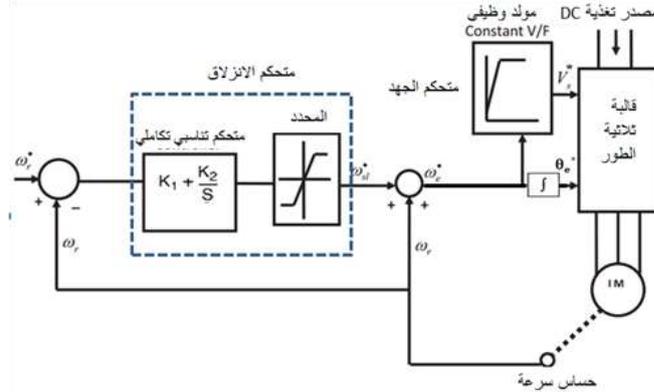


الشكل (1): وصل محرك تحريضي مع قالبة جهد ترانزستورية جسرية

الشكل (2): المميزات الميكانيكية لمحرك تحريضي عند تغذيته وفق نسبة ثابتة

تتميز أنظمة القيادة بتحكم سلمي بانزلاق منخفض عند سرعات مختلفة، وبالتالي ضياعات منخفضة، وكفاءة عالية. وعلى الرغم من انخفاض عزم الإقلاع عند التردد الأساس، إلا أن المحرك بإمكانه أن يقلع بعزم عالٍ عند الترددات المنخفضة. كما أن عدم وجود تيار إقلاع عالٍ يحمي المحرك من الصدمات الكهربائية، ويقلل من عمره الافتراضي. يبين الشكل (2) المميزات الميكانيكية للمحرك التحريضي عند تغذيته بنسبة جهد إلى تردد ثابتة.

إن العزم الأعظمي يحافظ على قيمته تقريباً باستثناء منطقة الترددات المنخفضة، حيث ينخفض فيض الثغرة الهوائية في هذه المنطقة بسبب هبوط الجهد على الثابت. للحفاظ على ثبات العزم عند الترددات المنخفضة نحتاج إلى زيادة جهد الثابت قليلاً (تكبير النسبة ضمن هذا المجال). يبين الشكل (3) نظام التحكم السلمي المقترح  $V/F \text{ const.}$  عبر تنظيم الانزلاق للحفاظ على عزم أعظمي عند سرعات مختلفة. يتم التحكم بمطال جهد وتردد المحرك بتنظيم إشارات قرح ترانزستورات القالبة باستخدام متحكم صغري لتعديل عرض النبضة PWM مدموج مع القالبة ضمن صندوق تحكم واحد.



الشكل (3): مخطط دائرة تحكم مغلقة  $V/F$  بالسرعة عبر تنظيم الانزلاق

في الدارة المبينة في الشكل (3)، يولد خطأ حلقة السرعة تردد الانزلاق  $(\omega_{sl}^*)$  عبر متحكم تناسبي-تكاملي ومحدد. يتم إضافة الانزلاق  $(\omega_{sl}^*)$  إلى إشارة التغذية العكسية للسرعة  $(\omega_r)$  لتوليد تردد القيادة  $(\omega_e^*)$  المطلوب. يولد تردد القيادة  $(\omega_e^*)$  جهد القيادة من خلال مولد وظيفي  $V/F$  يشارك في تعويض هبوط التردد في الثابت. وبما أن الانزلاق يتناسب طردياً مع العزم عند فيض مغناطيسي ثابت يمكن اعتبار المخطط المبين في الشكل السابق عبارة عن حلقة مفتوحة للتحكم بالعزم تتضمن حلقة للتحكم بالسرعة. حيث لا وجود لإشارة تغذية عكسية بالتيار في أي مكان من الحلقة. مع تزايد إشارة سرعة القيادة، تتسارع الآلة ضمن حدود الانزلاق الموافقة لحدود تيار الثابت أو العزم. إلى أن

تستقر عند قيمة انزلاق مستقرة محددة بعزم الحموله. عند تناقص سرعة القيادة ( $\omega_r^*$ ) ينتقل النظام للعمل إما في نظام الكبح الديناميكي أو نظام الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة، ويتباطأ بانزلاق سالب وثابت ( $-\omega_{sl}^*$ ) [1].  
بناء على أهداف البحث تم اقتراح نظام قيادة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور ذي دائر مقصور لمصعد أو رافعة، يستخدم طريقة تنظيم الانزلاق للتحكم بالسرعة وفق مبدأ Scalar Control (V/F Const.)، للعمل في الأرباع الأربعة عن طريق قابلية ترانزستورية جسرية ثلاثية الطور ذات النوع IGBT، وفق شروط التشغيل الآتية لهذا النظام:

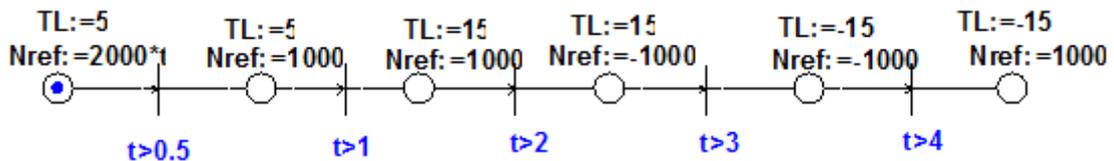
1. تحقيق إقلاع خطي سلس للمحرك بتسارع منتظم للوصول إلى السرعة (1000 rpm)، عند عزم حمولة ثابت ( $T_L = 5 [N.m]$ )، ضمن المجال الزمني  $0 < t < 0.5 sec$ .
2. الحفاظ على سرعة دوران ثابتة للمحرك ( $N_{ref} = 1000 [rpm]$ )، عند عزم الحموله السابق ذاته ( $T_L = 5 [N.m]$ ) ضمن المجال الزمني  $0.5 < t < 1 sec$ .
3. الحفاظ على سرعة دوران المحرك ( $N_{ref} = 1000 [rpm]$ )، عند عزم حمولة أكبر من المرحلة السابقة ( $T_L = 15 [N.m]$ ) ضمن المجال الزمني ( $1 < t < 2 sec$ ).
4. تحقيق كبح سلس للمحرك بتباطؤ منتظم (كبح على التضاد) للوصول للسرعة ( $N_{ref} = -1000 [rpm]$ ) عند عزم الحموله السابق ذاته ( $T_L = 15 [N.m]$ )، ضمن المجال الزمني  $2 < t < 3 sec$ ، ويتم عكس اتجاه الدوران عن طريق عكس تتابع الأطوار، وهي تمثل حالة تنزيل حمل لرافعة أو حالة هبوط مصعد.

5. الحفاظ على اتجاه وسرعة دوران ثابتة للمحرك ( $N_{ref} = -1000 [rpm]$ )، عند عزم حمولة سالب ( $T_L = -15 [N.m]$ )، ضمن المجال الزمني  $3 < t < 4 sec$ .
6. تحقيق كبح سلس للمحرك بتباطؤ منتظم (كبح مع إعادة القدرة) للوصول للسرعة ( $N_{ref} = 1000 [rpm]$ ) عند عزم الحموله السابق ذاته ( $T_L = -15 [N.m]$ )، ضمن المجال الزمني  $4 < t < 5 sec$ .

لتحقيق شروط التشغيل السابقة تم نمذجة نظام القيادة باستخدام برنامج Simpler11 لانجاز عملية تكنولوجية تحقق شروط التشغيل السابقة، ويتم خلالها عمل المحرك في الأرباع الأربعة وفق مراحل ستة. يتألف نموذج نظام القيادة المقترح من:

### 1. نظام التنقل بالمحرك للعمل ضمن الأرباع الأربعة (حالات التشغيل):

يتألف من ستة عناصر حالة State تحدد قيمة عزم الحموله والسرعة المرجعية المطلوبة في كل مرحلة من مراحل عمل المحرك، يتألف كذلك من خمسة عناصر شرطية Transition تحدد شروط الانتقال من مرحلة إلى مرحلة أخرى. كما هو مبين في الشكل (4):

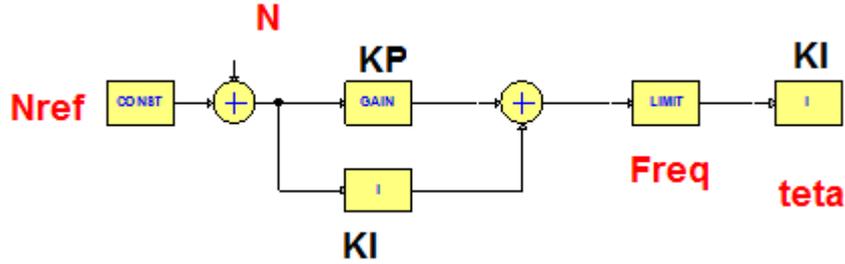


الشكل (4): مخطط نظام التنقل بالمحرك للعمل ضمن الأرباع الأربعة حسب حالات التشغيل

### 2. دارة التحكم:

تقوم دارة التحكم السلمي المبينة في الشكل (5) بتنفيذ خوارزمية التحكم وتطبيق الخيارات المطلوبة وإصدار إشارات التبديل إلى القابلية ومنها إلى المحرك. لقد سهلت تقانات التحكم الرقمي المستخدمة للمتحكمات الصغيرة

Microcontrollers تنفيذ خوارزميات التحكم وصنع خوارزميات أكثر تعقيداً وبكلفة متوسطة. بالإضافة إلى أنها مهدت الطريق لتعديل خوارزمية التحكم برمجياً دون اللجوء إلى إعادة تصميم الدارات من جديد [5].



الشكل (5): دارة التحكم السلمي (Scalar Control (V/F Const.))

يتم بشكل لحظي مقارنة سرعة المحرك الحقيقية ( $N$ ) مع السرعة المرجعية المطلوبة ( $N_{ref}$ ) المتغيرة حسب طبيعة نظام عمل المحرك والمحددة بواسطة عنصر قيمة ثابتة CONST. تتم عملية المقارنة بين إشارتي السرعة بواسطة عنصر مقارنة SUM، ومن ثم يتم توليد إشارة الخطأ (التصحيح) في سرعة الدوران ( $\Delta N$ ).

تم برمجة متحكم انزلاق Slip Controller يتضمن متحكم تناسبي تكاملي PI controller ومحدد انزلاق Slip Limiter بحيث يعالج إشارة الخطأ في السرعة ويعمل وفق برنامج معين. يتم تشكيل إشارة الخرج الأولى ( $P$ ) عن طريق عنصر ربح تناسبي Proportional Gain بعامل ربح تناسبي ( $K_p$ )، وتتناسب هذه الإشارة طردياً مع إشارة الخطأ. بينما تتولد إشارة الخرج الثانية ( $I$ ) عن طريق عنصر ربح تكاملي Integral Gain بعامل ربح تكاملي ( $K_i$ )، حيث ترتفع أو تنخفض إشارة الخرج الثانية وفقاً لقيمة إشارة الخطأ.

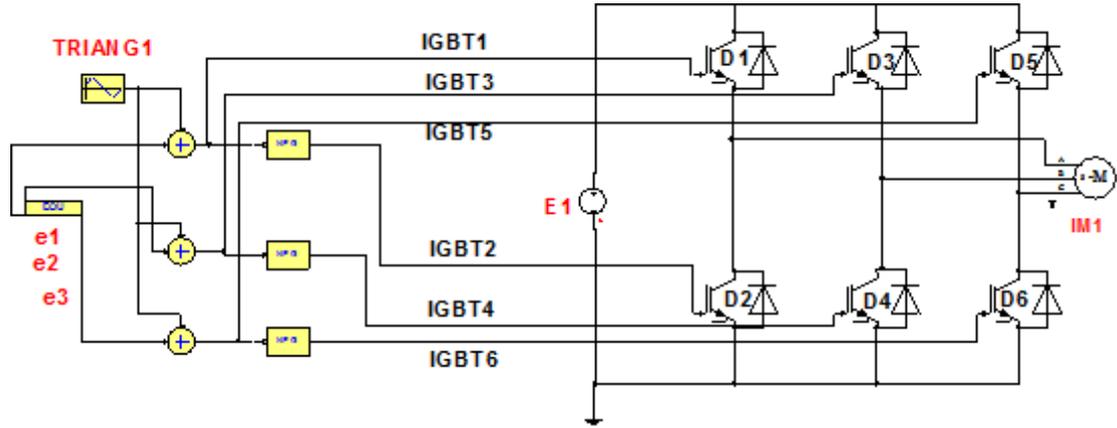
إن نظام PI يضيف قيمة الخطأ مع الزمن، وفي حال تزايد انخفاض السرعة، فإن إشارة الخطأ سوف تزداد لتؤمن التعويض المناسب. وتحت شروط العمل الطبيعية والتحميل الثابت فإن العنصر التكاملي KI سيعطي قيمة خطأ قريبة من الصفر بسبب تناقص قيمة الخطأ خلال الزمن [3]. لقد تم اختيار عوامل الريج بشكل تجريبي عند الحالة المثلى بحيث تعطي استجابة سريعة مع أقل قدر ممكن من عدم الاستقرار كتغيرات الحمولة المفاجئة، وتؤمن تشغيل مستقر بالنسبة للأحمال الصغيرة.

تم بعد ذلك إدخال إشارة خرج المنظم PI الناتجة إلى المحدد حدوده ( $\pm 60$ ) هرتز تتوافق مع تردد العمل الأعظمي المسموح به لهذا المحرك، بحيث تمثل القيم السالبة قلب تتابع الأطوار على مدخل المحرك، لنحصل على إشارة التردد المطلوب ( $F_{req}$ ) المتغير حسب طبيعة نظام عمل المحرك. ثم قمنا بمكاملة إشارة ( $F_{req}$ ) بإدخالها إلى عنصر تكاملي teta بعامل ربح تكاملي  $KI=2*\pi$  لتوليد إشارة الزاوية الطورية اللحظية ( $\theta_e^*$ ) أو إشارة (التردد الزاوي teta) التي تتغير مع تغير إشارة التردد ( $F_{req}$ ).

$$(\theta_e^* = teta = 2 * \pi \int Freq . dt = \int \omega dt) \quad (3)$$

### 3. دارة توليد النبضات:

تتألف دارة توليد النبضات المبينة في الشكل (6) من: تابع إشارة مثلثية TRIANG1، عنصر معادلات Equations، ثلاث عناصر مقارنة Comparator وثلاث عناصر نفي NEG.



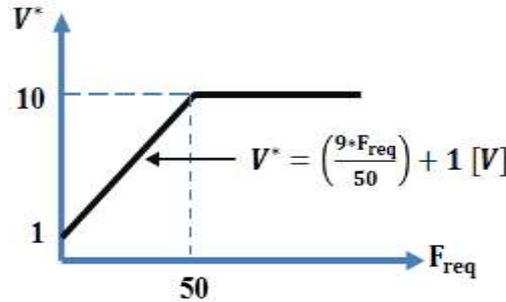
الشكل (6): مخطط القالب والمحرك مع دائرة توليد نبضات قرح ترانزستورات القالب

تم تنظيم إشارات قرح الترانزستورات بتوليد ثلاثة جهود مرجعية جيبيية مزاحة بعضها عن البعض بزواوية  $(120^0)$  باستخدام العنصر الذي يحدد معادلات الجهود الطورية التي يتألف منها نظام التوليد الثلاثي الطور. هذه التتابع هي كالآتي:

$$U_a^* = e_1 = \left(9 * F_{req} \cdot \frac{VAL}{50}\right) \sin(\text{teta} \cdot VAL) \quad (4)$$

$$U_b^* = e_2 = \left(9 * F_{req} \cdot \frac{VAL}{50}\right) \sin(\text{teta} \cdot VAL - 2 * PI/3) \quad (5)$$

$$U_c^* = e_3 = \left(9 * F_{req} \cdot \frac{VAL}{50}\right) * \sin(\text{teta} \cdot VAL - 4 * PI/3) \quad (6)$$



الشكل (7): منحنى خواص متحكم الجهد

بعد توليد الإشارات الجيبيية المرجعية ثلاثية الطور المتزنة  $(e_1, e_2, e_3)$  تم مقارنتها مع إشارة حاملة مثلثية Triangular Carrier Signal بمطال 10[V] وتردد تعديل 2[KHz]. وقد تم حساب مطال إشارات الجهود المرجعية  $U_a^*, U_b^*, U_c^*$  ومطالات جهود أطوار المحرك  $V^*$  عن طريق متحكم الجهد وفق مبدأ التحكم السلمي V/F Const. مع الأخذ بعين الاعتبار تعويض هبوط الجهد على مقاومة الثابت عند العمل بسرعات منخفضة. وتم تحديد النسبة V/F وفق الخواص المبينة في الشكل (7).

نلاحظ أنه بتغيير مطال وتردد الإشارة المرجعية الجيبيية يتغير عرض نبضة التحكم المطبقة على قواعد الترانزستورات. وهكذا تم تشكيل نبضات التحكم على ترانزستورات القالب باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة PWM.

#### 4. دائرة القالب مع المحرك:

تعد القالب الجزء الأهم في نظام قيادة المحرك، حيث تم تصميمها حسب استطاعة هذا المحرك. ونظراً لكون القالب أعلى ثمناً من المحرك، لهذا تتم حماية وتصميم نظام القيادة وفق التيار الأعظمي للقالب.

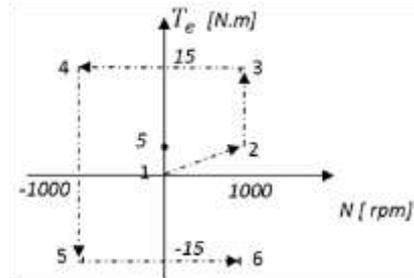
تتألف دائرة القالبية من العناصر التالية: منبع جهد مستمر  $V_{dc} = E1 = 400 \text{ V}$ ، ستة ترانزستورات استطاعية نوع IGBT، وست ديودات مسار حر (Free-Wheeling diodes (FWD)). تعمل الترانزستورات كمفاتيح لإشارة PWM ويتوقف اختيارها على استطاعة المحرك وتردد PWM، وبشكل عام يستخدم الترانزستور MOSFET في قيادة المحركات ذات الجهد المنخفض، بينما يستخدم الترانزستور IGBT لقيادة المحركات عالية الجهد وهذا ما تم استخدامه في القالبية التي تم دراستها.

تم اختيار البارامترات التالية للمحرك من أجل عملية المحاكاة: مقاومة ملفات الثابت  $R_1 = 0.87 \Omega$ ، مقاومة ملفات الدائر  $R_2 = 0.84 \Omega$ ، المحارضة التسريبيه لملفات الثابت  $L_{S1} = 2.45 \text{ mH}$  وملفات الدائر  $L_{S2} = 4.33 \text{ mH}$ ، المحارضة التبادلية  $L_m = 61 \text{ mH}$ ، عدد أزواج الأقطاب  $P = 2$ ، عزم عطالة الأجزاء الدوارة  $J = 75 \text{ mKg.m}^2$ . كما تم انجاز عملية تكنولوجية محددة بست مراحل موضحة في الجدول (1) يتم خلالها عمل المحرك في الأرباع الأربعة وفق مبدأ (V/F const. Scalar Control).

الجدول (1): حالات النمذجة للأنظمة المختلفة

الربيع	العزم المطلوب [N.m]	سرعة الدوران المطلوبة	المجال الزمني [sec]	نظام العمل	البند
الأول	5	2000.t	$0 < t < 0.5$	اقلاع خطي سلس بتسارع منتظم	1
الأول	5	1000	$0.5 < t < 1$	محرك بسرعة ثابتة	2
الأول	15	1000	$1 < t < 2$	محرك بسرعة ثابتة	3
الثاني	15	-1000	$2 < t < 3$	كبح سلس بتباطؤ منتظم (كبح على التضاد)	4
الثالث	-15	-1000	$3 < t < 4$	عكس جهة الدوران للمحرك	5
الرابع	-15	1000	$4 < t < 5$	كبح مع اعادة القدرة	6

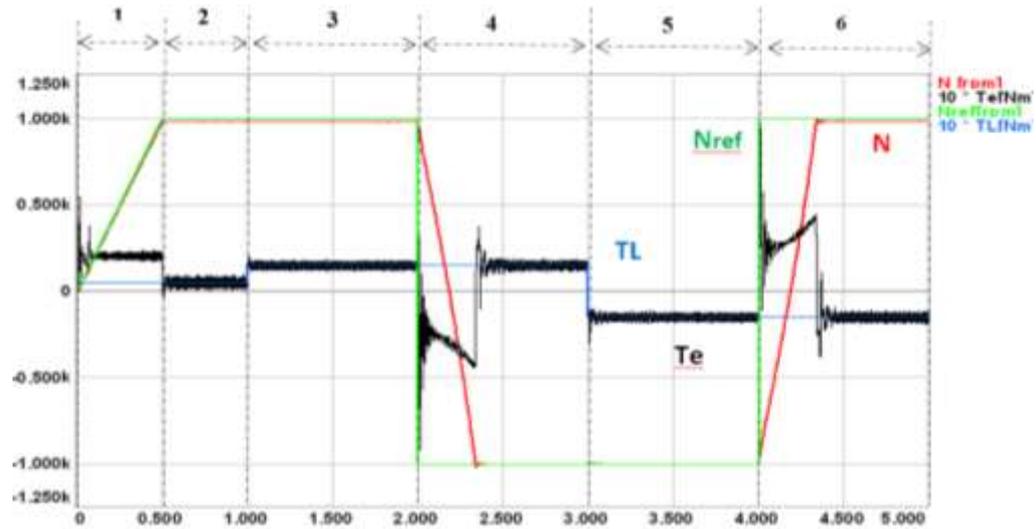
يبين الشكل (8) انتقال المحرك بين الأرباع الأربعة خلال عمله في الأنظمة المختلفة:



الشكل (8): عمل المحرك في الأرباع الأربعة

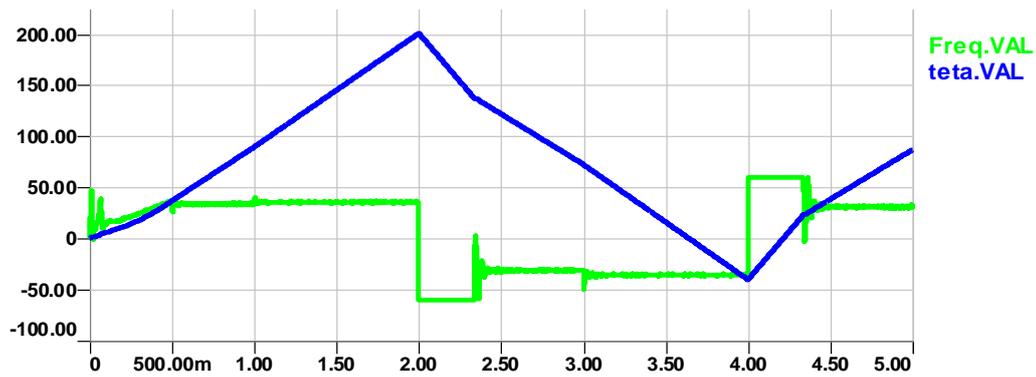
### النتائج والمناقشة:

حصلنا من خلال النمذجة على إشارات سرعة الدوران الحقيقية ( $N$ )، والمطلوبة ( $N_{ref}$ )، عزم المحرك ( $T_e$ ) وعزم الحمولة المطلوب ( $T_L$ ) خلال العملية التكنولوجية المقترحة، كما هو مبين في الشكل (9).



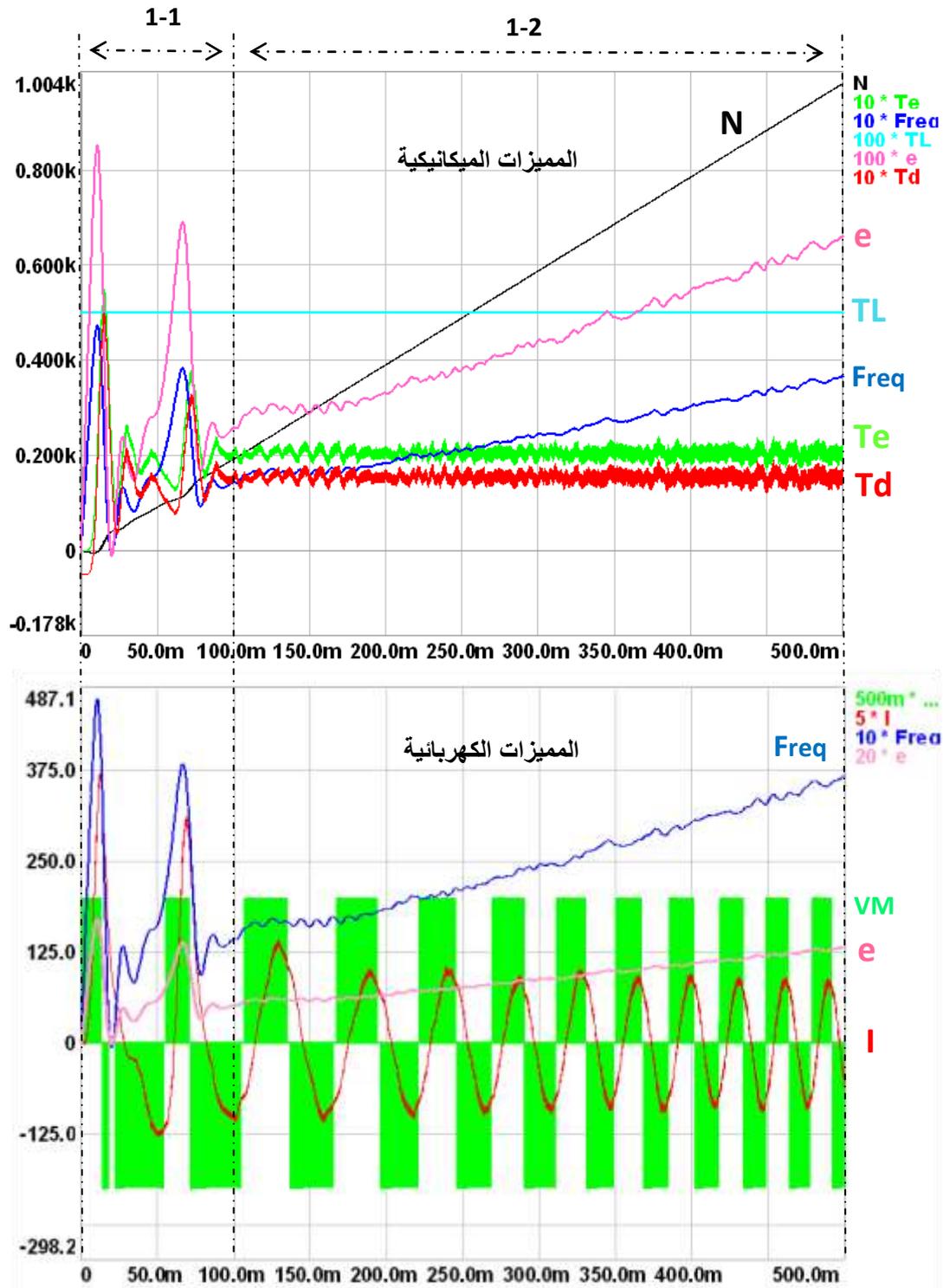
الشكل (9): إشارات سرعة الدوران وعزم المحرك وعزم الحمولة المطلوبة وفق أنظمة العمل المختلفة

كما حصلنا على إشارات التردد المطلوب  $F_{req}$ ، والزاوية الطورية اللحظية  $teta$ ، كما في الشكل (10).



الشكل (10): إشارات التردد المطلوب  $F_{req}$ ، والزاوية الطورية اللحظية  $teta$

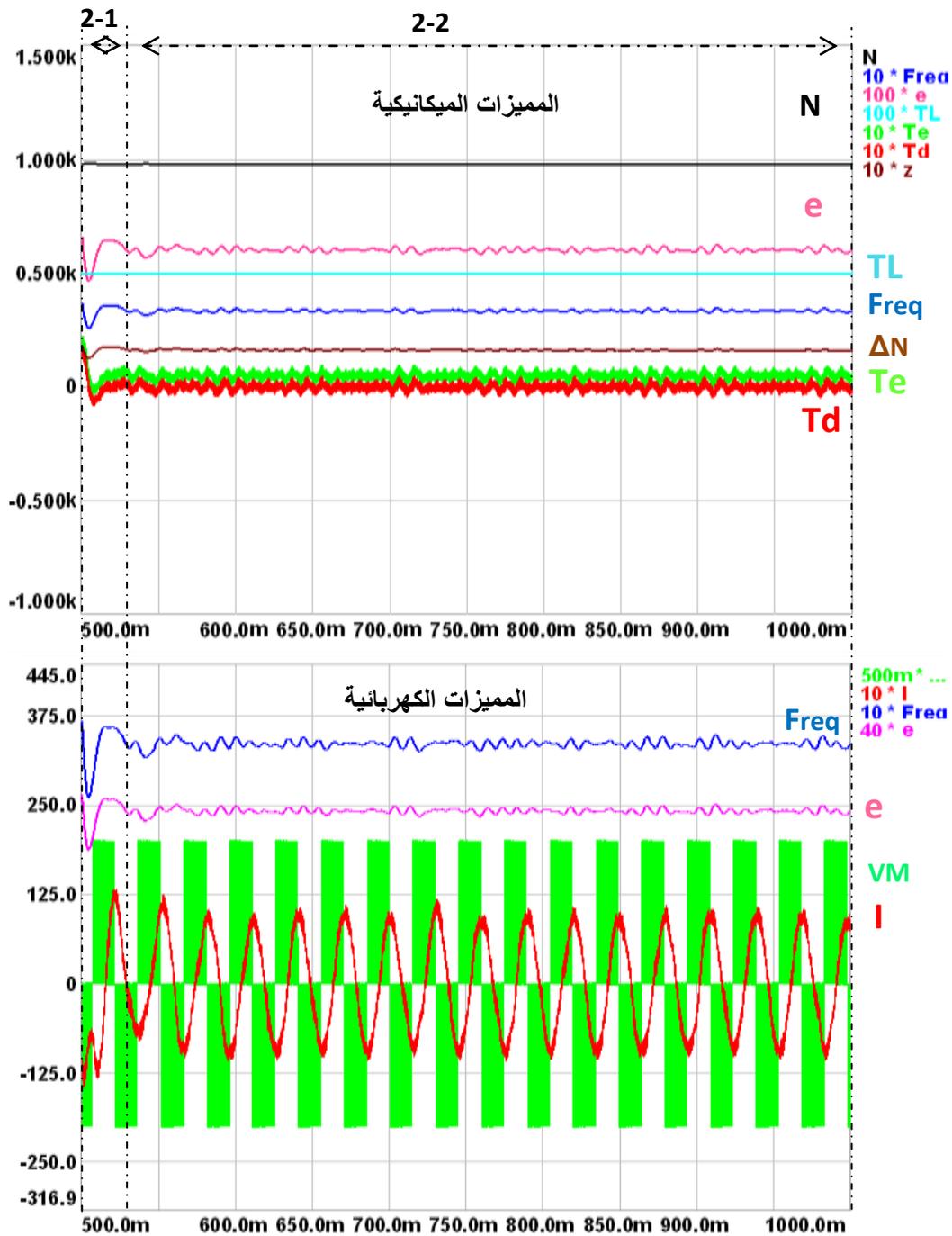
حصلنا على المميزات الميكانيكية التي تمثل تغيرات كل من  $(N; T_e; T_L; T_d)$ ، وكذلك المميزات الكهربائية للمحرك التي تمثل تغيرات التيار  $(I)$ ، والتوتر المطبق على المحرك  $(V_M)$  في كافة الأنظمة.



الشكل (11): المميزات الميكانيكية والمميزات الكهربائية خلال مرحلة الإقلاع

من خلال دراسة النتائج وتحليلها ضمن النظام الأول، كما في الشكل (11)، نلاحظ أن عزم المحرك خلال مرحلة الإقلاع العابر (1-1) يصل إلى قيمة لحظية عظمى  $T_e = 55 [N.m]$  تعادل (11) ضعفاً من عزم الحموله،

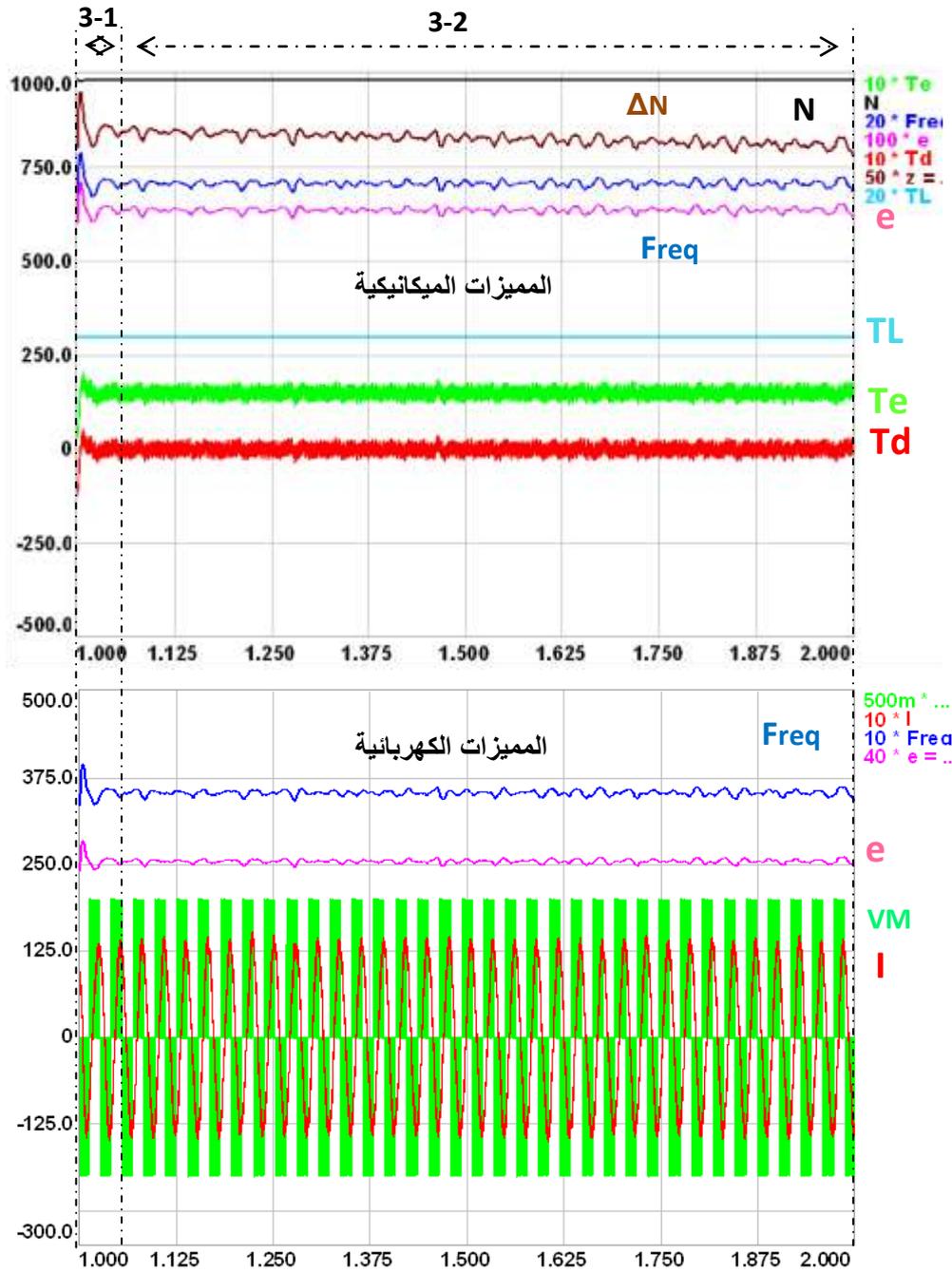
ويكون العزم الديناميكي في هذه اللحظة  $T_d = 55 - 5 = 50 [N.m]$ . كما تكون تغيرات عزم المحرك وتغيرات العزم الديناميكي خلال المرحلة (1-2) ضمن مجال أعظمي لا يتجاوز ( $4.5 [N.m]$ ) نظراً لثبات عزم الحموله.



الشكل (12): المميزات الميكانيكية والمميزات الكهربائية خلال النظام الثاني

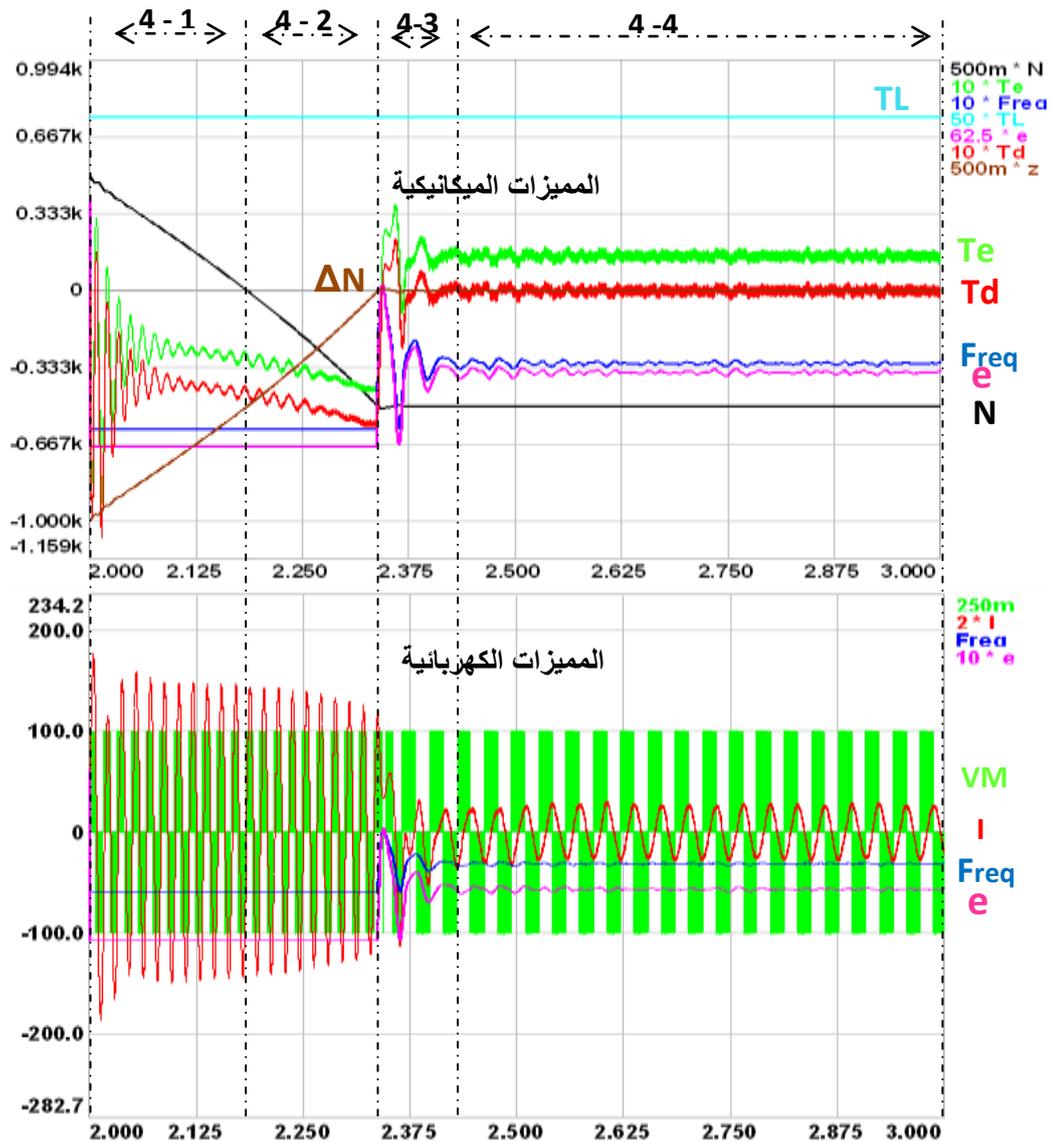
ومن خلال دراسة النتائج وتحليلها ضمن النظام الثاني، كما في الشكل (12)، نلاحظ عدم ظهور حالات عابرة تؤدي إلى توليد اهتزازات تؤثر سلباً على محور المحرك ضمن المرحلة (2-1) وإنما تظهر حالة عابرة بسيطة ذات فترة زمنية قصيرة جداً لا تتجاوز  $40 [msec]$ ، بينما نلاحظ أن قيمة عزم المحرك ضمن المرحلة (2-2) تتراوح حول قيمة عزم

الحمولة، وبالتالي يكون العزم الديناميكي مساوياً للصفر، وتكون سرعة المحرك الحقيقية ثابتة ومساوية تقريباً للسرعة المطلوبة 1000 [rpm].



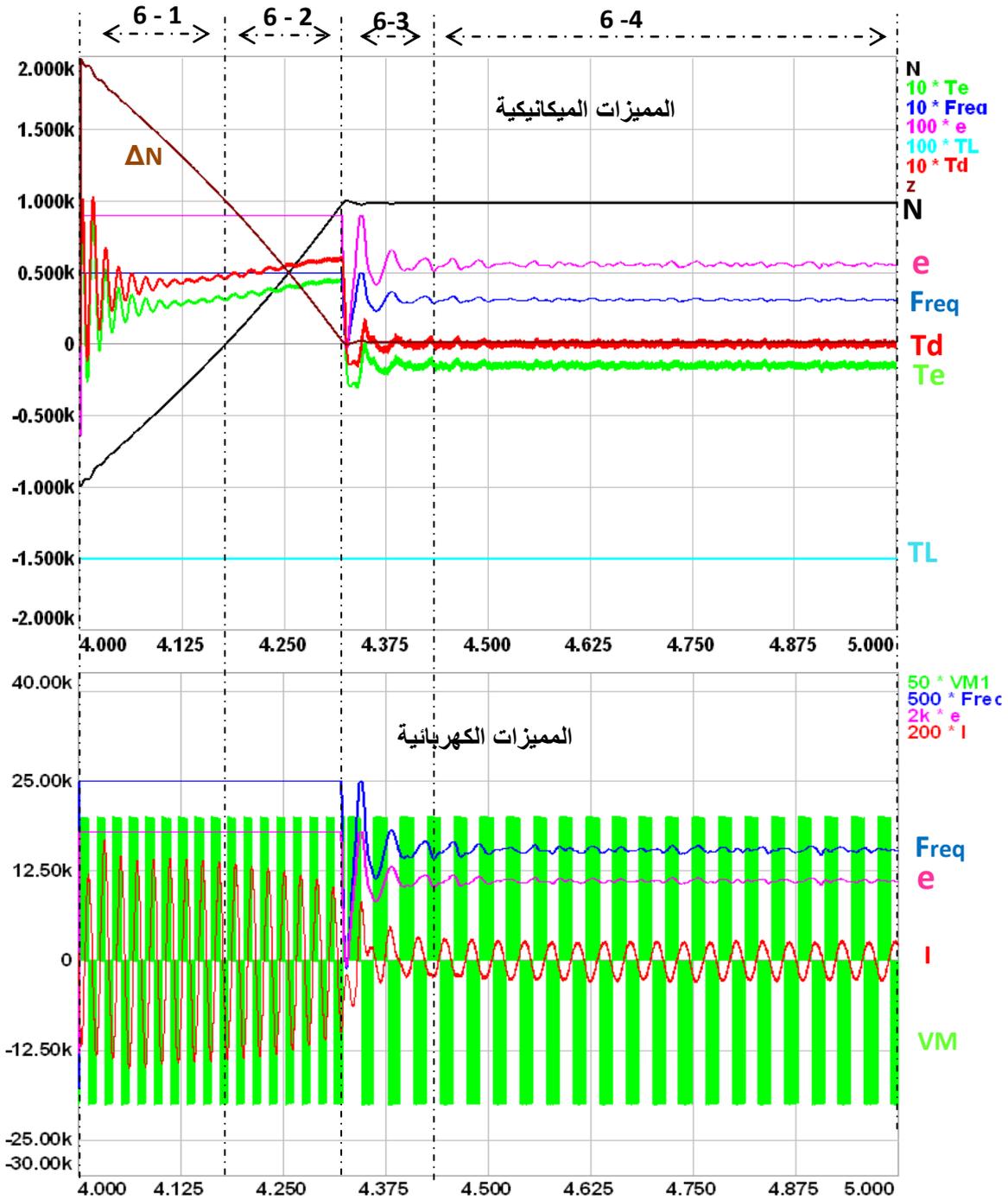
الشكل (13): المميزات الميكانيكية والمميزات الكهربائية للمحرك خلال النظام الثالث

ومن خلال دراسة المميزات الميكانيكية والكهربائية للمحرك ضمن النظام الثالث، المبينة في الشكل (13)، نلاحظ أن نظام التحكم السلمي يعطي أكبر خطأ قدره 19.034 [rpm] عند اللحظة  $t=1.0082$ [sec] خلال المرحلة لأولى من النظام الثالث.



الشكل (14): المميزات الميكانيكية والكهربائية للمحرك خلال النظام الرابع

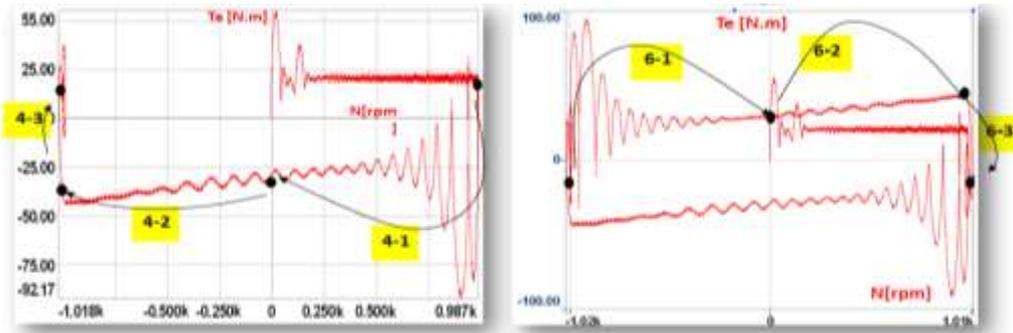
ومن خلال دراسة النتائج وتحليلها ضمن النظام الرابع، كما في الشكل (14)، نلاحظ أن الحالة العابرة في هذا النظام تتكون من ثلاث مراحل نتيجة الحالة العابرة القاسية التي تنقل المحرك من الربع الأول إلى الربع الثاني، ليعمل المحرك بحالة الكبح على التضاد (حالة تنزيل حمل لرافعة أو حالة هبوط مصعد).  
يبين الشكل (15) المميزات الميكانيكية والكهربائية للمحرك خلال عمله في النظام السادس، حيث ينتقل للعمل في الربع الرابع ككبح (فرملة مع إعادة القدرة إلى الشبكة).



الشكل (15): المميزات الميكانيكية والكهربائية للمحرك خلال النظام السادس

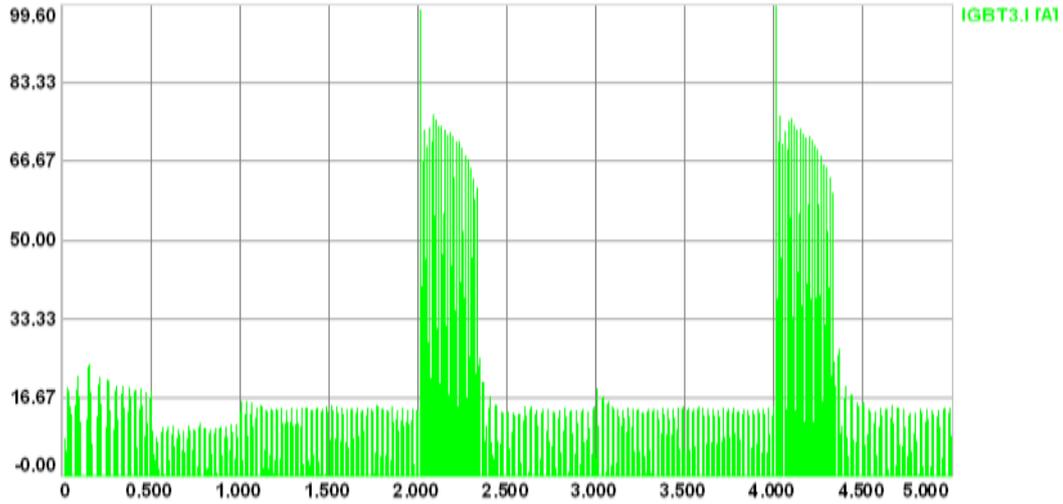
- يمكن تلخيص النتائج من خلال دراسة تغيرات التردد، عزم وسرعة المحرك الحقيقية، وكذلك عزم الحمولة والعزم الديناميكي خلال عمل المحرك في الأنظمة المختلفة وفق الآتي:
1. إن نظام التحكم المقترح يحقق العملية التكنولوجية المطلوبة باستجابة ودقة عالية (التنقل بين الأرباع الأربعة بسلاسة).

2. نلاحظ أن عكس سرعة دوران المحرك يترافق مع حالات عابرة بأزمنة طويلة (للمرحلتين الرابعة والسادسة) نتيجة انتقاله بين الأرباع باتجاه عقارب الساعة. بينما تترافق تغيرات العزم مع أزمنة عابرة قصيرة نسبياً.
3. يحقق نظام التحكم المقترح تنظيم سرعة الدوران بأزمنة قصيرة للحالات العابرة الفاسية.
4. يمكن باستخدام النمذجة تحديد الخواص الميكانيكية  $(T_e, N)$  الديناميكية والستاتيكية، ومن خلالها نلاحظ أنه يتم الانتقال في نظام الإحداثيات  $(T_e, N)$  من نظام إلى آخر عند تغيير اتجاه سرعة الدوران باتجاه عقارب الساعة فقط، كما هو مبين في الشكل (16).



الشكل (16): انتقال نقطة عمل المحرك خلال المرحلة العابرة للنظام الرابع والمرحلة العابرة للنظام السادس

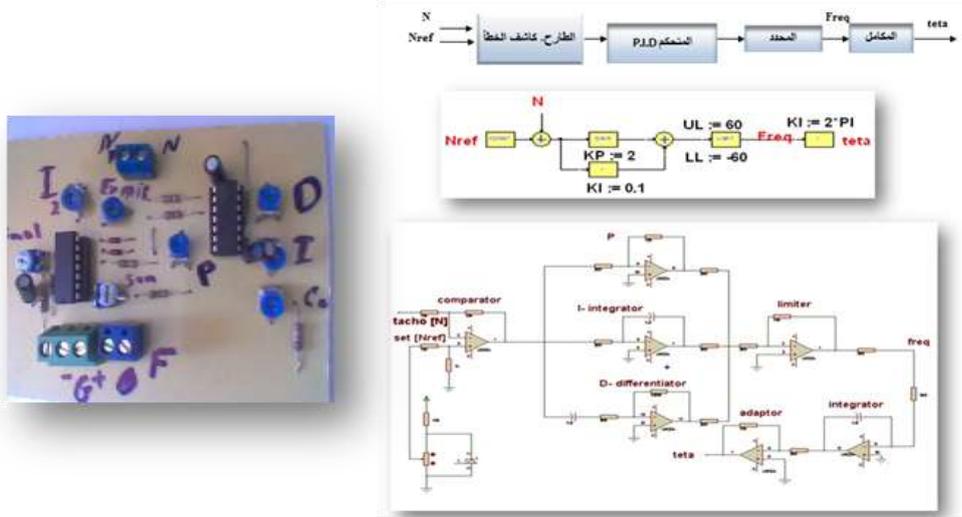
5. وجدنا أن أهم ميزات هذا النظام تتلخص في التغيرات الخطية لسرعة الدوران عند عمل المحرك في حالات الفرملة، وهذه هي أهم ميزات القيادة وفق مبدأ التحكم السلمي  $(\frac{V}{F} = \text{const})$ . Scalar Control.
  6. وجدنا أن أكبر خطأ في سرعة الدوران لا يتجاوز 0.14% من السرعة المرجعية في الحالات المستقرة وهو خطأ السرعة في النظام السادس، وأن أكبر خطأ في الحالات العابرة مقداره 1.5 %، وهذا يعني أن المحرك يعمل على سرعة دوران مستقرة وثابتة مع تغيرات الحمولة، وهي إحدى أهم ميزات التحكم السلمي.
  7. وجدنا أن نظام التحكم المقترح هو نظام فعال لأن أزمنة الحالات العابرة لا تتجاوز 470msec.
  8. يمكن باستخدام النمذجة تحديد أزمنة الحالات العابرة عند الانتقال بين الأرباع الأربعة من نظام إلى آخر.
- تم اختيار المحرك اعتماداً على الاستطاعة العظمى موجودة للنظام المستقر الخامس 1.9kw بالتالي تكون استطاعة المحرك المطلوب أكبر أو يساوي 1.9 [KW].
  - تم اختيار IGBT اعتماداً على القيم العظمى والفعالة للتيارات خلال الحالات العابرة لكافة الأنظمة، الشكل (17)، بحيث يتحمل تيار بقيمة أكبر من 99.6 A وتيار بقيمة فعالة أكبر من 62.284 A وجهد عكسي 400 V.



الشكل (17): القيمة اللحظية العظمى للتيار المار في الترانزستور الثالث خلال كافة الأنظمة

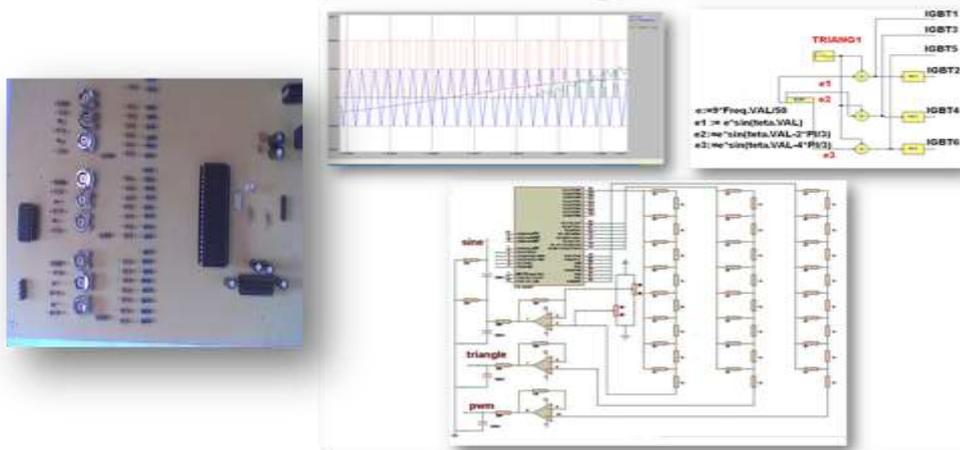
• تم بناء نموذج عملي لنظام التحكم بالمحرك عبر تنظيم الانزلاق وفق مبدأ التحكم السلمي  $V/F \text{ const.}$  باستخدام المتحكم الصغري PIC16F877a، الذي يتكون من جزئين تشابهي Analog ورقمي Digital، حيث تم وضع مخطط منهجي لخوارزمية عمل هذا المتحكم.

يبين الشكل (18) الجزء التشابهي من دائرة التحكم والدائرة العملية المنفذة لهذا الجزء.



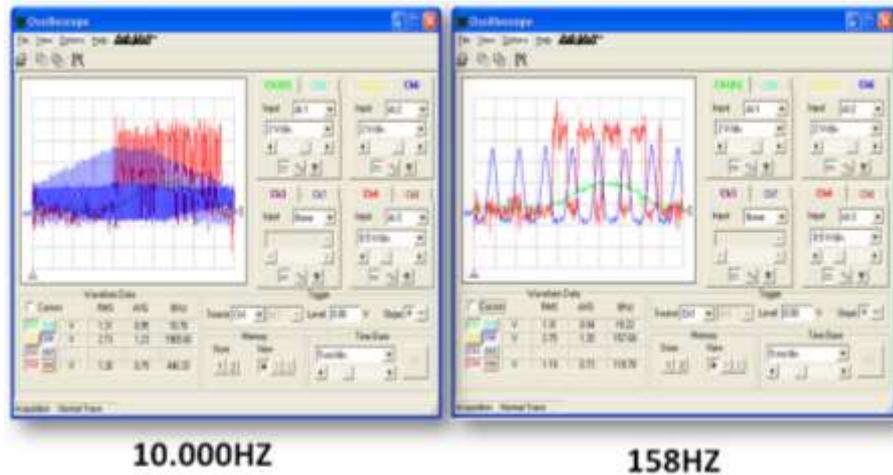
الشكل (18): الجزء التشابهي من دائرة التحكم والدائرة العملية المنفذة لهذا الجزء

يبين الشكل (19) الجزء الرقمي من دائرة التحكم والدائرة العملية المنفذة لهذا الجزء.



الشكل (19): الجزء الرقمي من دائرة التحكم والدائرة العملية المنفذة لهذا الجزء

يتمتع نظام التحكم المقترح بإمكانية تغيير ثوابت التحكم:  $K_D$ ,  $K_I$ ,  $K_p$ , المحدد، وتردد العمل وذلك عندما تتطلب العملية التكنولوجية شروط عمل مختلفة. كما تبين النتائج العملية (إشارات خرج المتحكم PWM) الحصول على نظام التحكم المطلوب والذي يقوم بتنظيم سرعة دوران المحرك وفق المبدأ المدروس، كما في الشكل (20).



الشكل (20): إشارات PWM خرج المتحكم عند العمل بترددات مختلفة للإشارة المثلثية

### الاستنتاجات والتوصيات:

1. العمل على تصميم أنظمة قيادة تستخدم مبدأ التحكم السلمي، واعتماد نظام النمذجة الذي تم تصميمه كأساس في المراحل الهندسية الأولى لتصميم أنظمة قيادة محركات الجر والرفع.
2. طرح الدارة العملية التي قمنا بتصميمها بعد أن تم التأكد عملياً من أدائها للاستفادة منها في السوق المحلية لقيادة الأنظمة التي تتطلب دقة تنظيم عالية في سرعة الدوران وتحقيق إقلاع سلس، من أجل الاستغناء عن أنظمة التحكم المشابهة المستوردة والمغلقة.

**References:**

- [1] Bimal K. Bose. “*Modern Power Electronics And AC Drives*”. Prentice Hall PTR, SA, 2002.
- [2] O. Muravlev, et al, “*Energetic parameters of induction Motors as the basis of energy saving in a variable speed drive,*” Electrical Power Quality and Utilization, Vol. IX, No. 2, 2005.
- [3] S. Ghozzi , K. Jelassi, X. Roboam, “*Energy optimization of induction motor drives*” in Proc. IEEE Conf. Industrial Technology (ICIT), 2004, pp. 602-610.
- [4] K. Rathnakannan, V. Ranjan, “*The Modeling and the Analysis of Control Logic for a Digital PWM Controller based on a Nano Electronic Single Electronic Transistor*”, Serbian Journal of Electrical Engineering Vol. 5, No. 2, Nov. 2008, 285 – 304.
- [5] Nalin Kant Mohanty, Ranganath Muthu , “*Microcontroller Based PWM Controlled Four Switch Three Phase Inverter Fed Induction Motor Drive* ” Serbian Journal of Electrical Engineering Vol. 7, No. 2, November 2010, 195-204
- [6] Patel S. *Speed control of three--phase induction motor using variable frequency drive.* Long Beach: California State University;2018