مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (37) العدد (1) 2015
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (37) No. (1) 2015

المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) من الدراسة النظرية إلى التطبيق العملي باستخدام المتحكمات المنطقية القابلة للبرمجة (PLC)

الدكتور بلال شيحا *
باسل عبيد **

(تاريخ الإيداع 2 / 9 / 2014. قُبِل للنشر في 21/ 1 / 2015)

ملخّص

يقدم الباحث في هذه الورقة عرض لأحد أكثر أنماط التحكم الحديث دقة واستقرار وسرعة في الاستجابة، وهو نظام التحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) الذي يعتبر أحد الحالات الخاصة لنظم التحكم بالحلقة المغلقة. ويتم عرض ومقارنة أشكال مختلفة من التحكم، وإظهار استجابة الأنماط الفرعية للمنظم PID من خلال استخدام متحكم منطقي قابل للبرمجة (PLC)، وبرمجته ليكون متحكم من النوع (PID) والاستفادة من هذه المنظومة للتحكم الدقيق بسرعة محرك ثلاثي الطور. حيث تم توصيل برنامج المتحكم القابل للبرمجة (PLC) بأحد برامج التحكم بالمراقبة وتحصيل البيانات والمعروفة بالاسم المختصر (SCADA). لمعايرة المتحكم من النوع (PID) ويتم استخدام هذا البرنامج لعرض نتائج استجابة الأنماط المختلفة للمتحكم PID على شكل منحنيات بيانية. حيث تظهر منحنيات الاستجابة سرعة ودقة استجابة تجعل من هذا التطبيق منظومة متكاملة يمكن أن تشكل البنية الأساسية للكثير من التطبيقات العملية كالروافع الكبيرة وخطوط الإنتاج المتداخلة وغيرها من التطبيقات، كما أن استخدام أجهزة PLC يجعل منها أنظمة ذات جودة وموثوقية عالية.

الكلمات المفتاحية: دارة التحكم بالحلقة المفتوحة، دارة التحكم بالحلقة المغلقة، المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي، التحكم بسرعة محرك، SIMATIC Step 7، WinCC Flexible.

*مدرس – قسم الحاسبات والتحكم الآلي كلية الهندسة الميكانيكية & الكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.
**طالب دراسات عليا(ماجستير) – قسم التحكم – كلية الهندسة الميكانيكية & الكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (37) العدد (1) 2015
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (37) No. (1) 2015

PID Controller from the Theory Study to the Practical Application by Using Programmable Logical Controller

Dr. Bilal Chiha *
Bassel Obeid **

(Received 2 / 9 / 2014. Accepted 21 / 1 / 2015)

□ ABSTRACT □

This paper presents one of the most accurate, stable and fast to response advanced control system (PROPORTIONAL INTEGRAL DIFFERENTIAL CONTROL SYSTEM), which considered one of the special cases of closed loop control systems. Also, display and compare different forms of control and response of sub modes of PID controller, through using programmable logical controller and programmed it to be (PID) controller, and take advantage of this system for accurate control of the three phase motor speed. In addition, the PLC program is been connected to monitoring and collecting data software, known by acronym (SCADA) for calibration of (PID) and use this software to display the result of the responses for the different types of the controller PID in the form of graphic curves. These response curves show accuracy and fast to response that make this application an integrated system that could be form the infrastructure of many practical applications like large cranes, overlapping product lines and different other applications and the use of PLC systems make them high quality and high reliability systems.

Key Words: Closed Loop Controller, Open Loop Controller, Proportional Integral Differential Controller, Motor Speed Control, SIMATIC Step 7, WinCC Flexible.

***Assistant Professor, Department of Computer and Control Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
****Postgraduate Student, Depart of Computer and Control Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدِّمة:

شهد علم التحكم الصناعي أو ما يسمى بالأتمتة الصناعية تطوراً كبيراً في الفترة الأخيرة، وارتقى هذا العلم من التحكم التقليدي المعروف بالتحكم الثنائي (On/Off) الذي يعتمد على منطق التشغيل أو التوقف إلى التحكم الدقيق أو التشابهي والذي يتعامل مع إشارات كهربائية متدرجة بالقيمة.

تقوم المتحكمات الصناعية الحديثة باستقبال وإرسال مثل هذه الإشارات حيث تعتمد قيمة الإشارة الكهربائية التي تصدر من المُتحكم على العملية التي يتَحكم بها، فقد تزيد أو تنقص بشكل يحقق أفضل وأسرع استجابة. ففي المصاعد المستخدمة في الأبنية العالية أو الأبراج السكنية أصبح المصعد يتسارع انطلاقاً من نقطة الصفر ويستمر بالتسارع إلى أن يقترب من الهدف (الطابق الذي سيتوقف عنده)، ليبدأ بالتباطؤ شيئا فشيء إلى أن يصل إلى نقطة الصفر مجددا بشكل يزامن وصوله إلى الطابق الهدف [1].

سبّبَ هذا التقدم في نظم الأتمتة الصناعية ثورة صناعية، لما قدمه من سرعة ودقة في الإنتاج واستغناء كبير عن الأيدي البشرية. فأصبحنا نشاهد الأذرع الآلية مكان الأيدي البشرية في كثير من المعامل نظراً للدقة التي باتت تتمتع بها هذه الأذرع.

أهمية البحث وأهدافه:

يوضح هذا البحث نظام تحكم متكامل للتحكم بسرعة المحركات ثلاثية الطور. حيث يتمتع هذ النظام بالتدرج والانسيابية والدقة وسرعة الاستجابة العالية. ويجعل منه نظام تحكم مناسب للعديد من التطبيقات الصناعية، مثل خطوط الإنتاج المتداخلة ومعامل درفلة الحديد، كما يهدف هذا البحث إلى توضيح الأنماط الفرعية للمنظمات (PID) ومقارنتها.

طرائق البحث ومواده:

ارتكز هذا البحث على التجريب الواقعي ولم يعتمد على المحاكاة لذا تم اتباع الخطوات التالية:

1) دراسة الأنماط الفرعية للمنظم التناسبي التكاملي التفاضلي ومعرفة تأثير كل نمط من هذه الأنماط على العملية المراد التحكم بها.

2) برمجة أحد أنواع المتحكمات المنطقية القابلة للبرمجة (PLC) (Programmable Logical Controller) بالشكل الذي يجعل منه متحكم من النوع PID.

3) تطبيق التجربة على منظومة تحكم دقيق بسرعة محرك.

4) ربط برنامج الـ PLC ببرنامج مراقبة (SCADA) وتزويده بالواجهات اللازمة والملائمة.

5) تنفيذ التجربة والبدء بمعايرة المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي بطريقة التجريب والخطأ ومراقبة النتائج.

6) عرض النتائج على شكل منحنيات بيانية ومناقشة النتائج.

1- أدوات البحث:

1) اعتمد هذا البحث في تنفيذه على المواد التالية:

2) متحكم منطقي قابل للبرمجة (SIEMENS S7-314 IFM PLC).

3) البرنامج الخاص ببرمجة هذا النوع من المتحكمات (SIMATIC Step7).

4) استخدام مبدلة ترددية[1] (Inverter SIEMENS_SINAMICS_G120) باستطاعة (0.4 KW) لتحويل إشارات التحكم الصادرة من المتحكم PLC إلى تغير بسرعة المحرك.

5) محرك ثلاثي الطور يحتاج إلى تغذية كهربائية مقدارها (0.35 KW).

6) استخدام مرمزات السرعة (Speed Encoder) لتأمين التغذية الخلفية للمتحكم (السرعة الفعلية للمحرك).

7) برنامج مراقبة (WinCC Flexible SCADA) لتصميم الواجهات المرئية على شاشة الحاسوب وربطها ببرنامج المتحكم PLC.

2- الأتمتة والمتحكمات:

إن كلمة الأتمتة تعني تحويل العمليات التي كانت تُنجز بشكل يدوي إلى عمليات تنجز وتدار بشكل آلي، فمنذ الأزل سعى الإنسان إلى بناء منظومات تحاكي وتشابه إلى حدٍ كبير المنظومات البشرية من حيث المكونات والترابط بهدف الاستعاضة عن اليد البشرية بتلك المنظومات. فالمنظومة البشرية تتكون من أعضاء الحواس والتي تقابل الحساسات في منظومات التحكم الكهربائي، وتتكون من العضلات والتي تقابل المشغلات كالمحركات والصمامات...الخ، وتتكون من العقل الذي يقابل المُتحكم في منظومات التحكم الصناعي.

يتلقى الدماغ الإشارات العصبية من أعضاء الحواس كاقتراب جسم غريب من الشخص ليعالج الدماغ هذه الإشارات وفقا لما تدرب واكتسب من معارف عبر حياته، ويرسل أوامر عصبية إلى العضلات بحيث يبدي الإنسان الاستجابة الأفضل كأن يتحرك مبتعداً عن ذلك الجسم. وكذلك المتحكمات بأنواعها المختلفة حيث تتلقى تلك المتحكمات أوامر كهربائية أو ميكانيكية من الحساسات وترسل أوامر كهربائية أو ميكانيكية مناسبة إلى المشغلات.

يمكن أن تقسم دارات التحكم إلى نوعين رئيسيين:

1-5 دارة التحكم ذو الحلقة المفتوحة (Open Loop Controller):

يطلق على العديد من دارات التحكم كلمة حلقة مفتوحة عندما يصدر المتحكم أوامره بغض النظر عن القيمة الفعلية للمتغير المتحكم به، كأن نقوم بالتحكم بدرجة حرارة آلة تبريد بأن نجعل الضاغط (المشغل المسؤول عن عملية التبريد) يعمل ضمن فترات متقطعة ثابتة. فعندها سيستمر هذا الضاغط بالعمل ضمن هذه الفترات المتقطعة سواء أكانت درجة حرارة آلة التبريد (المتغير المتحكم به) أكبر من درجة الحرارة المرغوبة أو أصغر منها.

يتميز هذا النمط من دارات التحكم بقلة تكلفته المادية وسهولة تركيبه ومعايرته، ولكنه يعتبر متحكم غير دقيق ولا يستطيع أن يتغلب على إشارات التشويش المفاجئة، والتي قد تطرأ على قيمة المتغير المُتَحَكَّم به، نظراً لعدم إمكانية هذا النوع من المتحكمات على استشعار التغيرات التي تطرأ على المتغير المتحكم به كما هو واضح بالشكل (1).

الشكل (1) المخطط الصندوقي للتحكم بالحلقة المفتوحة

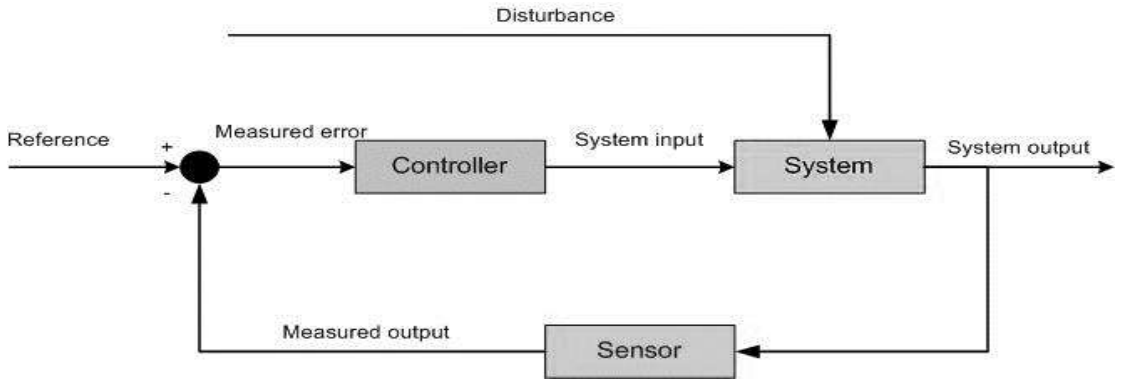
[1] المبدلة الترددية هي أداة مسؤولة عن التحكم بسرعة وعزم المحركات من خلال تغيير تردد وجهد التغذية الكهربائية المطبقة على المحرك وتكون هذه المبدلة مباشرة (Cycloconverter) عندما تتحكم بمحركات التيار المستمر، وغير مباشرة (Inverter) عندما تتحكم بمحركات التيار المتناوب وتتكون عندها المبدلة من ثلاثة مراحل أساسية وهي: المبدلة (Rectifier)، الوصلة المستمرة بين مرحلتي التقويم والتنويب (DC link)، التحويل من التيار المستمر إلى المتناوب (Inverter).

2-5 دارة التحكم ذو الحلقة المغلقة (Closed Loop Controller):

تعتبر دارات التحكم ذات الحلقة المغلقة من أحدث وأدق المتحكمات حيث يعتمد هذا النمط على قراءة القيمة الفعلية للمتغير المتحكم به عن طريق حساس (Sensor)، ليقوم هذا المتحكم بمقارنة القيمة الراجعة من الحساس مع قيمة مرغوبة أو مرجعية (Reference value) ومعالجة الفرق بين الإشارتين السابقتين. والذي يعبر عنه بقيمة الخطأ ويقوم بتوجيه النظام تبعا لهذا الفرق بالشكل الذي يؤدي إلى تصغير أو إلغاء هذا الخطأ [2].

وعندما يتعرض هذا المتغير المتحكم به لتشويش ما (Disturbance) فإن المتحكم ذو الحلقة المغلقة يتحسس لهذا التشويش عن طريق القيمة الراجعة من الحساس، ليقوم بتعديل خرجه بالشكل الذي يؤدي إلى إزالة أثر التشويش ويعيد المتحكم المتغير به إلى القيمة المرغوبة.

يبين الشكل (2) المخطط الصندوقي لمتحكم ذو حلقة مغلقة.



الشكل (2) المخطط الصندوقي للمتحكم ذو الحلقة المغلقة

يتفرع عن دارات التحكم ذات الحلقة المغلقة العديد من الأنواع الفرعية والتي تختلف عن بعضها البعض بآلية الاستجابة (خرج دارة التحكم) لأي تغير بدخل هذا الدارة، ولكن قبل الغوص ببعض هذه الأنواع لا بد لنا من تعريف بعض المصطلحات الخاصة بهذا النوع من المتحكمات.

3- إشارة الخطأ المُقاسة (Measured error):

وهي القيمة الناتجة من طرح القيمة المرغوبة (دخل المنظومة) من القيمة الفعلية للمتغير المتحكم به والتي تمثل خرج الحساس (Measured output) [2].

فيمكن أن يختلف متحكم ذي حلقة مغلقة عن الآخر من حيث طريقة معالجته لإشارة الخطأ ويعد المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي من أكثر المتحكمات المستخدمة لما يتمتع به من مواصفات كالاستجابة الديناميكية السريعة والدقة العالية والخيارات المختلفة التي يتيحها هذا النوع من المتحكمات.

4- المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي (Proportional Integral Differential Controller):

يعمل المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) وفقاً لمبدأ الحلقة المغلقة، ويقوم بمعالجة إشارة الخطأ المقاسة (Measured error). حيث يعطي هذا المتحكم خرجاً محدداً بالعلاقة الرياضية (1) [3] كما يلي:

$$U(t) = K_p.e(t) + K_i.\int_0^t e(t).dt + K_d.\frac{\mathrm{e(t)}}{\mathrm{dt}} \qquad (1)$$

حيث أن:

U(t): يمثل إشارة خرج المتحكم المتغيرة مع الزمن.

e(t): تمثل إشارة الخطأ المقاسة.

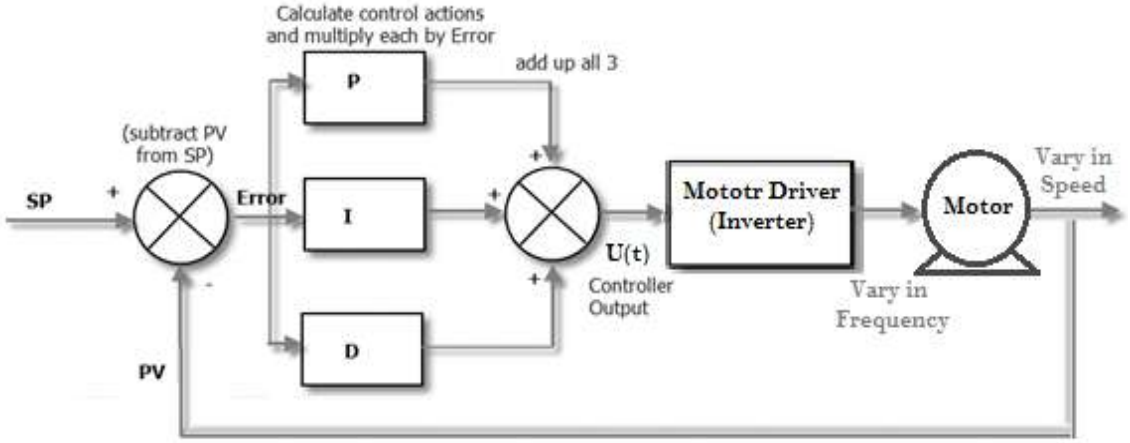
K_p: يمثل ثابت الربح التناسبي.

K_i: يمثل ثابت الربح التكاملي.

K_d: يمثل ثابت الربح التفاضلي.

ونجد من العلاقة (1) السابقة أن دارة التحكم هذه تتكون من ثلاثة مراحل منفصلة موضحة بالشكل (3)، وخرج هذا المتحكم يمثل حاصل جمع المراحل الثلاث السابقة.

كما يمكننا تفعيل/إلغاء تفعيل أي مرحلة من المراحل بجعل الثابت الخاص بهذه المرحلة (K) مساوٍ للصفر [3]، مما يخلق تشكيلات مختلفة من هذا المتحكم مثل المتحكم التناسبي التكاملي (PI) أو التناسبي التفاضلي (PD)...الخ.



الشكل (3) المخطط الصندوقي لدارة المنظم من النوع PID

إن خرج المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي U(t) هو دخل المشغل الذي يحول هذه الإشارة إلى تأثير فيزيائي على النظام (المنشأة) المُتَحَكَم بها، فإذا فرضنا بأن النظام المتحكم به هو محرك يراد التحكم بسرعة دورانه فإن المُتَحَكِم يقدم إشارته إلى القالبة في المبدلة الترددية (Inverter) الذي يمثل المشغل في هذا المثال والذي يعمل بدورِه على تحويل خرج المتحكم هذا U(t) إلى طاقة كهربائية متغيرة غالباً بشكل خطي، مما يؤدي بالنتيجة إلى تغير سرعة المحرك بالشكل الذي يلاحق القيمة المرجعية أو ما يسمى بقيمة الضبط ((Set Point (SP) عن طريق مقارنة سرعة المحرك الفعلية ((Process Variable (PV) مع قيمة الضبط هذه.

قبل الدخول والتعمق بطريقة استجابة المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي لا بد لنا من تقديم بعض التعريفات الأساسية التي تميز منحني استجابة متحكم PID عن آخر:

7-1 زمن مقدمة الموجة أو زمن نهوض الاستجابة (Rise Time):

ويعبر عن المدة الزمنية التي يستغرقها المتغير المُتَحَكَم به ليتغير من النسبة 0% إلى 100% من القيمة النهائية (المرغوبة) في النظم تحت متخامدة، ومن النسبة 10% إلى 90% من القيمة المرغوبة في النظم فوق متخامدة [4].

7-2 نسبة الارتفاع أو التجاوز الأعظمي (Percent Overshoot):

وهي الفرق بين أعلى قيمة يبلغها المتغير المُتَحَكَم به والقيمة النهائية التي يصل إليها محسوبةً كنسبة مئوية من القيمة النهائية [4].

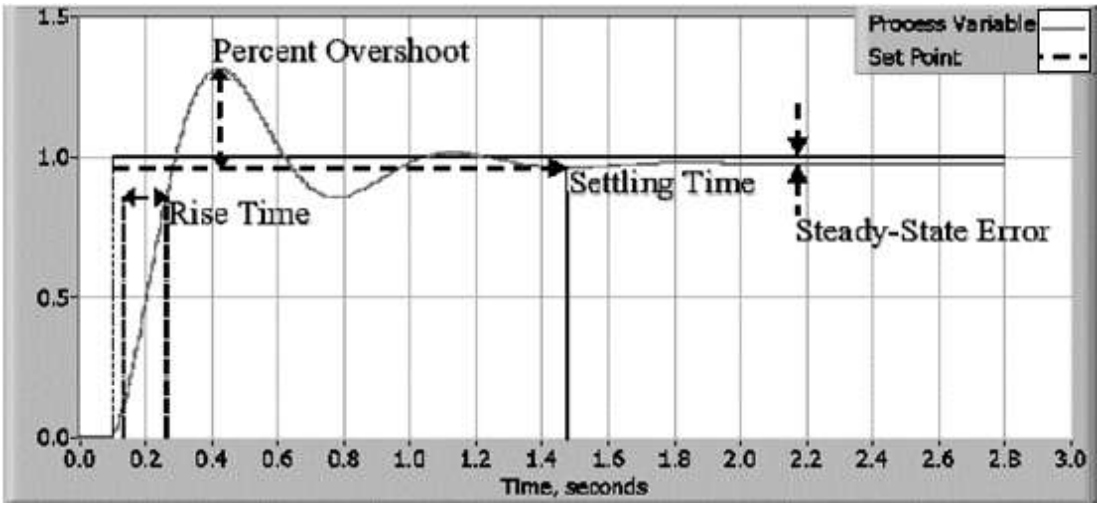
3-7 زمن الاستقرار (Settling Time):

وهو الزمن الذي يستغرقه المتغير المتحكم به للوصول إلى القيمة تقارب القيمة المرغوبة، بنسبة خطأ صغيرة عادة تقدر بـ 5% [4].

4-7 خطأ الحالة الثابتة (Steady State Error):

وهو الفرق النهائي بين المتغير المتحكم به والقيمة المرغوبة بعد أن تستقر الاستجابة [4].

ويبين الشكل (4) منحني استجابة متحكم PID موضحاً عليه المميزات الأساسية والتي تم تعريفها سابقاً:



الشكل (4) المميزات الرئيسية لمنحني استجابة منظم PID

ويبين الجدول (1) تأثير كل نمط من أنماط المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي على المتغيرات سابقة التعريف:

الجدول (1) تأثير ثوابت المنظم PID على مميزات الاستجابة الخاصة به

خطأ الاستقرار	زمن الاستقرار	التذبذب	زمن الارتفاع	استجابة النظام
يقل	تغير بسيط	يزيد	يقل	زيادة KP
يلغي	يزيد	يزيد	يقل	زيادة KI
تغير صغير	تغير بسيط	يقل	تغير بسيط	زيادة KD

في كثير من الأحيان يتم استخدام إحدى المتحكمات المنطقية القابلة للبرمجة (Programmable Logical Controller (PLC)) كمتحكم تناسبي تكاملي تفاضلي، وتعد شركة SIEMENS شركة رائدة بإنتاج هذا النوع من المتحكمات وبإنتاج الكثير من أدوات الأتمتة التي تستخدم في عمليات التحكم.

تُعَدُ عائلة S7-300 S7-400 PLC من أشهر عائلات المتحكمات من النوع (PLC) التي أنتجتها شركة SIEMENS، نظرا للموثوقية والجودة العالية ولإمكانية اتصال هذه المتحكمات ببعضها وبطرفيات ومشغلات أخرى عن طريق الشبكات الصناعية مثل شبكات PROFIBUS وشبكات PROFINET، ونظراً لمرونة البرنامج الخاص ببرمجة هذه المتحكمات والذي يسمى SIMATIC Step7.

يتكون برنامج المستخدم من مجموعة صناديق (كتل) برمجية مرتبطة ببعضها، ويمكن أن تكون هذه الصناديق واحدة من الأنواع التالية:

1) الصناديق التنظيمية (Organization Blocks) أو اختصاراً (OB).
2) صناديق التوابع (Function Blocks/ System Function Block) أو اختصاراً (FB/ SFB).
3) التوابع (Function/ System Function) وتختصر (FC/ SFC).
4) صناديق البيانات (Data Block) أو (DB).

يعتبر الصندوق التنظيمي (OB1) بمثابة جسم البرنامج الرئيسي الذي يبدأ التنفيذ منه ويستمر تنفيذه بشكل دوري، والذي من خلاله يتم استدعاء مجموعة من التوابع (FC) والتوابع الصندوقية (FB) وتنفيذ تعليمات مختلفة، كما يحتاج كل تابع صندوقي إلى صندوق بيانات (DB) ليخزن ضمنه المتغيرات الخاصة بدخل التابع الصندوقي وخرجه [5].

يتيح برنامج SIMATIC Step 7 مكتبات من صناديق التوابع الجاهزة (SFB) وسنستخدم منها مكتبة خاصة بالمتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية (PID) والتي تتيح مجموعة كبيرة من صناديق التوابع. سنختار منها التابع الصندوقي SFB 41/FB 41 المسمى بالتحكم المستمر (Continuous Control with SFB 41/FB 41 "CONT_C")، حيث سيكون هذا التابع بمثابة المتحكم وستتم معايرته وأمثلته للحصول على أفضل النتائج.

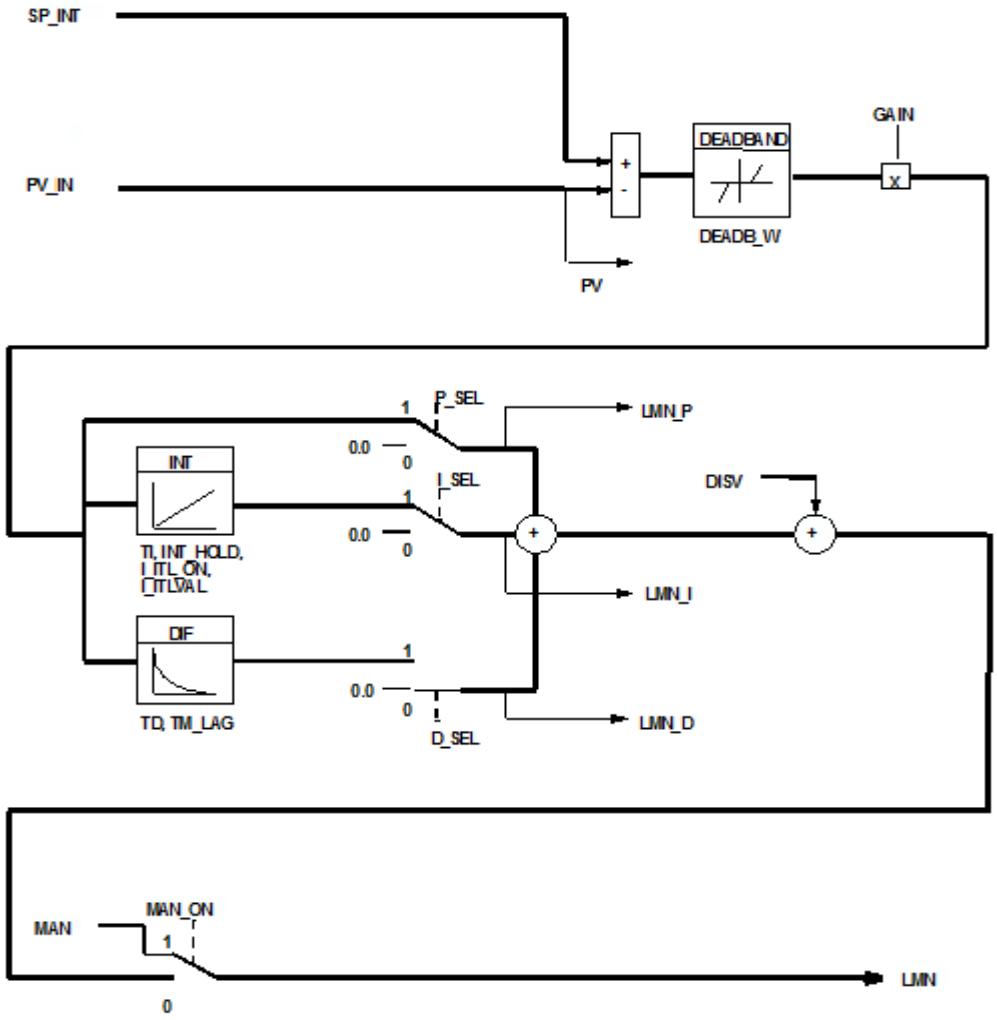
5-تابع التحكم PID ("CONT_C" SFB 41/FB 41 Continuous Control with):

يستخدم هذا التابع في برمجة المتحكمات المنطقية من عائلة SIMATIC S7 للتحكم بالعمليات ذات معطيات دخل مستمر (Continuous) ومعطيات خرج مستمرة أو تشابهية. ومن خلال اسناد البارامترات لهذا التابع يمكننا معايرة المتحكم كما يمكننا تفعيل أو إلغاء تفعيل الكثير من الوظائف الفرعية التي من الممكن أن يقوم بها بما يتلاءم مع العملية التي يتحكم بها.

1- التطبيق:

يمكن استخدام هذا التابع كمنظم من النوع PID أو كمتحكم ذو حلقات مغلقة متعددة ومتتالية أو كحلقات متداخلة، وذلك عن طريق الاستدعاء المتداخل أو المتتالي لتابع المنظم PID، حيث يرتكز عمل هذا التابع على مبدأ عمل المنظم من النوع PID، إلا أنه يستخدم ثابت ربح وحيد (Gain) يتم ضرب إشارة الخطأ به بدلاً من وجود ثابت ربح لكل نمط على حدى ثم تمريرها إلى كافة أنماط المتحكم ليتم جمع خرج هذه الأنماط. وسيتم تطبيق هذا التابع للتحكم بسرعة محرك ثلاثي الأطوار بهدف المحافظة على سرعة هذا المحرك عند قيمة مرغوبة ثابتة وضمن ظروف تشويش قد تؤثر على استقرار هذا النظام، وتُعَدُ منظومة التحكم هذه إحدى المنظومات الأساسية في عمل الروافع وعمليات التحكم بالمضخات ضمن محطات ضخ المياه وغيرها من المنظومات.

تُمَثل بنية هذا التابع بالمخطط الصندوقي المبين بالشكل (5) والذي يبين المداخل والمخارج وكافة الكتل والصناديق الوظيفية الفرعية (Functions Block) وارتباطات هذه الكتل ببعضها والتي تشكل بمجملها التابع Continuous Control with SFB 41/FB 41:

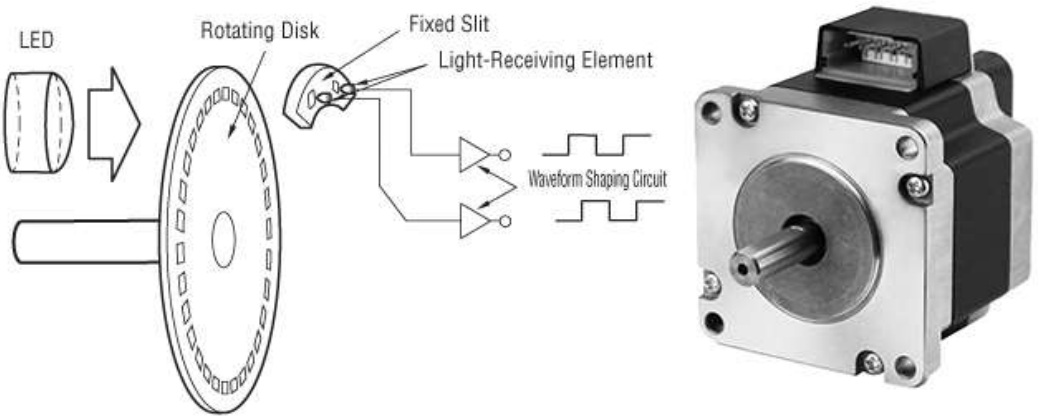


الشكل (5) المخطط الصندوقي لبنية التابع (Continuous Control with SFB 41/FB 41)

يمكن إدخال القيمة المرغوبة لهذا التابع بصيغة الفاصلة العائمة من خلال مدخل التابع (SP_INT)، وفي هذا التطبيق سيتم إدخال سرعة مرغوبة هي 50% من السرعة العظمى للمحرك.

كما أنه من الممكن أن تدخل قيمة المتغير المتحكم به (PV_IN) كنسبة مئوية.

أن سرعة المحرك الفعلية هي المتغير المتحكم به ضمن عملية التحكم بسرعة المحرك. ويمكن الحصول على قيمة السرعة الفعلية عن طريق مرمزات السرعة (Speed Encoder) المبينة بالشكل (6) والتي تكافئ حساسات سرعة يتم تركيبها على محور المحرك لتقوم بتحويل سرعة دوران هذا المحرك إلى نبضات كهربائية يتناسب ترددها طرداً مع سرعة دوران المحور [6]، ويتم إدخال هذه النبضات إلى الـ PLC ليتم قراءتها وحسابها كنسبة مئوية.



الشكل (6) الشكل الخارجي وبينة مرمزات السرعة

يتم معرفة سرعة دوران المحرك من خلال معرفتنا الدقيقة لكل من مُرمِز السرعة والمحرك. فإذا كان مُرمز السرعة يولد 200 نبضة كلما أنجز محوره دورة كاملة وإذا اعتبرنا بأن سرعة دوران المحرك العظمى هي 1200 دورة بالدقيقة فإن عدد النبضات الواردة على مدخل الـ PLC بالثانية عند دوران المحرك بكامل سرعته سيكون مساوٍ لـ 4000 نبضة بالثانية وذلك من خلال العلاقة (2):

$$Pulse_Count_Per_Second = \text{Pulses_Per_Cycle} * \frac{Motor_{speed}(rpm)}{60\ Sec} \qquad (2)$$

وبالتالي فإن عدد النبضات الواردة على مدخل المتحكم الموصول إلى مرمز السرعة ستتراوح ما بين (0…4000) نبضة بالثانية، يتم صياغة هذه المعادلة برمجياً ثم تخزين هذه النبضات ضمن إحدى مواقع الذاكرة الموجودة داخل المتحكم وليكن الموقع MD182، ثم يحول المجال السابق إلى نسبة مئوية (ليلائم دخل التابع الذي نتعامل معه) وذلك بتقسيم قيمة الموقع MD182 على 40 ليتم تخزين القيمة الجديدة ضمن الموقع MD186 والذي يمثل المدخل PV_IN للتابع.

2- إشارة الخطأ (Error Signal):

تعرف إشارة الخطأ في المتحكمات بأنها حاصل طرح القيمة المرجعية أو القيمة المرغوبة من قيمة المتغير المتحكم به.

يمكن أن يطبق مبدأ الحزمة الميتة (DEAD BAND) على إشارة الخطأ، حيث يقوم هذا المبدأ على إهمال التذبذبات الصغيرة لإشارة الخطأ أي إهمال الفروق الصغيرة بين القيمة المرغوبة وقيمة المتغير المتحكم به كهامش خطأ مسموح به.

يمكن تحديد عرض هذه الحزمة الميتة (أي قيمة إشارة الخطأ التي ستهمل جميع القيم الأصغر منها) من خلال المُدخل DEADB_W، كما يمكن إيقاف تأثير الحزمة الميتة على إشارة الخطأ بجعل هذا المدخل يأخذ قيمة صفرية.

3-8 خوارزمية تابع المتحكم من النوع PID ("CONT_C" FB 41/SFB 41 Continuous Control with):

يمكن للتابع Continuous Control with SFB 41/FB 41 أن يطبق مبدأ المنظم التناسبي والتكاملي والتفاضلي على إشارة الخطأ، وكما هو واضح بالرسم الصندوقي لهذا التابع المبين بالشكل (5) فمن الممكن تفعيل أو إيقاف أياً من الأثر التكاملي (INT) أو التفاضلي (DIF) اللذان يطبقان بشكل تفرعي على إشارة الخطأ، الشيء الذي

يمكن هذا التابع من أن يكون متحكم تناسبي فقط (P) أو تناسبي تكاملي فقط (PI) أو تناسبي تفاضلي (PD) كما يمكن تفعيل جميع الأنماط ضمنه ليصبح متحكم تناسبي تكاملي تفاضلي (PID).

كما يمكن أن يصبح هذا التابع منظم تكاملي فقط (I) وذلك بتعطيل النمط التفاضلي وجعل ثابت الربح التناسبي مساوٍ للواحد.

ويمكن أن يغدو منظم تفاضلي فقط (D) بإيقاف الأثر التكاملي وجعل ربح النمط التناسبي مساوٍ للواحد.

4-8 قيمة خرج التابع PID:

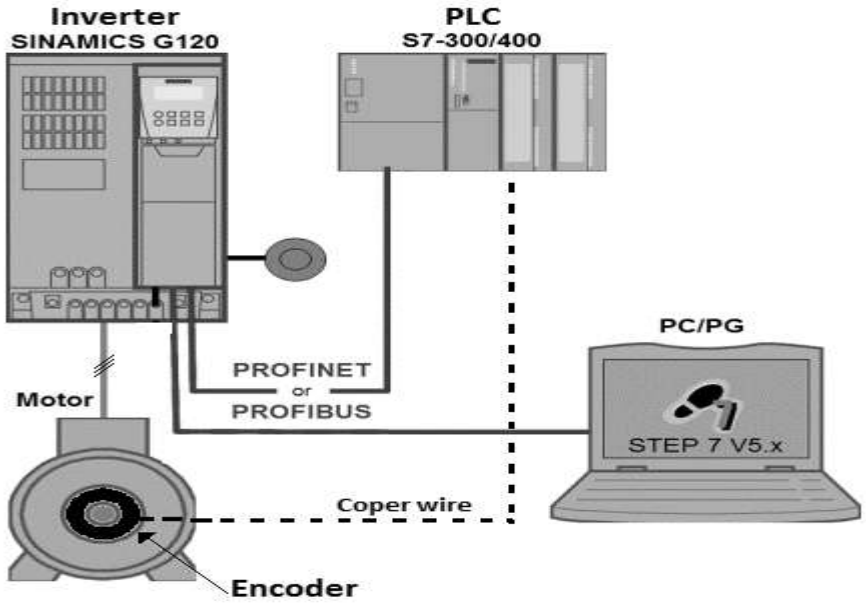
تمثل هذه القيمة متغيِر التحكم (LMN) الذي يؤثر به المتحكم على العملية المتحكم بها بالشكل الذي يجبر به المتغير المتَحَكَم به (PV_IN) من أن يقترب شيئاً فشيئاً من القيمة المرغوبة (SP_INT).

كما ويمكن تحويل عمل هذا التابع من نمط الحلقة المغلقة إلى الحلقة المفتوحة من خلال تفعيل مدخل العمل اليدوي (MAN_ON)، وعندها سيقوم بتمرير قيمة ثابتة إلى الخرج محددة بالمدخل (MAN) بغض النظر عن القيمة الفعلية للمتغير المتحكم به.

وعند التحكم بسرعة دوران محرك لابد من استخدام مبدلة ترددية (INVERTER)، الذي يعمل على تحويل إشارة التحكم الكهربائية الخارجة من المتحكم PLC إلى تغذية كهربائية ثلاثية الطور ذات تردد متغير متناسب مع إشارة التحكم الداخلة إليه [8] [7]، لتُقدم هذه التغذية ذات التردد المتغير إلى المحرك مما يؤدي إلى تغيير سرعته.

كما يتيح هذا التابع SFB 41/FB 41 إمكانية فرض تشويش معين على إشارة خرجه، وذلك في حال إمكانية قياس التشويش الذي تتعرض له العملية المُتَحَكَم بها من خلال التغذية الأمامية المتمثلة بالمُدخَل (DISV)، والتي تمثل قيمة تضاف إلى الخرج النهائي أو تطرح منه.

يبين الشكل (7) المكونات المستخدمة لإنجاز التجربة والتي سبق شرحها، كما يبين كيفية توصيلها والارتباطات فيما بينها مع الانتباه إلى استخدامنا كابلات توصيل من النوع PROFIBUS أو PROFINET وهي عبارة عن كابلات خاصة بنقل البيانات (Data Cable) وتعد الأكثر استخداماً في مجال الشبكات الصناعية [9].



الشكل (7) مكونات التجربة وطريقة اتصالها

5 بارامترات الدخل الخاصة بتابع التحكم PID:

من الممكن معايرة المتحكم PID من خلال ضبط ومعايرة قيم مداخل التابع SFB 41/FB 41. والجدول (2) يوضح نوع ووظيفة أهم مداخل التابع CONT_C "Continuous Control with SFB 41/FB 41"، كما يبين القيم الافتراضية لهذه المداخل ومجال القيم المسموح إسنادها [5]:

الجدول (2) بارامترات الدخل الخاصة بتابع الـ PID مع أنماط البيانات الخاصة بها وقيمها الابتدائية

بارامتر الدخل	نوع البيانات	مجال البارامتر	القيمة الافتراضية	وصف عام لبارامتر الدخل
COM_RST	BOOL		FALSE	:Complete Restart يؤدي تفعيل هذا المدخل إلى إعادة تشغيل كافة الفعاليات لهذا التابع من البداية.
MAN_ON	BOOL		TRUE	:Manual Value On يحول التابع للعمل بشكل يدوي
P_SEL	BOOL		TRUE	:Proportional Action On يفيد هذا المدخل في تشغيل/إيقاف النمط التناسبي.
I_SEL	BOOL		TRUE	:Integral Action On يفيد هذا المدخل في تشغيل/إيقاف النمط التكاملي.
D_SEL	BOOL		TRUE	:Derivative Action On يفيد هذا المدخل في تشغيل/إيقاف النمط التفاضلي.
CYCLE	TIME	>= 1 ms	T#1s	:Sampling Time يحدد هذا المدخل الزمن الفاصل بين النداءات المتتالية للتابع.
SP_INT	REAL	−100.0 to +100.0 (%)	0.0	:Internal Setpoint مدخل تحديد القيمة المرغوبة للمتغير المتحكم به.
PV_IN	REAL	−100.0 to +100.0 (%)	0.0	:Process Variable In وهي قيمة المتغير المُتحكَم به والذي سيعمل التابع.
MAN	REAL	−100.0 to +100.0 (%)	0.0	:Manual Value قيمة الخرج اليدوي عند تفعيل مدخل (MAN_ON).
GAIN	REAL		2.0	:Proportional Gain ربح النمط التناسبي أو قيمة ثابت التناسب.

TI	TIME	>= CYCLE	T#20s	:Reset Time يحدد هذا المدخل زمن استجابة النمط التكاملي.
TD	TIME	>= CYCLE	T#10s	:Derivation Time يحدد هذا المدخل زمن استجابة النمط التفاضلي.
TM_LAG	TIME	>= CYCLE	T#2s	:Time LAG Of The Derivative Action تحتوي آلية عمل النمط التفاضلي على ما يسمى بفواصل الانتظار والذي يمثل الفواصل الزمنية للتفاضل.
DEADB_W	REAL	>= 0.0 (%)	0.0	:Dead Band Width يحدد هذا المدخل عرض الحزمة الميتة.
DISV	REAL	−100.0 to +100.0 (%)	0.0	:Disturbance Variable في حال كان بالإمكان قياس قيمة التشويش الذي تتعرض له العملية فعندها يمكن أن تُدخل قيمة هذا التشويش كمتغير إلى هذا المدخل.

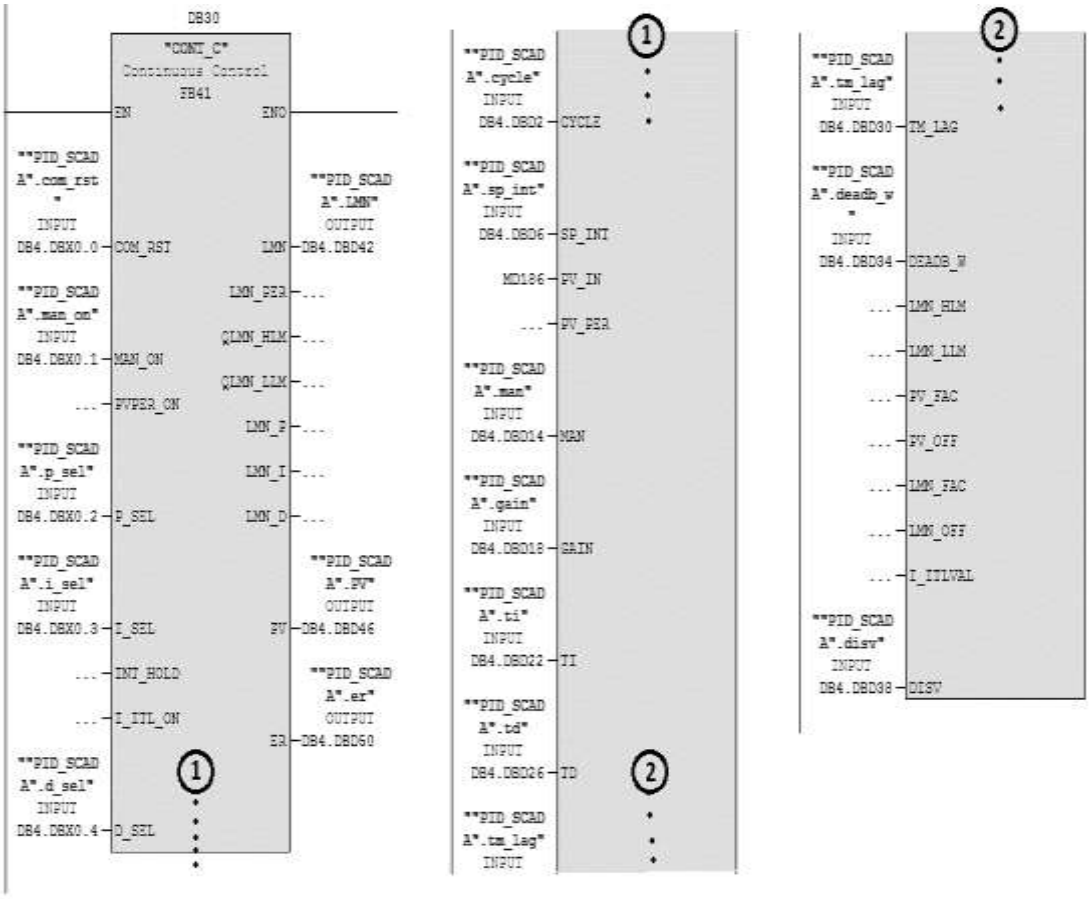
6 بارامترات الخرج الخاصة بتابع التحكم PID:

يوضح الجدول (3) نوع ووظيفة أهم مخارج التابع "Continuous Control with SFB 41/FB 41 CONT_C"، كما يبين القيم الافتراضية لهذه المخارج ومجال القيم المسموح إسنادها [5]:

الجدول (3) بارامترات الخرج الخاصة بتابع الـ PID مع أنماط البيانات الخاصة بها وقيمها الابتدائية

بارامتر الخرج	نوع بيانات الخرج	القيمة الافتراضية	وصف عام لبارامتر الخرج
LMN	REAL	0.0	Manipulated Value: ويمثل خرج التابع وهو المتغير الذي يمثل خرج المتحكم PID والمعروف بمتغير التحكم.
PV	REAL	0.0	Process Variable: ويمثل القيمة الفعالة للمتغير المُتحكَم به أي القيمة التي يتعامل معها هذا التابع.

وبعد إسناد قيم لمداخل هذا التابع وتخزين خرجه ضمن متغيرات بهدف نقلها إلى برنامج SCADA لمعايرة المداخل وعرض الخرج على الشاشة، يصبح التابع SFB 41/FB 41 كما هو مبين بالشكل (8):



الشكل (8) شكل التابع (Continuous Control with SFB 41/FB 41) ضمن صفحة عمل برنامج SIMATIC Step 7

من الممكن معايرة بارامترات هذا المتحكم أو ما يسمى (PID Parameter Tuning) بطرق كثيرة كطريقة التجريب والخطأ أو طريقة Cohen–Coon Method أو Ziegler–Nichols Method أو Tyreus–Luyben Method أو Autotune Method [10].

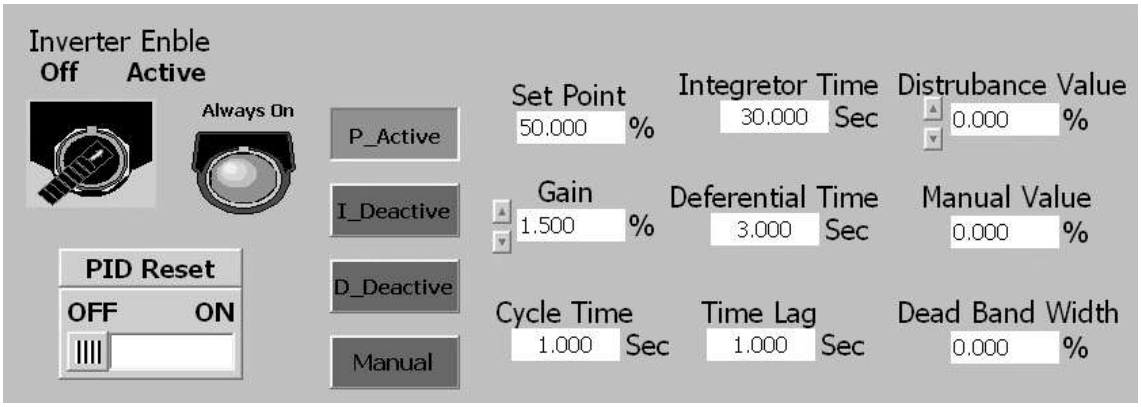
ومن خلال عملية التجريب والخطأ والتي تعتمد على معايرة المنظم التناسبي منفصلا لنحصل على استجابة مستقرة وبغض النظر عن خطأ الحالة الثابتة الذي يمكن أن يكون كبير، ثم يتم تشغيل النمط التكاملي ومعايرته للحصول على أصغر خطأ حالة ثابتة وأسرع زمن للاستقرار، ثم يتم تفعيل النمط التفاضلي مع النمطين السابقين وتتم معايرته للحصول أصغر نسبة تجاوز، وبحيث نحصل على أقل تذبذب في استجابة المتحكم [10].

النتائج والمناقشة:

بعد معايرة المتحكم بطريقة التجريب والخطأ، وباستخدام واجهة SCADA التي تم تصميمها لتسهيل عملية تغيير البارامترات ومراقبة النتائج بشكل واضح، تم الوصول إلى قيم الدخل التي أدت إلى أفضل النتائج وذلك لكل من الأنماط التالية:

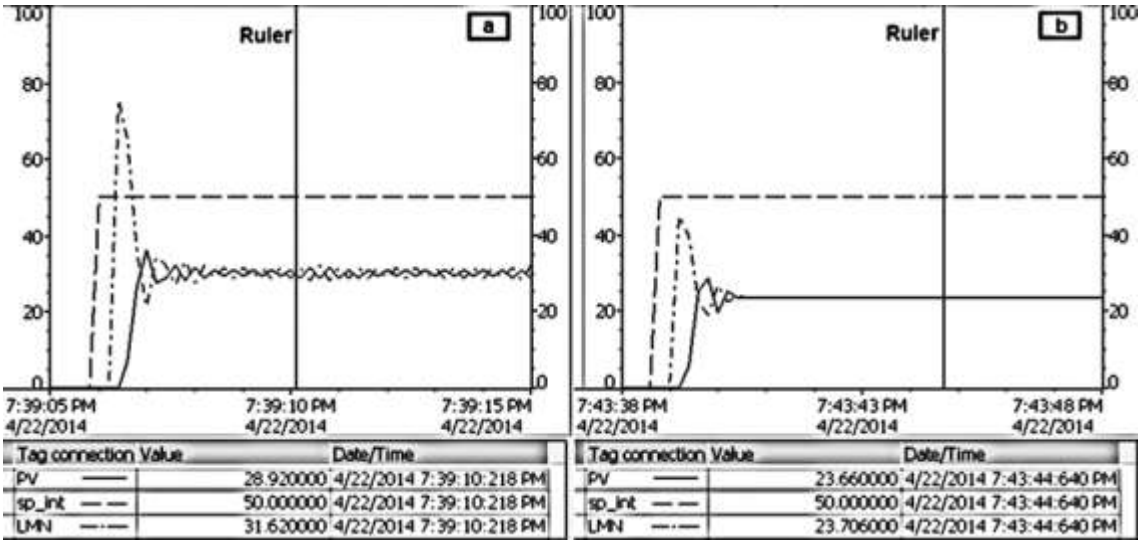
النمط التناسبي:

عند تشغيل النمط التناسبي (P) فقط وضبط بارامترات دخل الصندوق على القيم الموضحة بالشكل الذي يبين واجهة برنامج المراقبة SCADA.



الشكل (9) واجهة البارامترات الخاصة بتشغيل أنماط المتحكم PID وضبط براميتراته

تم الحصول على النتائج المبينة بالشكل (10-a)، حيث نلاحظ من المنحني البياني المبين بهذا الشكل أن استجابة النمط التناسبي (عند تطبيق قيمة مرغوبة مقدارها 50% وضبط ثابت الربح الخاص به على % 1.5) تعاني من تذبذب كبير وعدم استقرار حتى بعد الوصول لحالتها النهائية، بالإضافة لبعد القيمة النهائية للمتغير المتحكم به (PV) عن القيمة المرغوبة (SP). فالجدول المرافق للشكل يبين أن القيمة النهائية للمتغير المتحكم به كانت متذبذبة وقيمتها الوسطية هي 28.92% بينما القيمة المرغوبة هي 50% الشيء الذي يدل على خطأ حالة ثابتة كبير جداً.



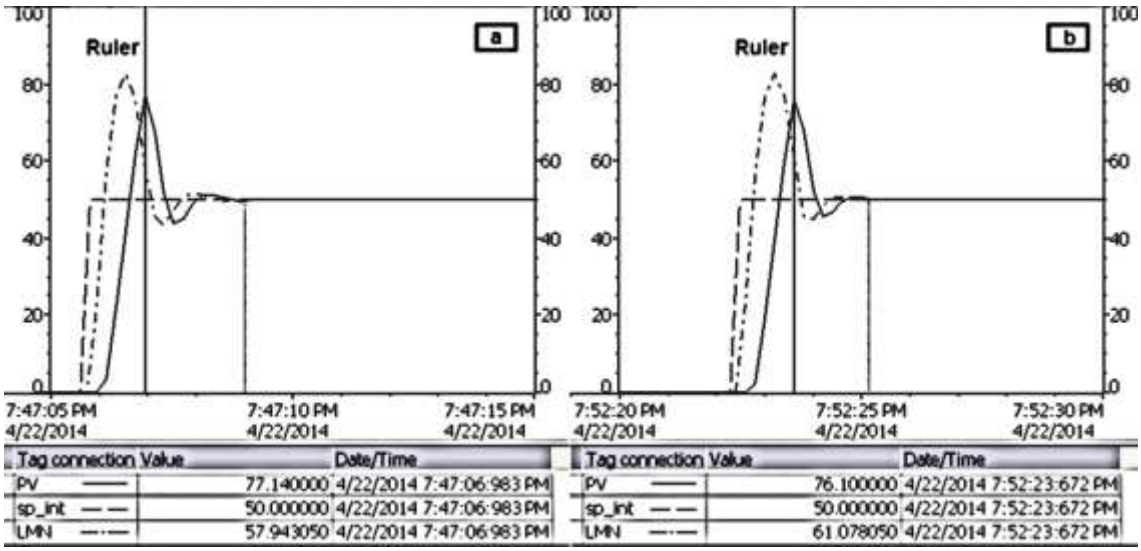
الشكل (10) استجابة النمط التناسبي عند ضبط ثابت الربح الخاص به على القيمة (a)1.5% و(b)0.9%

وعند تطبيق نسبة ربح مقدارها (Gain=0.9%) أصبح المنحني البياني للاستجابة كما هو عليه بالشكل (10-b). حيث نلاحظ من خلاله أن استجابة المتحكم التناسبي (عند تطبيق قيمة مرغوبة مقدارها 50%) قد عانت من

تذبذب كبير ولكنها استقرت عند قيمة ثابتة مقدارها 23.66%، كما أن قيمة المتغير المتحكم به (PV) بقيت بعيدة عن القيمة المرغوبة (SP) حتى بعد استقرار استجابة المتحكم.

النمط التكاملي والتناسبي التكاملي:

عند تشغيل النمط التكاملي (I) فقط وذلك بالضغط على المفتاح (I_Deactive) ليتحول إلى (I_Active) من خلال واجهة برنامج المراقبة (SCADA) المبينة بالشكل (9) وجعل البارامتر Gain=0.9% من خلال الواجهة نفسها (وهي القيمة التي استقر عندها المتحكم التناسبي)، نحصل على النتائج المبينة بالشكل (11-a):



الشكل (11) استجابة النمط التكاملي (a) واستجابة النمط التكاملي التناسبي(b)

حيث يبين الشكل (11-a) منحني استجابة المتحكم التكاملي فقط بتطبيق إشارة دخل مرغوبة (SP) قيمتها 50%، ويبين هذا المنحني بأن استجابة المتحكم التكاملي كانت متدرجة وعانت من بعض التذبذب وقد وصلت قيمة المتغير المُتَحَكَم به إلى قيمة أعظمية مقدارها (77.14%) أي أنها تجاوزت القيمة المرغوبة بمقدار (27.14%) ومنه نستنتج بأن نسبة التجاوز الأعظمي تساوي (54.28%)، وذلك بعد نسب قيمة الفرق % (50-77.14) إلى القيمة المرغوبة (SP) والتي تساوي (50%). وأن قيمة المتغير المتحكم (PV) قد وصلت إلى القيمة المرغوبة من دون وجود خطأ حالة ثابتة، ولكن السلبية الأساسية في نمط التحكم هذا هو نسبة التجاوز الكبيرة والبطء في الاستجابة، حيث أن النظام لم يستقر أي أن سرعة المحرك لم تصل إلى القيمة المرغوبة إلا بعد ما يقارب 3.4 sec وذلك عن طريق الإسقاط على محور الزمن (المحور x)، مع الانتباه أن محور الزمن مقسم إلى تدريجات وكل تدريجة تعادل ثانية واحدة.

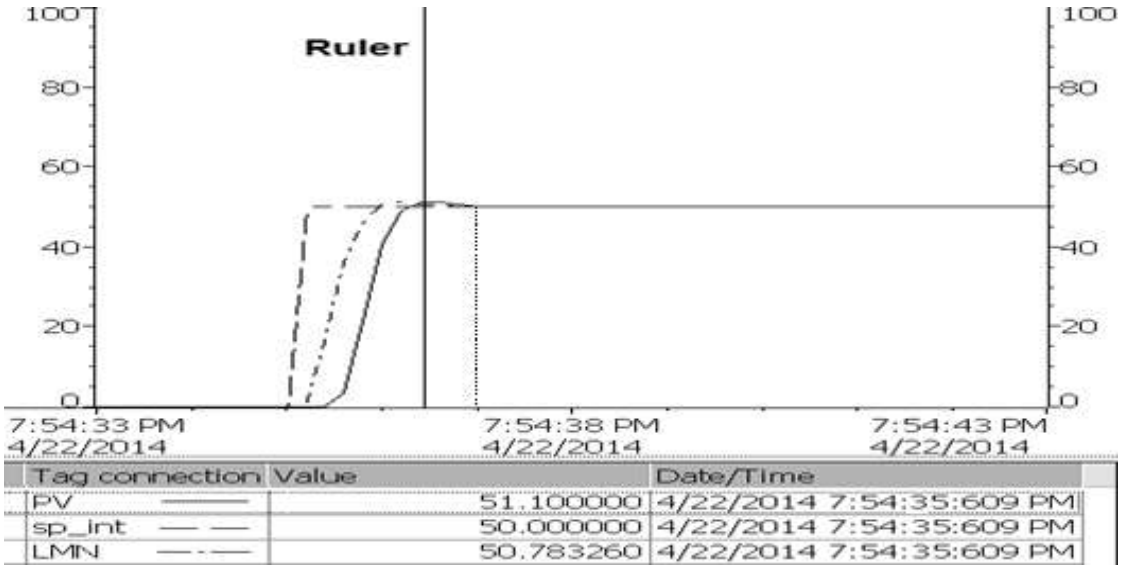
عند تشغيل النمط التناسبي التكاملي (PI) فقط وجعل قيمة المتغير (TI=30 sec) كما هو مبين في الشكل (9) والمحافظة على البارامترات التي تم الحصول عليها في التجربة الأخيرة، تم الحصول على النتائج المبينة بالشكل (11-b)، حيث يبين الشكل منحني استجابة المتحكم التناسبي التكاملي فقط بتطبيق إشارة دخل مرغوبة (SP) قيمتها 50%، ويبين هذا المنحني بأن استجابة المتحكم التناسبي التكاملي كانت سريعة بقدر كاف مع وجود تذبذب بسيط (تجاوز واحد وهبوط بسيط لمرة واحدة أيضا)، وأن قيمة المتغير المتحكم به (PV) قد وصلت إلى القيمة المرغوبة (SP) من دون وجود خطأ حالة ثابتة، كما أن سرعة الاستجابة (الزمن الفاصل بين تطبيق الدخل و الوصول إلى القيمة المرغوبة

بنسبة خطأ 5%) تقدر بـ 2.8 sec. أي سرعة المحرك ثلاثي الطور قد وصلت إلى قيمتها المرغوبة بزمن مقداره 2.8 sec وهو زمن جيد جداً، إلى أن السلبية البسيطة في استجابة هذا النمط من التحكم تكمن بقيمة التجاوز التي وصل إليها المتغير المتحكم به (PV) حيث وصلت نسبة التجاوز إلى 52.2%.

النمط التناسبي التكاملي التفاضلي:

عند تشغيل الأنماط الثلاثة معاً (التناسبي التكاملي التفاضلي (PID)) وضبط بارامترات دخل الصندوق على القيم الموضحة بالشكل (9) وجعل ثابت الربح Gain=0.9 تم الحصول على النتائج المبينة بالشكل (12).

يبين هذا الشكل منحني استجابة المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي عند تطبيق إشارة دخل مرغوبة (SP) قيمتها 50%. ويبين هذا المنحني بأن استجابة المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي كانت سريعة بقدر كاف مع وجود تذبذب بسيط جداً (تجاوز بسيط جدا لمرة واحدة) وأن قيمة المتغير المتحكم (PV)، قد وصلت إلى القيمة المرغوبة (SP) من دون وجود خطأ حالة ثابتة، كما أن سرعة الاستجابة تقدر بالزمن 1.9 sec أي أن سرعة المحرك ثلاثي الطور قد وصلت إلى قيمتها المرغوبة بزمن مقداره 1.9 sec فقط وهو زمن ممتاز، كما أن المتغير المتحكم به تجاوز القيمة المرغوبة بنسبة بسيطة مقدارها 2.2% وذلك بملاحظة أن القيمة العظمى لهذا التجاوز قد وصلت إلى 51.1%. وعليه فإن النمط التناسبي التكاملي التفاضلي يعد الأفضل في تجربتنا هذه نظراً للنتائج السابقة التي تسمح بقيادة المحرك المُتَحَكَم به بشكل يُأمن الدقة والسرعة في الاستجابة.



الشكل (12) استجابة النمط التناسبي التكاملي التفاضلي

الاستنتاجات والتوصيات:

يلخص الجدول (4) النتائج التي تم الحصول عليها من خلال التجارب السابقة كما يوضح الفروق بين الأنماط السابقة التي تم تجريبها:

الجدول (4) عرض النتائج للأنماط الرئيسية التي تم تجريبها

النمط/ المميزة	خطأ الاستقرار	زمن الاستقرار	التجاوز الأعظمي	زمن الارتفاع
التناسبي	كبير جدا	لا نهائي	كبير جدا	لا نهائي
التكاملي	لا يوجد	3.4 sec	54.28%	0.6 sec
التناسبي التكاملي	لا يوجد	2.8 sec	52.2%	0.4 sec
التناسبي التكاملي التفاضلي	لا يوجد	1.9 sec	2.2%	0.5 sec

يغلب استخدام النمط التناسبي التكاملي التفاضلي في التطبيقات التي تتطلب الدقة وسرعة الاستجابة، بينما التشكيلات الأخرى من الأنماط قد تكون ملائمة أكثر لأنواع أخرى من التطبيقات.

تساهم هذه المنظمات مساهمة فعالة في عمل الكثير من المنظومات التي يمكن أن نشاهدها كالروافع والمقصات الصناعية في خطوط الإنتاج. حيث لا يمكن لهذه المنظومات أن تعمل بشكل سليم لولا استخدامها هذا النمط من التحكم.

كما يوصى بإجراء نمذجة ومحاكاة لهذا النوع من المتحكمات، مما يمكن الباحث في هذا المجال من الحصول على نتائج تجريبية قبل التنفيذ العملي والذي قد يكون غير متاح، كما يمكنه من مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج الواقعية.

المراجع:

[1] – YUAN, X; JIANPING, Y; LIJUN, E. *Research and Design on Electric Control System of Elevator Tower for Safety Devices*. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing, China VOL. 421, 2013, 601-614.

[2] – GABASOV, R; KIRILLOVA, M. F; BALASHEVICH, V. N. *OPEN-LOOP AND CLOSED-LOOP OPTIMIZATION OF LINEAR CONTROL SYSTEMS.* Asian Journal of Control Minsk, Belarus. Vol. 2, No. 3, September 2000, 155-168.

[3] – SHAW, A. J. *The PID Control Algorithm How it works, how to tune it, and how to use it*. 2nd. Ed, Process Control Solutions, North Carolina, U. S. A, 2003, 514.

[4] – BASILIO, C. J; MATOS, R. S. *Design of PI and PID Controllers with Transient Performance Specification*. IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 45, NO. 4, NOVEMBER 2002, 364-372.

[5] - SIMATIC. Standard Software for S7-300 and S7-400 PID Control V5.5. Source: www.ad.siemens.de.

[6] – ZIDANI, F; DIALLO, D; BENBOUZID, H. M; BERTHELOT, E. *Diagnosis of Speed Sensor Failure in Induction Motor Drive. IEEE International Electric Machines*, VOL. 2, 2007, 1680-1685.

[7] – RAJU, I. N; ISLAM, S. M; UDDIN, A. A. *Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuit & Simulation of PWM Inverter for Standalone Load & Micro-grid System*. INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, Antalya, Turkey, Vol.3, No.3, 646-658.

[8]– د. م. محمد قاسم. *المرجع الكامل في التحكم الكهربائي الصناعي*. دار شعاع للنشر والعلوم، 2009، 310.

[9] – GARRY, L. *Future Communication Technology*. 2nd .Ed, Information Engineering Research Institute, U. S. A, 2013, 1511.

[10] – ROBERT, C. R. *PID Tuning Guide*. 1st. Ed, Control Station, Inc. New-York, U. S. A, 2010, 345.