

التحكم بمحرك قيار مستمر  
باستخدام خوارزمية التحكم التنبؤي

المقدمة أعدت لدرجة الإجازة في هندسة القيادة الكهربائية

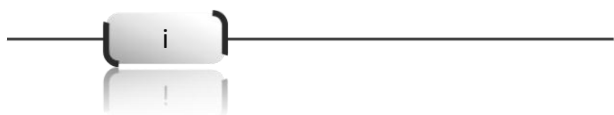
إعداد

حسن أبو رشيد

بإشراف الدكتور المهندس

عبد القادر جوخدار

الحمد لله رب العالمين



الإهداء

إلى من يهمة الأمر...

مع محبتي!..

حسن أبو رسيير

# شكر وتقدير

ما كان للكلمات أن تفي صاحب الحق حقه، ولا للعبارات المنمقة أن ترد ولو قليلاً من جميل أشخاص كان لهم عظيم الأثر في إنجاز هذا البحث. على أنني لا أملك إلا أن أقدم جزيل شكري وجيل احتراممي لمن وقف معي على طول الدرب، وأخذ بيدي إلى طرقات ملؤها الخير والعلم، وقدم لي من الدعم المادي والمعنوي ما أرجو أن أستطيع رده يوماً من الأيام.

أمام عائلتي أضع هذا العمل وكلي أمل أن يروا فيه شيئاً مما قد أفاضوه علي من مودة وحنان.

ولأستاذي ومعلمي الدكتور عبد القادر جوخدار أمد يدي بكل ما تستطيع حمله من مودة وعرافان بالجميل، فقد بدأت فكرة البحث من توجيهاته وإرشاداته المتبصرة، وكان على طول الطريق الرفيق الأمين الذي لطالما قوّم أخطائي (وما أكثرها)، ورفع معنوياتي كلما غاضت الأفكار وضاعت السبل، فكان لي أن أباهي به الصحب، وأحمد الله تعالى على نعمته بأن مرّ به طريق حياتي، فعسى أن لا أفقده على طول هذا الدرب.

ولابد لي من توجيه شكر جزيل للسيد Jonathan Currie الذي لم يبخل علي بأي إجابة أو مساعدة، بل كان له الفضل الكبير في إبداء النصح في عديد من التفاصيل والمشاكل التي واجهتني أثناء العمل، ولعل ما يقدمه بكل تقانٍ على موقعه الإلكتروني (وهو ضمن المراجع) أبلغ من أي تعبير عن جهده المبذول بكل إتقان في هذا الصدد، فله جزيل شكري وعظيم امتناني.

## مقدمة

إن تطور التحكم وتقنياته وتنوع المتحكمات لم يأت نتيجة ضرب من ضروب الترف العلمي، بل كان حاجة ماسة أوجدتها الثورات الصناعية في مختلف بلاد العالم.

وباختلاف الموارد وتنوع الصناعات كان لابد من التنوع في خوارزميات التحكم وطرق عمل المتحكمات لتغطية الشرائح المختلفة من العمليات الانتاجية والظروف الصناعية. ولا يمكن لأي باحث أن ينكر الدور الكبير الذي تلعبه الناحية الاقتصادية في سرعة واتجاه تطور عمليات التحكم وصناعة المتحكمات، حيث أن نشأة أي خوارزمية تحكم تعود في الأصل إلى المطلب الصناعي الأول الذي لا يستغني عنه أي مستثمر في الصناعة واقتصادها، وهو مطلب يقوم على مبدئين بسيطين من حيث الظاهر، وشديدي التعقيد من الناحية العملية، تلخصهما فكرة: **الأفضل أداءً والأرخص ثمناً**. ولما كانت فلسفة **الأفضل والأرخص** هاجس المهندسين التطبيقيين، فقد كانوا هم رواد التطور الكبير الحاصل في ميدان التحكم الصناعي وخوارزميات المتحكمات.

لكن الأمر لم يكن دائماً بين يدي المهندسين. فبداية فكرة التحكم موعلة في قدمها، بدأها العرب واليونان عن طريق اختراعهم للساعات، وهو ما قد يعد الفلسفة الأولى للمحافظة على حركة ثابتة بتغير الزمن، والحركة المعنية هي حركة الأجزاء الميكانيكية المختلفة للساعة قبل اختراع العقارب [1]. وقد تابع العرب تطوير هذه التقنيات التي كانت تقنيات ميكانيكية بحتة في ذلك الوقت، إلى أن بدأت عصور الانحدار والتدهور العلمي العربي، حيث أخذ بعدها الغرب بزمام التقدم العلمي ومضى من ورائه إلى إنجاز ثورة صناعية في أوروبا فجرت أبعاداً وأفاقاً جديدة للتطوير في مجال التحكم. ومنذ ذلك الوقت بدأت الصناعة تقود وتدعم عملية التقدم الهندسي، فالمشكلات التي كانت تواجه الصناعيين كانت تقدم للباحثين والمهندسين التطبيقيين المادة الخام لأفكار جديدة وخلاقة تهدف إلى تطوير التقنيات والخوارزميات التي لم تعد تلبى حاجات السرعة في الانتاج والدقة الكبيرة التي باتت أمراً ضرورياً لأي منتج حديث.

لقد بدأ العمل في طرق التحكم الميكانيكية في التاريخ الحديث في القرن الثامن عشر الذي ظهرت فيه الآلات البخارية، والتي احتاجت إلى عملية تنظيم للحرارة والتدفق والضغط داخلها، بهدف الحصول على مردود أكبر والحماية من الانفجار [1].

ومع بداية القرن التاسع عشر بدأت تظهر دراسات نظرية للأنظمة الصناعية، وأخذ علماء الرياضيات التطبيقية دورهم إلى جانب المهندسين في ايجاد النظريات والنماذج الرياضية التي تصف عمل هذه الأنظمة. وكان لتطور حل المعادلات التفاضلية دور كبير في إعطاء الباحثين زخماً جديداً وقدرة على التعمق في آليات عمل الأنظمة ودراسة استقرارها. ثم ما لبث التطور الرياضي أن قدم للباحثين طرقاً مهمة لتمثيل الأنظمة الميكانيكية والكهربائية بشكل معادلات رياضية مبسطة وبأشكال مختلفة، وهو الأمر الذي قاد إلى فتوحات جديدة في مجالات تحليل عمل الأنظمة المتحكم بها وخوارزميات التحكم نفسها.

وتنامت الاكتشافات الهندسية والرياضية بشكل تكافلي، فكلما حقق الرياضيون تطويراً نظرياً، بنى عليه المهندسون التطبيقيون خوارزميات تحكم جديدة، وما ينشأ عن هذه الخوارزميات من تعقيدات يحفز علماء الرياضيات لإيجاد آليات جديدة لتبسيطها والتعامل معها نظرياً. وبدأت ثمار هذا التعاون تظهر جلياً مع ظهور الآلات الحاسبة الأولى، والتي دفعت عملية التطوير إلى حدود جديدة من السرعة والفاعلية، حيث شكلت المنصة المثالية لاختبار خوارزميات التحكم وزيادة تعقيدها قدر ما هو مطلوب من النظام، وبدأت طرق التحكم الحديثة بالازدهار والنمو، مقدمة حلولاً فاعلة للأنظمة الصناعية وفتحة الطريق أمام صناعات شديدة التعقيد والتقدم حملت حياة الانسان إلى مستويات جديدة لم يسبق أن حلم بها.

ولم يعد التحكم مقتصرًا على أجهزة مفردة فحسب، بل امتد ليشمل أنظمة متكاملة من العمليات الانتاجية، واتخذ التطوير عندها طريقين اثنين يتقاطعان في نقاط كثيرة، أولهما يعمل على تطوير الخوارزميات التي تقود الأنظمة الصناعية، والثاني يتولى تطوير المعالجات والشرائح والدارات العملية التي تضمن تنفيذ تلك الخوارزميات على أنظمة متكاملة بأسرع زمن وأقل كلفة.

## الهدف من المشروع:

يهتم هذا المشروع بتقنيات التحكم الحديثة وخوارزمياتها، وهو عبارة عن دراسة مفصلة لواحدة من أهم وأحدث الخوارزميات التي بدأت تثبت نفسها في أوساط نظم التحكم الحديث. والتي ابتدأت كغيرها من التقنيات الحديثة فكرة منطقية عن أسلوب تحكم قريب ما أمكن إلى أسلوب التفكير البشري، بحيث ينتج عنه متحكمات قادرة على تصحيح أخطاء النظام بشكل فعال وسريع، لا بل إن هذه التقنية تذهب بالتحكم إلى مستوى أسمى إذ تعمل على تلافي حدوث الخطأ حتى قبل وقوعه، أي أن المتحكم عملياً يعمل على التنبؤ بحصول الخطأ في منظومة التحكم، وهو ما أعطى هذه المتحكمات اسم **المتحكمات التنبؤية Model Predictive Controllers**. هذه المتحكمات هي النتيجة المنطقية لتطبيق خوارزميات التحكم التنبؤي ضمن شرائح المعالجة الحديثة، والسريعة بما يكفي للعمل ضمن الزمن الحقيقي.

يقدم هذا البحث تطبيقاً لإحدى تقنيات التحكم التنبؤي على محرك تيار مستمر، بهدف إيضاح فكرة عمل هذه التقنية أولاً، وإثبات الدور الفعال الذي تستطيع المتحكمات التنبؤية المعتمدة على النماذج الرياضية الضلوع به ضمن الأنظمة الصناعية الحديثة ومنظومات التحكم المتطورة ثانياً.

ويقع البحث في أربعة فصول:

❖ يعنى الفصل الأول فيه بتفصيل التقنيات المختلفة التي نشأت عن فكرة التحكم التنبؤي، ويقدم شرحاً عن كل تقنية من هذه التقنيات من حيث الأسباب التي أدت لتطورها، وطرق استخدامها وبالتالي المواضيع المثلى لتطبيقها، والميزات التي تملكها بالنسبة لباقي الخوارزميات.

❖ أما الفصل الثاني فيأتي ليقدم دراسة شاملة للتقنية المعنية مباشرة بهذا البحث، وهي خوارزمية التحكم التنبؤي المعتمد على النماذج الرياضية **Model Predictive Control** فيشرح معادلاتها وطرق حساب قانون التحكم من خلالها، ويوضح أهم الوسائل التي تضمن للمتحكم التنبؤي القدرة الفعالة لإجبار النظام على ملاحقة القيم المرجعية له بأسرع استجابة ممكنة ضمن المحددات الفنية للنظام المتحكم به أو للعملية الإنتاجية بشكل عام.

❖ وفي الفصل الثالث نجد الخطوات العملية لتصميم متحكم تنبؤي ضمن نظام تحكم متكامل. ففيه الطريقة المتبعة في بناء النموذج الرياضي لمحرك التيار المستمر، والطرق البرمجية لتوليد مصفوفات الريح والمعايرة للمتحكم التنبؤي، إضافة إلى تطبيق هذه الطرق ضمن بيئة MATLAB/Simulink باستخدام أداة MPC TOOL للحصول على أمر التحكم وتطبيقه على المحرك السابق. كما يتضمن الفصل أيضاً تصميم متحكم تناسبي تكاملي للمحرك المذكور بهدف مقارنة أدائه مع أداء المتحكم التنبؤي لبيان قوة أداء هذا الأخير.

❖ وأما الفصل الرابع فمخصص لنتائج البحث النهائية، حيث نجد فيه أشكال استجابات السرعة والتيار للمحرك المستمر، ومقارنتها مع نتائج المنظم PI، إضافة إلى نتائج اختبار المتحكم التنبؤي في ظروف عمل متغيرة ومتعددة، بهدف إيضاح حصانته ضد تغيرات بارامترات نظام التحكم، وقدرته على ملاحقة الإشارة المرجعية مهما كان شكلها أو سرعة تغيرها.

لقد أريد لهذا المشروع أن يكون وسيلة في يد الطالب والباحث في مجال التحكم التنبؤي تساعده على الولوج إلى هذه التقنية وفهم مفرداتها بشكل مبسط ويعيد عن التعقيدات الرياضية، التي كثيراً ما تبتعد بالقارئ عن الفكرة الأساسية والنواة الفعلية لهذه التقنية.

إن النقص الملحوظ في الأبحاث عربية اللغة التي تتناول تقنيات التحكم التنبؤي كان دافعاً قوياً لنا في هذا البحث لنقدم شيئاً جديداً يثري المكتبة العربية في مجال مهم ندر جداً أن نجد له أي مرجع أو حتى مقال باللغة العربية. ورجاؤنا أن نستطيع تقديم بحث علمي واضح ودقيق لا ينساق وراء الاستنتاجات الرياضية مبتعداً عن فلسفة تقنية التحكم التنبؤي نفسها، بل يحاول أن يسخر المعادلات في شرح الأسس المنطقية التي تقوم عليها هذه التقنية، ولنذكر دائماً أن فكرة التحكم تبدأ بفلسفة تفكير معينة غالباً ما تحاكي التفكير الإنساني، وتتطور بعد ذلك لتجد لها طرقاتاً رياضية تكفل تطبيقها عملياً بطرق فيزيائية تبدأ بالآلات البسيطة، ولا تنتهي عند أكثر شرائح المعالجة تعقيداً. فعسى أن يكون هذا البحث قد حقق أكبر قدر ممكن من غاياته وأهدافه، والله من وراء القصد، وهو ولي التوفيق.

حسن أبو رشيد

حلب في 2011/7/3 الموافق 2/ شعبان/1432



# فهرس المحتويات

iv.....	مقدمة
vi.....	الهدف من المشروع
viii.....	فهرس المحتويات
xi.....	دليل الرموز
1.....	مدخل إلى التحكم التنبؤي
2.....	1-1 مقدمة
2.....	2-1 لماذا التحكم التنبؤي؟
5.....	1-2-1 الخطوة الأولى
5.....	2-2-1 الخطوة الثانية
10.....	3-1 خوارزمية IDCOM
12.....	4-1 خوارزمية (DMC) Dynamic Matrix Control
13.....	5-1 خوارزمية (QDMC) Quadratic Dynamic Matrix Control
14.....	6-1 خوارزمية Predictive Functional Control
15.....	بناء المتحكم التنبؤي - الخوارزمية العامة
16.....	1-2 مقدمة
16.....	2-2 مفاهيم أساسية
18.....	1-2-2 الاعتماد على عملية التنبؤ
19.....	2-2-2 عملية التنبؤ مبنية على نموذج للجملة
19.....	3-2-2 اختيار أمر التحكم الأمثل
20.....	4-2-2 الأفق المتحرك
21.....	5-2-2 الأداء الآمن
22.....	6-2-2 المعاييرة
22.....	7-2-2 مراعاة قيود (محددات) النظام

23.....	3-2 النماذج الرياضية المستخدمة في المتحكمات التنبؤية
25.....	1-3-2 نماذج معادلات الحالة
27.....	1-1-3-2 تضمين الاضطرابات في النموذج
28.....	2-3-2 نماذج توابع النقل
29.....	1-2-3-2 تضمين الاضطرابات في النموذج
29.....	2-2-3-2 إلغاء خطأ الحالة الساكنة
30.....	3-2-3-2 القواعد العامة لاختيار $Tz$ بالنسبة للتحكم التنبؤي
30.....	3-3-2 نماذج الاستجابة النبضية FIR
31.....	1-3-3-2 الاستجابة لتابع النبضة Impulse response
31.....	2-3-3-2 الاستجابة لتابع القفزة الواحدية Step response
32.....	4-2 إجراء عملية التنبؤ باستخدام النماذج المختلفة
32.....	البنية العامة لعملية التنبؤ
33.....	1-4-2 التنبؤ باستخدام معادلات الحالة
34.....	2-4-2 التنبؤ باستخدام توابع النقل
35.....	1-2-4-2 نموذج CARIMA وحيد الدخل والخرج مع $Tz = 1$
37.....	2-2-4-2 نموذج CARIMA متعدد المداخل والمخارج مع $Tz = 1$
38.....	5-2 اشتقاق قانون التحكم
38.....	1-5-2 العناصر الأساسية لتقنية GPC
38.....	1-1-5-2 تابع الكلفة وقيمتة الأمثلية
41.....	2-1-5-2 تأثير أفق التحكم على حسابات التنبؤ
41.....	3-1-5-2 قيود النظام
42.....	4-1-5-2 الأنظمة متعددة المداخل والمخارج
43.....	2-5-2 اشتقاق قانون التحكم التنبؤي اعتماداً على معادلات الحالة
44.....	1-2-5-2 أمر التحكم في نموذج معادلات الحالة المعتمد على تغيرات الدخل
47.....	6-2 التعامل مع قيود النظام
47.....	1-6-2 معادلات قيود النظام
47.....	1-1-6-2 القيود على تغيرات الدخل
48.....	2-1-6-2 قيود الدخل
49.....	3-1-6-2 قيود الخرج

50.....	2-6-2 حل مشكلة الأمثلية مع قيود النظام .....
52.....	<b>تصميم متحكم تنبؤي لمحرك تيار مستمر</b> .....
53.....	1-3 مقدمة .....
53.....	2-3 نمذجة محرك التيار المستمر .....
56.....	3-3 تصميم متحكم تناسبي تكاملي للمحرك .....
61.....	4-3 تصميم المتحكم التنبؤي .....
61.....	1-4-3 تشكيل نموذج معادلات الحالة الموسع .....
62.....	2-4-3 إجراء عملية التنبؤ والحساب الأمثلي لتابع الكلفة .....
63.....	3-4-3 نظام الحلقة المغلقة .....
67.....	<b>النتائج العملية والمناقشة</b> .....
68.....	1-4 مقدمة .....
69.....	2-4 اختبار المتحكم التنبؤي .....
69.....	1-2-4 اختبار أداء المتحكم عند السرعات العالية والمنخفضة .....
69.....	1-1-2-4 عند السرعات العالية .....
70.....	2-1-2-4 عند السرعات المنخفضة .....
71.....	2-2-4 تأثير فضاءي التحكم والتنبؤ على استجابة نظام التحكم .....
71.....	1-2-2-4 أثر أفق التحكم .....
72.....	2-2-2-4 أثر أفق التنبؤ .....
73.....	3-2-4 تأثير تغيير بارامترات المحرك على استجابة نظام التحكم .....
73.....	1-3-2-4 أثر تغيير مقاومة المتحرض $R_a$ .....
74.....	2-3-2-4 أثر تغيير عزم عطالة المحرك $J$ .....
76.....	4-2-4 الاستجابة لإشارة مرجعية متغيرة مع الزمن .....
76.....	1-4-2-4 الاستجابة لإشارة مرجعية متزايدة .....
76.....	2-4-2-4 الاستجابة لإشارة مرجعية جيبية .....
78.....	<b>الخاتمة والآفاق المستقبلية</b> .....
81.....	<b>المراجع</b> .....

## دليل الرموز

بهدف التقليل من حجم المصفوفات وتجنب تكرار كتابتها سنعمد في هذا البحث عدداً من الرموز التي تمثل مصفوفات معينة حسب ما يأتي، وسنستعوض بها عن كتابة المصفوفة كاملة بقصد التبسيط.

### ▪ أشعة المقادير المستقبلية والماضية:

تمثل مصفوفات المقادير المستقبلية بشعاع أسفل اسم المصفوفة على الشكل التالي:

$$\mathbf{x}_{\rightarrow k} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{x}_{k+2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

أما المقادير الماضية فتعطى بالشكل:

$$\mathbf{x}_{\leftarrow k} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k \\ \mathbf{x}_{k-1} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

### ▪ مصفوفات Hankel و Toeplitz:

بفرض الشعاع التالي:

$$n(z) = n_0 + n_1 z^{-1} + \dots + n_m z^{-m}$$

تعطى مصفوفة Toeplitz بالشكل:

$$\Gamma_n = \left[ \frac{C_n}{M_n} \right] = \begin{bmatrix} n_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ n_1 & n_0 & 0 & \cdots & 0 \\ n_2 & n_1 & n_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_m & n_{m-1} & n_{m-2} & \vdots & \\ \hline 0 & n_m & n_{m-1} & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & n_0 \end{bmatrix}$$

وأما مصفوفة Hankel فتعطى بالشكل:

$$H_n = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 & \cdots & n_{m-1} & n_m \\ n_2 & n_3 & n_4 & \cdots & n_m & 0 \\ n_3 & n_4 & n_5 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{m-1} & n_m & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ n_m & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

وباختصار:

$$\Gamma_n(i, j) = C_n(i, j) = n_{i-j}; \quad H_n(i, j) = n_{i+j-1}$$

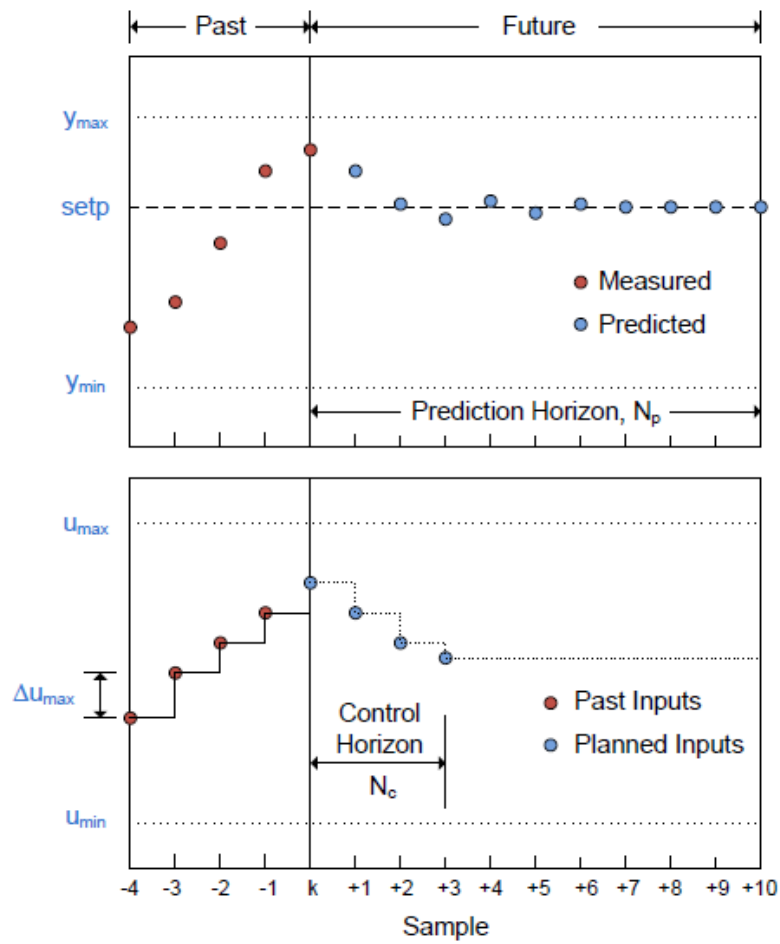
أما مقلوب مصفوفة Toeplitz فيعطى على الشكل:

$$[C_n]^{-1} = C_{\frac{1}{n}}$$

## الفصل الأول

# مدخل إلى التحكم التنبؤي

## INTRODUCTION TO PREDICTIVE CONTROL



## مدخل إلى التحكم التنبؤي

### INTRODUCTION TO PREDICTIVE CONTROL

#### 1-1 مقدمة:

كان للتطور السريع في الآليات الإنتاجية والاقتصاد الصناعي أكبر الأثر في تطوير منظومات تحكمية أسرع وأكثر تعقيداً ودقة. ومع ظهور الحواسيب وشرائح المعالجة الرقمية أصبح أمام الباحثين أفق واسع من الخيارات التي تجعلهم قادرين على تنفيذ أعقد الخوارزميات بأزمنة صغيرة، ومن هنا بات البحث عن تقنيات تحكم جديدة غير مقيد بمحدودية وسائل المعالجة، بل مرهوناً بإيجاد الحلول الإبداعية التي تضمن أداءً متفوقاً لأنظمة التحكم، والعمل على تطبيق هذه الحلول على شرائح أكثر سرعة ضمن أنظمة الزمن الحقيقي بهدف زيادة فاعليتها.

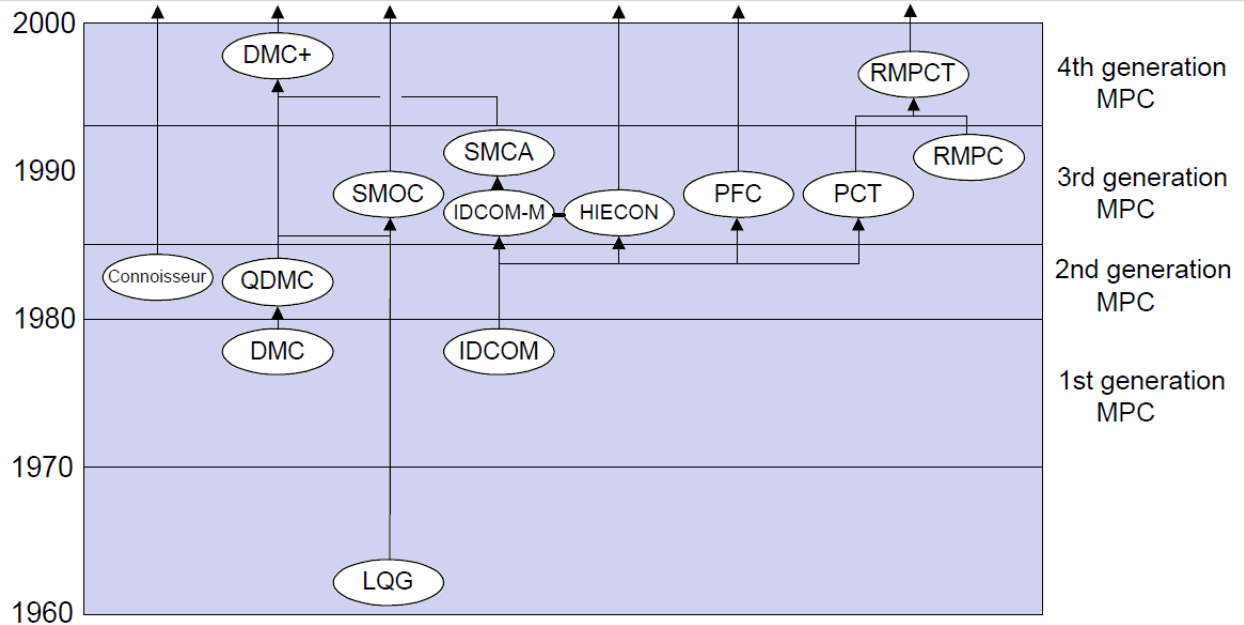
في هذا الفصل سيتم عرض تقنيات التحكم التنبؤي بشيء من التفصيل، وربطها بتسلسل ظهورها في ميدان التحكم الحديث كاستجابة لمتطلبات الصناعة. والهدف المرجو في نهاية الفصل هو إيصال القارئ إلى مرحلة يملك فيها القدرة على التمييز بين مختلف هذه التقنيات من حيث أسباب تطويرها، وما تتمتع به من مزايا ومساوئ، ليبنى على هذه المعلومات قراره في اختيار المتحكم التنبؤي المناسب الذي يتوافق مع كل تطبيق من تطبيقاته.

#### 2-1 لماذا التحكم التنبؤي؟

يبين الشكل (1-1) مخططاً لتطور خوارزميات التحكم التنبؤي المختلفة، وعلاقتها ببعضها البعض. تبدأ فكرة التحكم التنبؤي مع أبحاث العالم Kalman [2]، الذي صمم في ستينيات القرن الماضي تقنيته المعروفة باسمه (مرشح كالمن) والذي يعد حصيلة أبحاثه عن التحكم الأمثلي، وهو التحكم الذي عاد إلى استخدام المعادلات التفاضلية بعد أن مالت أوساط المهندسين والباحثين إلى اعتماد طرق التحليل الترددي لدراسة



أنظمة التحكم. إن ميزة المعادلات التفاضلية هي قدرتها على تمثيل النظم ضمن متحولات تابعة للزمن وليس للتردد، وهذا الأمر بالغ الأهمية لو نظرنا له من وجهة نظر أنظمة الزمن الحقيقي، لذلك فقد كان جل اهتمام Kalman والباحثين المشاركين له هو إيجاد متحكم قادر على ملاحقة تغيرات النظام بشكل آني مع الزمن، وغير معتمد فقط على تغيرات الدخل والخرج بل وأيضاً على متحولات حالة داخلية خاصة بالنظام، الأمر الذي يعني إمكانية مراقبة حالة النظام وتغييراته الداخلية للتمكن من إعطاء أمر التحكم المناسب الذي يأخذ بعين الاعتبار تغيرات بارامترات النظام إضافة إلى تغيرات مخارجه ومدخله.



الشكل 1-1 مراحل تطور التحكم التنبؤي

بدأ Kalman وزملاؤه من جملة معادلات الحالة الخطية ضمن الزمن المتقطع [2]:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k \quad [1-1]$$

$$y_k = Cx_k + \varepsilon_k \quad [1-2]$$

حيث:

- $u_k$  هو الدخل في اللحظة الحالية.
- $y_k$  هو الخرج الحالي القابل للقياس.
- $x_k$  هو شعاع الحالة الذي يتم التحكم بكل عنصر منه.
- $w_k$  هو الضجيج الواقع على متحولات الحالة، وهو ضجيج أبيض<sup>1</sup>.
- $\varepsilon_k$  هو ضجيج القياس، وهو ضجيج أبيض أيضاً.

وضن هذا السياق تمت صياغة تابع الكلفة الذي يعتمد على مجموع مربعات الأخطاء في متحولات الحالة ومقاسات الدخل:

$$J = \sum_{j=1}^{\infty} ( \|x_{k+j}\|_Q^2 + \|u_{k+j}\|_R^2 ) \quad [1-3]$$

حيث تعطى الصيغة  $\|x_{k+j}\|_Q^2$  بالشكل:

$$\|x_{k+j}\|_Q^2 = x^T \cdot Q \cdot x$$

كما أن:

$$\|u_{k+j}\|_R^2 = u^T \cdot R \cdot u$$

ونلاحظ أن المصفوفة  $Q$  هي مصفوفة أوزان لمتحولات الحالة، و  $R$  هي مصفوفة الضجيج المترافق مع الدخل، وهما تستخدمان لمعايرة المتحكم.

إن عملية إيجاد الحل لمشكلة الأمثلية يقوم على الحصول على القيمة الأصغرية لتابع الكلفة، وهو ما يعني ببساطة إعطاء أفضل أمر تحكم بأقل استهلاك لموارد النظام (كالوصول للسرعة المطلوبة لمحرك بتطبيق أقل جهد ممكن مثلاً)، وقد حدد Kalman طريق هذه العملية بخطوتين [2]:

<sup>1</sup> الضجيج الأبيض هو ضجيج غير دوري يشمل طيفاً واسعاً من الترددات، يتميز بأن طاقته تبقى ثابتة على كامل مجاله الترددي لذلك يعتمد في الدراسات النظرية بشكل معياري.

**1-2-1 الخطوة الأولى:**

وتقوم على الاستفادة من الخرج الحقيقي الحالي لتوقع قيمة متحول الحالة (شعاع متحولات الحالة) الحالي، ثم استخدام متحول الحالة الحالي وقيمة الدخل الحالي لإيجاد متحول الحالة المتوقع في اللحظة التالية. تمثل هذه العملية بالمعادلات التالية:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_f(y_k - C\hat{x}_{k|k-1}) \quad [1-4]$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_{k-1} \quad [1-5]$$

حيث المقدار  $(y_k - C\hat{x}_{k|k-1})$  يمثل قيمة الخطأ بين الخرج الحقيقي والخرج المتوقع الناتج عن المخمن (Estimator)، ويسعى المخمن إلى إلغاء هذا الخطأ عن طريق تغيير قيم بارامتراته التي تمثل مصفوفات أمثال متحولات الحالة المتوقعة.

**1-2-2 الخطوة الثانية:**

ويتم فيها حساب أمر التحكم الأمثلي اعتماداً على متحكم تغذية عكسية بمتحولات الحالة المتوقعة:

$$u_k = -K_c \hat{x}_{k|k} \quad [1-6]$$

في المعادلات السابقة [1-4] و [1-5] و [1-6] يمثل العامل  $\hat{x}_{i|j}$  قيمة متحول الحالة  $x$  المتوقع في اللحظة  $i$  بناءً على المعلومات المتوفرة للمخمن حتى اللحظة  $j$ .

أما الثابتان  $K_f$  و  $K_c$  فهما عامل ربح مرشح كالمن وعامل ربح المتحكم على التوالي، وكلاهما يمكن حسابه من خلال مصفوفة ريكاتي Ricatti.

تدعى هذه الخطوات التي حددها Kalman الحل التربيعي الخطي الغوصي (LQG)، والمنظم المبني عليها يسمى بالمنظم التربيعي الخطي (LQR).

إن ميزة التحكم الأمثلي تكمن في فكرة تطبيقه (أي توقع متحولات الحالة وحساب أمر التحكم الأمثل) في كل لحظة زمنية من الفضاء الزمني المتقطع، وهذا الأمر أثبت أنه يعطي النظام استقرارية كبيرة [2]. وعند استخدام معادلات حالة تصف النظام بشكل دقيق وجد أن هذا المنظم قادر على الحفاظ على استقرار أي

نظام خطي (قابل للاستقرار وذي متحولات حالة قابلة للتوقع) طالما أن المصفوفة  $Q$  معرفة موجبة أو شبه معرفة موجبة، والمصفوفة  $R$  معرفة موجبة.

لكن هذا النمط من التحكم لم يتمكن من أخذ قيود النظام<sup>1</sup> (Constraints) سواء في الدخل أو الخرج أو متحولات الحالة بعين الاعتبار، ورغم أنه أصبح معياراً لحل مشكلات التحكم في ذلك الوقت، حيث تم اعتماد مرشح كالمن في العديد من الأبحاث في ميدان التحكم [2]، إلا أنه لم يتمكن من الولوج بقوة إلى عالم التطبيقات الصناعية، ويرجع ذلك إلى عدة عوامل أهمها [2]:

- **قيود العملية الإنتاجية System Constraints:** والتي لا تكاد تخلو أي صناعة منها، فالمنظمات التبريحية لم تكن تستطيع بمفردها التعامل مع هذه القيود.
- **اللاخطية في النظام Process Nonlinearities:** وهو أمر يُصعب المهمة كثيراً على متحكم خطي.
- **التغيرات في بارامترات النظام Model Uncertainty:** حيث أن النماذج الرياضية التي تمثل العمليات الإنتاجية هي نماذج بنيت على دراسات فيها الكثير من التقريب وإهمال العوامل صغيرة القيم بهدف تسهيل الحساب، وهو ما يعد مشكلة بالنسبة لنظام عليه في المقام الأول أن يحاول تخمين متحولات حالة غير دقيقة بحد ذاتها. وإن كان التغلب على هذه المشكلة يبدو سهلاً عن طريق إيجاد نماذج أكثر دقة تصف النظم المدروسة، فإن علينا أن نتذكر أن هذه النماذج عالية التكلفة مما يفقد المتحكم اقتصاديته في معظم العمليات الصناعية، ويجعله مقتصرًا على بعض التطبيقات ذات الميزانيات المرتفعة كأبحاث الطيران والفضاء.
- **الأسباب المتعلقة بالمستثمرين المنفذين:** ولعل هذا السبب أكثر العوامل التي أبعدت المتحكم التبريحي عن الصناعة، ذلك أن الفنيين والمهندسين لم يكونوا معتادين على النظريات الأمثلية في التحكم، وكان من الصعب متابعة الخطوات المتعددة والمعقدة نسبياً لهذا النوع من التحكم.

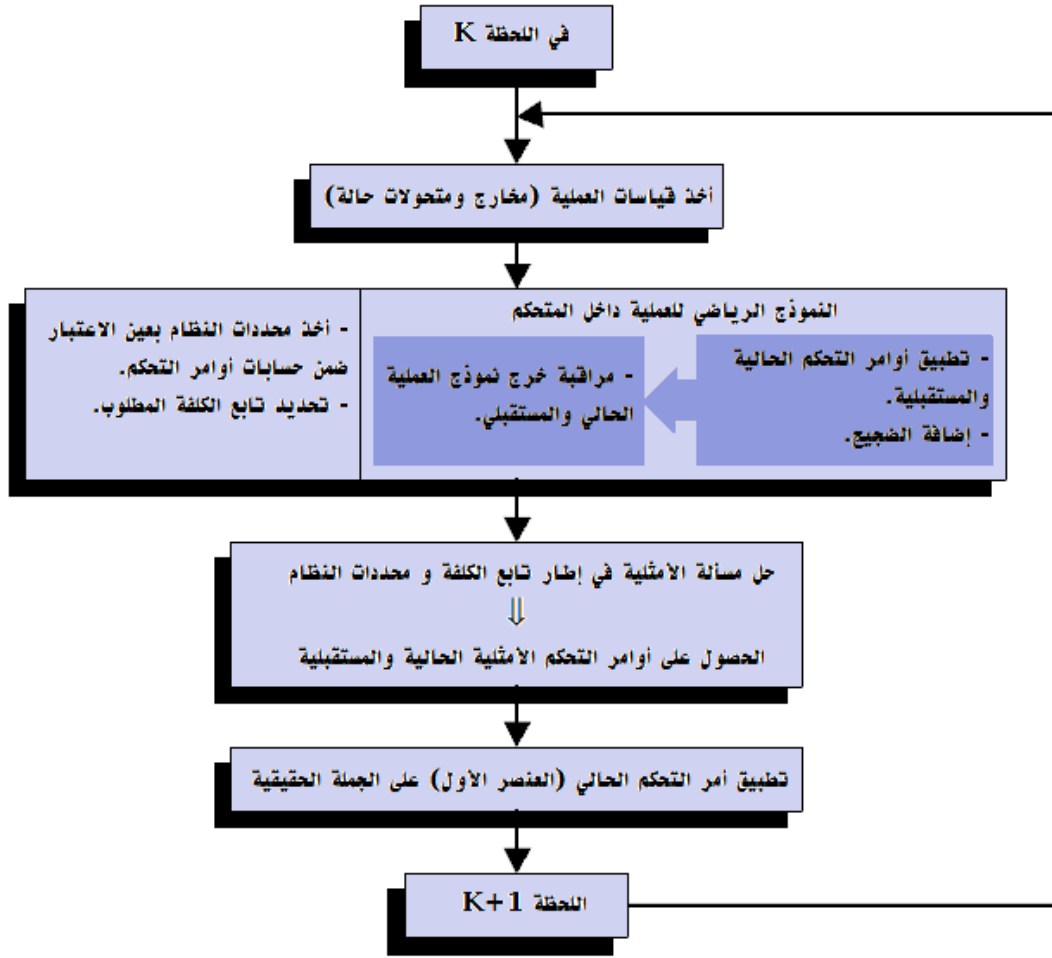
<sup>1</sup> القيود هي قيم للمداخل والمخارج ومتحولات الحالة لا يستطيع النظام تأمينها، مثلاً الجهود المرتفعة جداً والتي لا تستطيع المبدلات المستخدمة في نظام قيادة المحرك تقديمها.

كل هذه الأمور دعت إلى تطوير متحكمات أقدر على التعامل مع النظم اللاخطية وقيود العمليات الإنتاجية، والأهم من ذلك قابلية تطبيقها ضمن الصناعة بشكل اقتصادي. وهنا بدأت تتبلور في الأوساط الصناعية والبحثية تقنية جديدة تحل فيها مشكلة الأمثلية بشكل ديناميكي في كل لحظة من الفضاء الزمني المتقطع، وتحسب مداخل العملية الإنتاجية (التي هي قوانين التحكم الصادرة عن المتحكم) بحيث توصل الجملة إلى أداء أمثلي على مجال زمني يضم عدة لحظات زمنية في المستقبل يسمى **فضاء التنبؤ prediction horizon**. في هذه التقنية يتم توصيف الجملة المتحكم بها عن طريق نموذج رياضي داخل المتحكم، وفي الحالة العامة يمكن أن يأخذ هذا النموذج أي صيغة رياضية ممكنة.

ويستخدم تابع كلفة عام يمكن تعديله ليلائم الجملة المدروسة بشكل أفضل. أما قيود المداخل والمخارج فيتم أخذها بعين الاعتبار أثناء حل مشكلة الأمثلية (أي ضمن خوارزمية المتحكم الرياضية) مما يؤدي بشكل فاعل إلى السيطرة على حالات النظام ومنعها من تجاوز حدودها، وذلك نتيجة توقع التجاوزات التي يمكن أن تطرأ عليها مسبقاً. ثم يطبق العنصر الأول (**أمر التحكم الحالي**) من قانون التحكم (والذي يشمل بشكل طبيعي عدة أوامر تحكم لعدة لحظات مستقبلية) على الجملة الحقيقية، وتبدأ العملية من جديد في اللحظة الزمنية التالية. يبين الشكل (1-2) خطوات تنفيذ هذه التقنية بشكل مفصل.

وبالإضافة إلى مسار التطوير في خوارزمية التحكم نفسها فقد عمد الباحثون إلى تطوير آليات جديدة لتحسين عملية تخمين بارامترات النظام والوصول إلى نماذج رياضية أكثر دقة للنظم المتحكم بها عن طريق القياسات المتوفرة.

هذه العمليات جميعها إضافة إلى التقنية الأساسية الموصوفة أعلاه هي ما يشار إليه في أوساط التحكم الحديث باسم **التحكم التنبؤي المبني على النماذج الرياضية Model Predictive Control (MPC)** والذي سنشير إليه في هذا البحث باسم **التحكم التنبؤي**.



الشكل 1-2 خطوات تنفيذ الخوارزمية التنبؤية

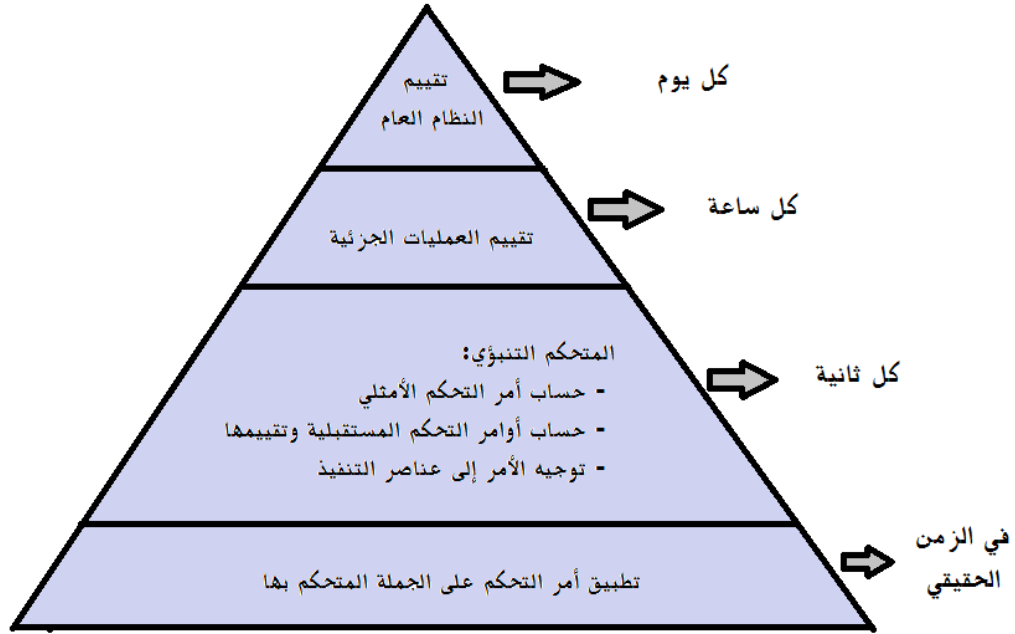
تستخدم تقنية التحكم التنبؤي كجزء من عملية تحكم متكاملة هرمية البنية [2]، هذه البنية تتميز عن البنية التحكمية التقليدية بمجال صلاحيات المتحكم وعلاقته مع باقي أجزاء نظام التحكم، وهي بنية لا بد من أخذها بعين الاعتبار عند تطبيق مبدأ الأمثلية في نظم الزمن الحقيقي [3]. الشكل (1-3) يبين هذه البنية الهرمية وأهم العمليات التي تجري خلالها. لقد تم اعتبار مبدأ الهرمية لأن العمليات التي يضطلع بتنفيذها كل جزء من أجزاء النظام تختلف عن بعضها بعامل الزمن، وهو ما يبيئه الشكل (1-4) الذي يعطي مثلاً عن درجة تكرار كل مهمة من مهام التحكم، وفيه نلاحظ أن عملية الأمثلة العامة للنظام ككل لا تحتاج إلى المراجعة إلا بين وقت وآخر، تأتي بعدها عمليات الأمثلة الخاصة بأجزاء محددة من

النظام وهي تقيّم خلال فترات زمنية أقل، أما المتحكم التنبؤي فيحتل المرتبة التالية ضمن الهرم حيث أنه ينفذ حساباته في كل لحظة من الفضاء الزمني المتقطع الذي يحدد المستخدم فواصله الزمنية، ثم نجد في أسفل الهرم التطبيق المباشر لأوامر المتحكم التنبؤي على الجملة المتحكم بها والذي يتم من خلال عناصر التنفيذ الإلكترونية وغيرها [2].

إن أهم خوارزميات التحكم التنبؤي التي تم العمل بها منذ نشأة هذه الفكرة كانت تسعى بمجملها إلى توظيف النموذج الرياضي داخل المتحكم لاكتشاف الخطأ الممكن حدوثه كنتيجة لأمر التحكم، وبالتالي تلافي هذا الخطأ قبل أن يحدث فعلياً في الجملة الحقيقية المتحكم بها، إضافة إلى التغلب على لاختطية النظام وتغير البارامترات مع الزمن، وتتوعد الأفكار المطروحة في هذا السياق. فيما يلي نورد عرضاً لأهم هذه المحاولات والتطبيقات التي عمل عليها المطورون كاستجابة لمتطلبات العمليات الإنتاجية المتسارعة.



الشكل 1-3 الإجراءات داخل البنية الهرمية لنظام التحكم



الشكل 1-4 المستويات التكرارية للعمليات

### 3-1 خوارزمية IDCOM:

كانت من أوائل خوارزميات التحكم التنبؤي، عمل على تطويرها العالم Richalet في أواخر السبعينيات، وقد سميت بتقنية التحكم التنبؤي المساعد على الكشف Model Predictive Heuristic Control (MPHC)<sup>1</sup>، وقد استخدمت مجموعة من الخطوات في حل معادلاتها تم تسميتها IDCOM والتي هي اختصار Identification and Command. تتميز هذه الخوارزمية باعتمادها على:

- نموذج الاستجابة النبضية كممثل للجملة المتحكم بها، وبحيث يكون خطي المداخل والمتغيرات الداخلية.
- تابع تربيعي مطبق على فضاء تنبؤي منته.
- استجابة مستقبلية للجملة تابعة لمسار مرجعي.
- صيغة حسابية تدخل ضمنها قيود الدخل والخرج.

<sup>1</sup> في بعض المراجع سميت هذه التقنية Model Algorithmic Control. كما في [4].



- أوامر تحكم أمثلة تحسب بخوارزميات تكرارية.

اختر Richalet تمثيلاً للدخل والخرج يكون فيه التأثير مباشراً للأول على الثاني، وقسم المداخل إلى صنفين، الأول يمكن التأثير عليه ويسمى Manipulated Variables (MVs)، والثاني يمثل ضجيجاً غير متحكم به يسمى Disturbance Variables (DVs). أما المخارج فأطلق عليها اسم المتحولات المتحكم بها Controlled Variables (CVs). وكان نموذج الاستجابة النبضية المنتهية (FIR) هو المعتمد في وصف علاقة الدخل بالخرج، وهو يعطى في نظام وحيد الدخل وحيد الخرج بالشكل:

$$y_{k+j} = \sum_{i=1}^N h_i u_{k+i-j} \quad [1-7]$$

هذا النموذج يفترض أن الخرج الحالي يتأثر بعدد محدد من المداخل السابقة، وتمثل قيم  $h_i$  أوزان المجموع، وهي في الأصل أمثال معادلة الاستجابة النبضية. نهاية عملية الجمع تتحدد بعدد المداخل التي تؤثر فعلياً على الخرج (القيمة  $N$ )، ولهذا السبب فإن هذا التمثيل فعال فقط مع الجمل المستقرة.

يجدر بالذكر أن هذه التقنية هي ما يشار إليه في مراجع التحكم الحديثة باسم التحكم التنبؤي الخطي.

تم في هذه التقنية استخدام طرق رياضية لتقريب النموذج الناتج عن الاستجابة النبضية من الجملة الحقيقية ما أمكن، و قد استخدمت طرق شبيهة لإيجاد قانون التحكم. وأما الطبيعة التكرارية لحساب أمر التحكم فقد مكنت من التعامل مع قيود النظام ومراقبتها بين كل لحظتين زمنييتين يتم فيهما تنفيذ الخوارزمية.

المسار المرجعي الذي يستخدمه المتحكم لإيصال الخرج إلى القيمة المرجعية هو مسار خطي يحدد ميله بعامل زمني  $0 \leq \alpha \leq 1$ ، يسمح هذه العامل بتحديد سرعة الوصول إلى القيمة المرجعية، وهو أمر مهم عملياً لأنه يعطي إمكانية التحكم باستقرارية المتحكم، إذ كلما ازداد الزمن ازدادت الاستقرارية وأصبحت الاستجابة أبطأ، وكلما نقص الزمن نقصت الاستقرارية و صارت الاستجابة أسرع. يظهر أثر العامل  $\alpha$  ضمن معادلة تخمين الضجيج التالية [4]:

$$\hat{n}_{t+k|k} = \alpha \hat{n}_{t+k-1|t} + (1 - \alpha)(y_t - \hat{y}_{t|t}) \quad [1-4]$$

لقد وضع Richalet أن فاعلية هذا المتحكم تعتمد على وجوده ضمن بنية هرمية مثل البنية المذكورة سابقاً، وحدد أربع مستويات لهذه البنية على الشكل التالي:

1. المستوى الأول: جدولة الإنتاج زمنياً ومكانياً بشكل أمثلي.
  2. المستوى الثاني: التحديد الأمثل لتابع الكلفة والقيم المرجعية للنظام.
  3. المستوى الثالث: التحكم الديناميكي بمتحولات الجملة المتحكم بها.
  4. المستوى الرابع: التحكم في الأنظمة الملحقة، والذي قد يتم بمتحكمات تناسبية تكاملية تفاضلية PID.
- إن الاستفادة المثلى من المتحكم التنبؤي لا تأتي ضمن المستوى الثالث كما يبدو لأول وهلة، وإنما يكمن حقيقةً في المستوى الثاني الذي من خلاله يمكن التحكم بالقيم المرجعية المطلوبة من النظام بحيث تؤمن ملاحقة الخرج المطلوب بأقل كلفة ممكنة وبأقرب قيمة لقيود العملية الإنتاجية دون تجاوزها. وهذا الأمر هو الدافع الرئيسي لاستخدام التحكم التنبؤي في المقام الأول.

ولعل من التطبيقات التي أظهرت قوة هذا المتحكم نظام توليد كهربائي تقوده عنفة بخارية، حيث يتم التحكم بدرجة الحرارة وكمية البخار المطلوبة. وبما أن الحمل على المولد متغير باستمرار فقد كان اختبار المتحكم التنبؤي تحدياً سببه عدم الخطية ضمن النظام. وقد تم التغلب على هذه المشكلة باستخدام فضاء زمني منقطع ذي فواصل زمنية متغيرة ديناميكياً. وبلغ مقدار التوفير في كلفة تشغيل العنفة ضمن هذه الشروط حوالي 150000 دولار سنوياً [2].

## 4-1 خوارزمية (DMC) Dynamic Matrix Control:

تم تطوير هذه الخوارزمية في مختبرات شركة Shell للنفط، وبدأت مخصصة للأنظمة متعددة المداخل والمخارج دون التعامل مع القيود، ثم تم تعديلها لتأخذ قيود النظام كعوامل ضمن معادلاتها. إن أهم ما تتميز به هذه التقنية هو [2]:

- اعتمادها على نموذج مبني على استجابة القفزة الواحدية للنظام.
- اعتماد حل تربيعي لمشكلة الأمثلية على مجال محدود لفضاء التنبؤ.

- قانون التحكم فيها يحسب بطريقة المربعات الأصغرية.

إن الاستجابة للقفزة الواحدة تربط التغيرات في خرج النظام بتغيرات الدخل وقيم الدخل السابقة، على الشكل:

$$y_{k+j} = \sum_{i=1}^{N-1} s_i \Delta u_{k+i-j} + s_N \Delta u_{k+i-N} \quad [1-8]$$

حيث العوامل  $s_i$  هي أمثال تابع استجابة القفزة الواحدة.

بمعرفة الاستجابة للقفزة نستطيع التنبؤ بتغيرات الخرج المستقبلية كتابع لتغيرات الدخل المستقبلية، والمصفوفة التي تربط بين الدخل والخرج هي المسماة بالمصفوفة الديناميكية Dynamic Matrix. ومن الميزات التي تقدمها هذه المصفوفة إمكانية حسابها مسبقاً (offline) لتقليل زمن تنفيذ الخوارزمية ضمن المتحكم. ومن ناحية الضجيج فقد تم اعتباره ثابتاً على المجال الزمني.

لقد تم تطبيق هذه التقنية على الأفران الحرارية [2]، وأظهرت نتائج جيدة، إلا أن أوامر التحكم في مرحلة معينة اقتربت كثيراً من قيم قيودها، الأمر الذي دعا المصممين إلى إضافة معادلة جديدة إلى نموذج الجملة تتضمن القيود المتغيرة مع الزمن وتأخذ الشكل التالي [4]:

$$\sum_{i=1}^N C_{yi}^j \hat{y}_{t+k|t} + C_{ui}^j \hat{u}_{t+k|t} + c^j \leq 0 \quad [1-9]$$

لكن هذا أدى لوجود مصفوفات ضخمة تنتج أثناء تنفيذ الخوارزمية وهي تحتاج إلى إيجاد مقلوب لها، الأمر الذي جاء على حساب زمن تنفيذ الخوارزمية. يضاف إلى ذلك من سلبيات هذه التقنية أنها أظهرت بعض المشكلات أثناء العمل مع الجمل غير المستقرة.

## 5-1 خوارزمية Quadratic Dynamic Matrix Control (QDMC):

تتشابه هذه التقنية إلى حد بعيد مع الخوارزمية السابقة، لكنها تعتمد بدلاً من طريقة المربعات الصغرى في الأمثلة طريقة الحل التربيعي، كما أنها تضمن للمتحكم أثناء ملاحقته للمسار المرجعي أن لا يزداد الفرق بين قيمة أمر تحكم والأمر الذي يليه عن الحد الذي لا يتمكن النظام معه من إعطاء الأمر المطلوب، ولعل هذا

يشبه مفهوم قيود النظام، إلا أنه لا يشمل المداخل والمخارج ومتحولات الحالة فقط وإنما يهتم بتغيرات مقادير قانون التحكم بين لحظة وأخرى.

تعد طريقة الحل التريبيعي المستخدمة في هذه الخوارزمية من أبسط الحلول المتبعة للحصول على تابع كلفة أصغري، وهي نقطة في صالح هذه التقنية.

لقد تم عملياً تطبيق خوارزمية QDMC للتحكم بفرن حراري يطلب فيه تنظيم درجة حرارة البخار في ثلاثة مواضع من الفرن باستخدام ثلاث صمامات غاز ضمن غرف الاحتراق [2]، وقد أظهر التطبيق تفوق الخوارزمية في العمل ضمن الزمن الحقيقي. والأجدر بالذكر أنّ الباحثين قدموا نتائج إيجابية لتطبيق هذه التقنية على أنظمة يصل عدد مداخلها ومخارجها إلى 12 مدخل ومخرج.

## 6-1 خوارزمية Predictive Functional Control:

طورها العالم Richalet للتعامل مع الأنظمة السريعة. وهي تستخدم معادلات الحالة التي يمكن أن تعبر عن الأنظمة اللاخطية، وهي بذلك تستخدم مع العمليات اللاخطية والخطية غير المستقرة.

إن من أهم ميزات هذه التقنية أنها تقوم بحساب أوامر التحكم ضمن لحظات معينة من فضاء التنبؤ، وليس على كامل الفضاء، وهو الأمر الذي يختصر العمليات الحسابية والزمن. كما أن بإمكانها التعامل مع تزايدات كبيرة في قيم قانون التحكم بين لحظة وأخرى، وهو أمر مهم في أنظمة الملاحقة وتنظيم الموضع.

يعطى تابع الكلفة بالعلاقة التالية [4]:

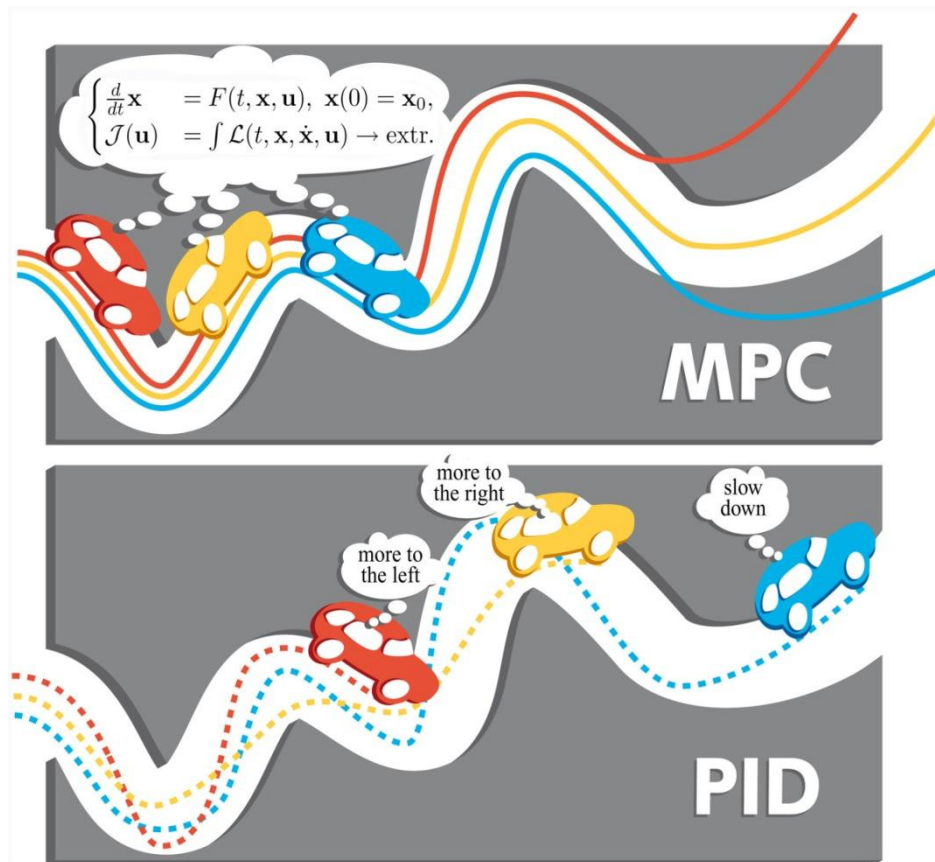
$$J = \sum_{j=1}^{nH} (\hat{y}_{t+j} \omega_{t+j})^2 \quad [1-10]$$

حيث  $\omega_{t+j}$  يمثل مساراً خطياً باتجاه القيمة المرجعية.

## الفصل الثاني

### بناء المتحكم التنبؤي – الخوارزمية العامة

#### MODEL PREDICTIVE CONTROLLERS–GENERALIZED PREDICTIVE CONTROL (GPC)



## بناء المتحكم التنبؤي – الخوارزمية العامة

### MODEL PREDICTIVE CONTROLLERS

### GENERALIZED PREDICTIVE CONTROL (GPC)

#### 1-2 مقدمة:

في هذا الفصل سنشرح بالتفصيل تقنية التحكم التنبؤي المبني على النماذج الرياضية MPC، حيث سيتم التعرف على مفاهيم هذه التقنية وأسسها النظرية، وكيفية الاستفادة من النماذج الرياضية المختلفة للحصول على قانون التحكم المطلوب للجملة. كما سيتم عرض أهم الطرق المستخدمة لإعطاء المتحكم التنبؤي قوة في الأداء وحصانة ضد تغيرات بارامترات النظام، أو ظروف عمل المتحكم والجملة المتحكم بها بشكل عام.

والغاية في نهاية هذا الفصل أن يكون القارئ قادراً على صياغة عناصر قانون التحكم المختلفة، والوصول منها إلى صياغة مثلى لقانون التحكم المناسب للجملة المراد التحكم بها، وفي النهاية الاستفادة من تقنيات التحكم الإضافية لزيادة قوة المتحكم وتحسين أدائه.

سيتم التركيز على الطريقة العامة لبناء المتحكمات التنبؤية (GPC) Generalized Prediction Control وعرض التفاصيل السابقة من خلالها.

#### 2-2 مفاهيم أساسية:

إن من المقاربات المفيدة التي تساعد على فهم آلية عمل المتحكم التنبؤي هي مشابقتها لعملية قيادة السيارة، ونقاط التقاطع بين الأمرين يبينها المثال الآتي:

لنفرض أن سائقاً يقود سيارته على طريق مستقيمة تظهر فيها بعد عدة عشرات من الأمتار إشارة ضوئية، ويأتي من بعدها بقليل منعطف. إن ما يدور في ذهن السائق هو أقرب ما يكون لخوارزمية التحكم التنبؤي

(والتي هي في الأصل مستلهمة من التفكير الإنساني)، ذلك أن السائق يحلل في كل لحظة الطريق الذي أمامه، ويتخذ قراراً مناسباً بزيادة سرعة السيارة أو المحافظة عليها ثابتة أو الضغط على المكابح، هذا القرار يتم اتخاذه بناءً على عدة أمور هي:

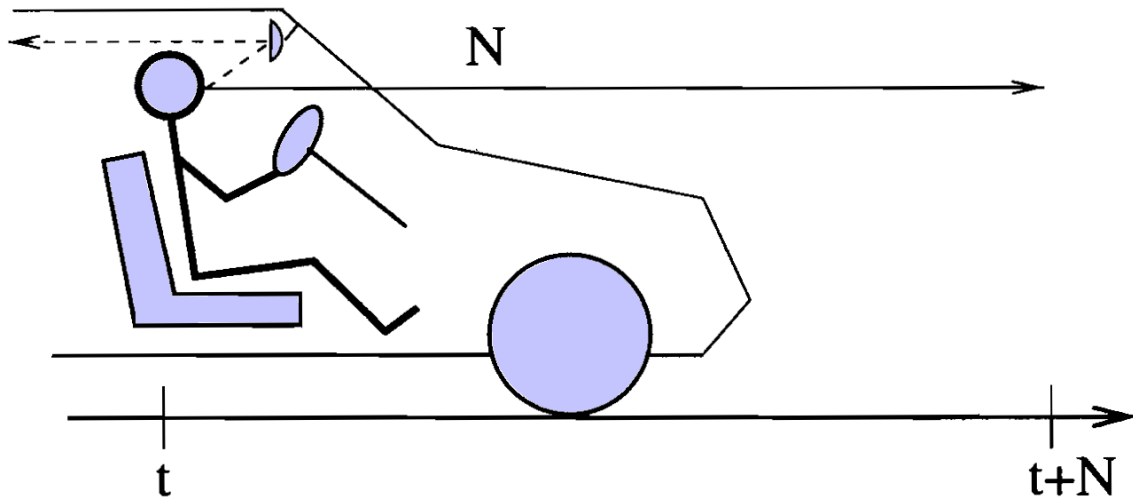
- معرفته بسيارته واستجابتها لطريقة قيادته.
- معرفته للأوامر السابقة التي أعطاهها للسيارة وأثرها على سرعة هذه السيارة.
- معرفته لتغيرات وضع السيارة نفسها (كارتفاع درجة حرارتها، نقصان الوقود، قوة المكابح...).
- معرفته الهدف الذي يقصد في النهاية الوصول إليه.
- مراعاته لإمكانيات السيارة التي لا يمكنه تجاوزها (فهو مثلاً لا يستطيع زيادة السرعة من الصفر إلى السرعة العظمى خلال ثانية واحدة).
- أخذه بعين الاعتبار أن الأمر الذي سيتخذه يجب أن يحافظ على استقرار السيارة على الطريق وعدم انحرافها.

إن القرار الذي يتخذه السائق هو عبارة عن مجموعة من الخطوات التي يحددها لطريقة قيادته على طول الطريق الذي يراه. يطبق السائق القرار الأول الذي يستجيب لمكان وجود السائق في هذه اللحظة، وبعد أن اتخذ السائق قراره مثلاً بزيادة السرعة، فإن عليه في اللحظة التالية أن يعيد العملية من البداية لتحديد قراره الجديد، معتمداً على المعلومات الضرورية المذكورة سابقاً. ويجدر بالذكر أن السائق أثناء القيادة ينظر إلى مسافة معينة من الطريق يحلل خلالها المسار الذي يجب عليه اتخاذه ليصل بأمان إلى نهاية الطريق، وكلما تقدم في سيره تظهر له أجزاء جديدة من الطريق يأخذها في الحسبان أثناء اتخاذه لقراره، فهو بذلك يضع في مرمى نظره مسافة معينة ظاهرة له من الطريق، ومع تقدمه تتقدم هذه المسافة لتحافظ على مجال رؤية واحد على طول المسار الذي يتبعه.

كل هذه الأمور يأخذها المتحكم التنبؤي بجديّة ضمن خوارزميته التي تمت برمجته عليها. فهو يحدد مسافة رؤية ينظر من خلالها إلى ما يمكن أن يتخذه من قرارات مستقبلية، ويرسم لنفسه مساراً أمثلماً يوصله إلى الهدف المطلوب منه، ويأخذ بعين الاعتبار قيود النظام وتغيرات بارامترات، ثم يتخذ في كل لحظة مجموعة من القرارات التي تحدد طريقة عمل الجملة ضمن عدة خطوات قادمة، ويطبق القرار الأول (الأمر الأول)

المعني مباشرة باللحظة التي يوجد فيها، وفي اللحظة التالية يعيد حساباته لعدة خطوات مستقبلية بحيث يحافظ دائماً على استقرار الجملة المتحكم بها.

وضمن هذا السياق يمكننا أن نجري مقارنة بين المتحكم التنبؤي ومتحكم مثل المتحكم التناسبي التكاملي، والذي يأخذ بعين الاعتبار أثناء اتخاذ القرار الأخطاء الماضية الناتجة عن تطبيق الأوامر السابقة فقط ولا ينظر إلى الخطوات المستقبلية (أي ليس من وجود لمفهوم التنبؤ)، وهو بذلك أشبه ما يكون بالسائق الذي يعتمد في قيادته على النظر إلى مرآيا سيارته فقط [4]، كما يبين الشكل (1-2)، على عكس المتحكم التنبؤي الذي يتخذ القرار بناءً على مجال رؤية مستقبلي وما أعطاه من أوامر سابقة.



الشكل 1-2 مفهوم التنبؤ في قيادة السيارة

### 1-2-2 الاعتماد على عملية التنبؤ:

كما ذكرنا فإن معظم تقنيات التحكم لا تأخذ بعين الاعتبار الحوادث المستقبلية التي يمكن أن تتعرض لها الجملة، على عكس المتحكمات التنبؤية التي تعتبر صراحة أن محاولة التنبؤ باستجابة النظام لأوامر المتحكم لعدة خطوات مستقبلية، تمكّن المتحكم من الاختيار الأمثل للمسارات المرجعية التي سيستخدمها لإيصال



الجملة إلى القيمة المرجعية المطلوبة، كما هو حال السائق الذي يتنبأ بأن الإشارة الضوئية أمامه قد تتغير إلى اللون الأحمر، ويضع لنفسه مساراً بديلاً عن المسار الذي كان قد اعتمده قبل رؤيته لإشارة المرور.

## 2-2-2 عملية التنبؤ مبنية على نموذج للجملة:

لكي نتكمن من التنبؤ بسلوك جملة ما في لحظة مستقبلية، يجب أن نمتلك نموذجاً رياضياً يصف عمل هذه الجملة. هذا النموذج يعطي الخرج المستقبلي كتابع للدخل الحالي أو المداخل المستقبلية. وبشكل نظري يمكن أن يأخذ هذا النموذج أي صيغة ممكنة (خطية أو غير خطية)، إلا أنه من الجدير بالذكر أن دقة النموذج الرياضي وبالتالي درجة تعقيده، يجب أن تتحدد بالغاية من هذا النموذج، إذ لا داعي لنماذج معقدة حين تؤدي النماذج البسيطة الهدف المرجو منها. وسبب ذلك أن عملية تكرار الحسابات في كل لحظة من الفضاء الزمني المتقطع، يمكنها أن تتغلب إلى حد ما على أخطاء نموذج الجملة، لأن المتحكم يجري عملية مقارنة دائمة بين الخرج الحقيقي للجملة والخرج المتوقع الناتج عن النموذج الرياضي، وأي اختلاف بين القيمتين يتم أخذه بعين الاعتبار عند حساب قيمة قانون التحكم.

في التطبيقات العملية يتم غالباً اعتماد النماذج الخطية [7]، وذلك لأن هذه النماذج تسهل حل مشكلة الأمثلية، كما أنها تمكن من إجراء قسم من حسابات المتحكم بشكل مسبق (Offline)، لكن العمليات التي لا تعطي فيها النماذج الخطية صورة واضحة عن سلوك الجملة المتحكم بها، تتطلب نماذج لاخطية تكون قادرة على التنبؤ بمخارج النظام المستقبلية بشكل جيد وضمن مجال خطأ مقبول مقارنة مع القيمة الحقيقية للخرج.

## 2-2-3 اختيار أمر التحكم الأمثل:

إن عملية اختيار قيمة معينة لقانون التحكم ترسل إلى الجملة الحقيقية لتطبيقها، عملية أساسية في التحكم التنبؤي، إذ أن التنبؤ بسلوك الجملة المستقبلي لا يكتسب معناه إلا عند الاستفادة منه في إيجاد أمر التحكم الأمثل الواجب تطبيقه على هذه الجملة. وكما سبق ذكره فإن الأمثلية في قانون التحكم تعني أن المتحكم قادر على دفع الجملة لأفضل استجابة ممكنة بأقل استهلاك لموارد نظام التحكم. هذا الأمر يعبر عنه في أوساط التحكم بما يسمى **الكلفة**، فللحصول على أمر تحكم أمثل علينا أن **نقلل كلفة** تنفيذ هذا الأمر، دون التنازل عن الأداء الممتاز الناتج عن تطبيقه.

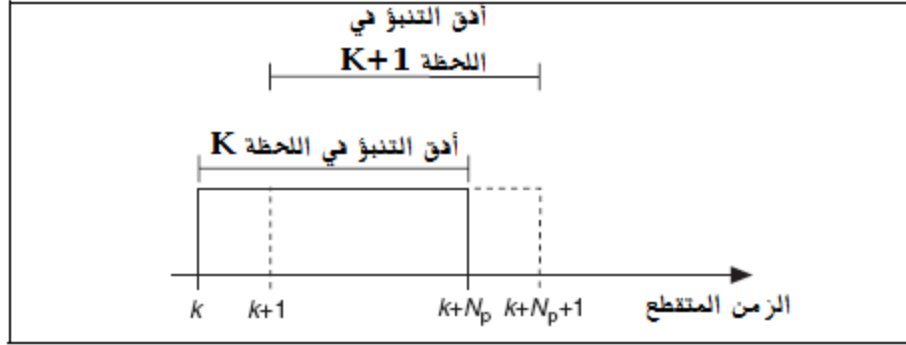
وبما أن بناء المتحكمات التنبؤية يعتمد على شرائح معالجة رقمية، فإنه من الضروري أن يتوافر لدينا تعريف عددي لحسابات قانون التحكم الأمثل. وهذا ما تمت صياغته رياضياً من خلال عدة أشكال لتتابع رياضية تسمى **تتابع الكلفة**، اعتمدت صياغتها على محاكمات رياضية ومنطقية دقيقة ومعقدة [7]، واتخذت أشكالها المتباينة حسب طبيعة نظام التحكم ومتطلباته، بحيث تؤدي في النهاية غايتها في الحصول على أمر تحكم يضمن للجملّة استجابة مثلى في نظام الحلقة المغلقة.

ولا بد من الانتباه إلى أن تابع الكلفة من أهم العناصر التي تؤثر على تعقيد نظام التحكم وحساباته، ولذا فإن اختيارها بشكل مناسب يعد أمراً ضرورياً للحصول على متحكم ذي أداء قوي.

## 2-2-4 الأفق المتحرك:

لو عدنا إلى مثال قيادة السيارة لوجدنا أن مفهوم الأفق المتحرك (أو المنسحب) يتمثل في مجال الرؤية الذي يضعه السائق نصب عينيه (وليكن مئة متر مثلاً). ضمن هذا المجال المحدد يراقب قائد السيارة كل الحوادث التي تحصل على الطريق أمامه، ويبني عليها قراراته في السرعة المناسبة والمسار الأفضل الواجب عليه اتباعه. ومع تقدم السيارة على مسارها يتقدم مجال الرؤية بشكل مماثل، أي أن مجال رؤية السائق لا يتغير طوله مع تقدمه، فهو لا يزال يرى لمسافة مئة متر، لكن هذه المسافة تتحرك إلى الأمام معطية المجال للسائق لرؤية أجزاء جديدة من الطريق تدخل بدورها في عملية اتخاذه لقرار القيادة المناسب حسب المعطيات الجديدة.

والمتحكمات التنبؤية تتصرف بنفس الطريقة تماماً، فمع كل لحظة زمنية ينسحب (أو يتقدم) الأفق الذي يقوم ضمنه المتحكم بحساباته للتنبؤ بالسلوك المستقبلي للنظام، أي أنه كلما انقضت لحظة حالية أضاف المتحكم إلى قاعدة بياناته معلومات جديدة يستقيها من لحظة أكثر تقدماً من المستقبل المنظور بالنسبة له. هذه الفكرة يوضحها الشكل (2-2).



الشكل 2-2 تقدم أفق التنبؤ مع الزمن

إلا أن السؤال الذي يطرح نفسه ضمن هذا السياق هو: كم يجب أن يكون طول الأفق المستقبلي الذي يراه المتحكم؟ وتأتي الإجابة على هذا السؤال من حقيقة أن أي عملية تنبؤ يجب أن تضمن استقرار النظام في نهاية المطاف، وبالتالي فإن المجال الذي يتم التنبؤ ضمنه يجب أن لا يقل عن الزمن اللازم لنظام التحكم كي يستقر. فإن لم يتحقق هذا الشرط كانت المعلومات التي يستمدتها المتحكم من سلوك النظام المستقبلي غير كافية لصياغة أمر التحكم المناسب. وهو أشبه ما يكون بالسائق الذي يسير بسرعة مئة وعشرين كيلومتراً في الساعة في حين أنه لا ينظر إلا إلى مسافة مترين مثلاً أمام سيارته (أي أقل بكثير من المسافة التي يستطيع ضمنها على الأقل أن يكبح مركبته)، والنتيجة بشكل مؤكد انحراف السيارة عن مسارها وحدث ما لا تُحمد عقباه.

## 2-2-5 الأداء الآمن:

إن فكرة الأداء الآمن للمتحكم تتضمن عملية الموازنة بين الاختيار الجيد لفضاء التنبؤ (أفق التنبؤ) وقوة النموذج الرياضي الذي تم اعتماده في خوارزمية التحكم. فكلما كان النموذج الرياضي للجملة أكثر دقة أمكننا اختيار أفق تنبؤ أكبر، ولن يكون منطقياً أن نختار أفق تنبؤ كبيراً إن كان النموذج لا يقدم معلومات كافية عن أداء الجملة المستقبلي. كما هو حال السائق في بداية تمرنه على القيادة، فهو يبدأ تمرينه بالقيادة بسرعة منخفضة، والتركيز على الأمتار القليلة أمامه، وكلما ازدادت ممارسته ازدادت قوة النموذج الذي يرسمه في ذهنه لسيارته التي يقودها، وأصبح أكثر قدرة على النظر إلى مسافة أبعد والتفكير في مسارات وقرارات أكثر تقدماً تتيح له السير بمركبته بسرعة أكبر لأنه يعلم مقدماً ما نوع القرارات التي سيتخذها على بعد أمتار عديدة من السيارة.

## 2-2-6 المعايير:

تعد المعايير للمتحكمات بشكل عام من الإشكاليات التي عمل الباحثون في ميدان التحكم على حلها بالتوازي مع ظهور تقنيات التحكم الحديثة. وسبب ذلك أن لكل متحكم زاوية ينظر له من خلالها في هذا المجال، ففي حين أن متحكمات مثل المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية PID تعتمد بشكل أساسي على معايير أوزانها، فإن بعض الباحثين [7] يرى أن مداخل المتحكم التنبؤي لا يجب أن تعاير أصلاً، لأن الغاية برأيهم أنه في النهاية يجب على خرج الجملة أن يلاحق القيم المرجعية مهما كانت المداخل المطبقة، أي أننا لسنا بحاجة لإعطاء أهمية لمدخل ما دون الآخر.

ولكن بشكل عام فإن معايير المتحكم التنبؤي واردة في بعض الأحيان، وهي تتم عن طريق مجموعة مصفوفات أوزان تعطي المتحكم فكرة عن أهمية كل متحول حالة وكل خرج بالنسبة لعملية التنظيم، ليأخذ في حسابه أن إيصال هذا الخرج إلى قيمته المرجعية يعد أولوية لنظام التحكم. وفي المتحكمات التنبؤية خصوصاً نلاحظ أن عملية تصغير تابع الكلفة تؤدي بحد ذاتها إلى دفع المتحكم إلى درجة كافية من الاستقرار وجودة الأداء، ذلك أن القيمة الأمثل لتابع الكلفة هي دائماً القيمة الأصغر، وهذا لا يتغير بالنسبة لجميع المخارج على حد سواء، ويبقى أن يعطي المصمم المتحكم قدرة على الموازنة بين ملاحقة كل خرج وكل متحول حالة للقيم المرجعية المحددة له، بحيث لا يستقر أحدها على حساب استقرار غيره، ولعل هذا ما دعا الباحثين إلى اعتماد الأنظمة الواحدة للوصول إلى هذه الغاية، فهم بتمثيلهم جميع المخارج ومتحولات الحالة بشكل واحد، يجرون ضمناً عملية مجانسة بينها، مما يقود في حال إعطاء قيم للأوزان تتراوح بين الصفر والواحد إلى الحصول على توزيع عادل لأهمية كل من هذه المتغيرات.

ويبقى أن نذكر أنه لا بد لكل حالة من تفاصيل خاصة بها قد تختلف قليلاً عن الحالة العامة التي تمت مناقشتها فيما سبق من هذه الفقرة.

## 2-2-7 مراعاة قيود (محددات) النظام:

لعل هذه الميزة من أهم ميزات التحكم التنبؤي والتي قل أن تتوفر لغيره من خوارزميات التحكم. وتتبع أهمية هذه الميزة من حقيقة أنه لا يوجد أي عملية صناعية أو إنتاجية تخلو من قيود على مراحلها المختلفة، وهي

قيود عديدة تتراوح بين الفيزيائية الناتجة عن إمكانيات تجهيزات النظام، وحتى تصل إلى القيود الاقتصادية التي يضعها كثير من الصناعيين في المقام الأول في عملية الإنتاج. وقدرة التحكم التنبؤي على احتواء هذه القيود ضمن معادلات خوارزميته تمكن المتحكم التنبؤي من الوصول إلى أفضل أداء دون تجاوز أي حد خطر قد يضر بالمنتج أو عملية إنتاجه.

إن المتحكم التنبؤي يفكر بقيود النظام كما يفكر سائق سيارة السباق في بقاء مركبته ضمن المسار المحدد لها، فهو يحرص دائماً على القيادة بأكبر سرعة ممكنة لكن مع عدم جنوح سيارته، وسبب ذلك أن إعادة السيارة إلى مسارها سيكلفه من الوقت أكثر بكثير من الوقت الذي سيصرفه لو قلل من سرعته في أماكن معينة ولفترات محددة بحيث يحافظ على مساره دون أي تجاوز. وهذا حال المتحكمات التي لا تتعامل مع قيود النظام ضمن خوارزمياتها، فهي وإن أضيفت لها بعض المحددات التي تمنع النظام من تجاوز قيم معينة، إلا أن البطء الناتج في الاستجابة النهائية يقلل من كفاءة المتحكم ونظام التحكم ككل<sup>1</sup>.

يجدر بالذكر أن قيود الأنظمة تقسم بشكل عام إلى قسمين: قيود قاسية Hard Constraints، وقيود غير قاسية Soft Constraints. فالقيود القاسية هي القيود التي لا يمكن للنظام بأي حال أن يتجاوزها، كالحد الأكبر لفتحة صمام مثلاً، أما القيود اللينة فهي أقل إلزاماً من سابقتها، مثل مقدار الجودة لمنتج معين، وهذا النوع يمكن التساهل في مراعاته في الحالات التي يصعب معها الالتزام بجميع القيود المفروضة على النظام. لكن هذا التساهل يجب أن يكون محدوداً ولفترات زمنية قليلة تكفي المتحكم لإيجاد حلول رياضية لمعادلاته تكفل مراعاة قيود النظام جميعها.

## 3-2 النماذج الرياضية المستخدمة في المتحكمات التنبؤية:

تعد عملية النمذجة للجمل المراد التحكم بها عن طريق الخوارزميات التنبؤية من أهم العمليات التي تصادف المصمم عند بناء المتحكم التنبؤي<sup>2</sup>، ذلك أن نموذج الجملة هو المرجع الوحيد للمتحكم للتنبؤ بسلوك الجملة المستقبلي، ومن هنا فإن قدرة خوارزمية التحكم على توقع الأخطاء وتفاديها متعلقة مباشرة بقوة النموذج

<sup>1</sup> عندما يعطي المتحكم قيمة جهد لمحرك مثلاً، فإنه يفترض أن النظام سيتصرف وفقاً لها، دون أن يعلم أن المحدد قد لا يعطي المحرك هذه القيمة لاعتبارات معينة، مما يؤدي إلى استجابة أبطأ في نهاية المطاف، لأن المحرك لا يحصل على الجهد الذي يفترض أن يزيد سرعة استجابته.  
<sup>2</sup> ذهب البعض إلى أنها أهم عملية على الإطلاق في تصميم المتحكم التنبؤي [7].

الرياضي المستخدم. وقد وجد أن ضعف أداء المتحكمات التنبؤية يعود في الغالب إلى ضعف في عمليات النمذجة والفرضيات المتعلقة بها [7].

لا يخفى أن معظم العمليات الصناعية تحمل صفة اللاخطية، وتختلف بدرجة لاخطيتها حسب عوامل متعددة (بدءاً من طبيعة العملية نفسها وانتهاءً بالظروف المحيطة مروراً بالمواد والعناصر التي تؤدي هذه العملية... إلخ)، ومشكلة اللاخطية تتجلى أثناء تصميم المتحكمات التنبؤية في التعقيد المضاف إلى الخوارزمية وظهور متطلبات جديدة على المتحكم الوفاء بها، مثل عملية المعايرة المستمرة في الزمن الحقيقي ومحاولة التغلب على أخطاء النموذج الرياضي في كل لحظة من الزمن المنقطع، ولهذا السبب يفضل الباحثون التعامل مع نماذج خطية للأنظمة المتحكم بها عند استخدام تقنيات التحكم التنبؤي، وأما من ناحية لاخطية النظام فتتم مناقشتها كما يلي [7]:

❖ بما أن النموذج المستخدم في المتحكم لا بد له من درجة معينة من الدقة ليست بالضرورة الدقة الكاملة مئة بالمئة، وبما أن اللاخطية في الأنظمة يمكن إهمال بعض عناصرها عملياً دون تأثير كبير على أداء المتحكم، فإنه من الممكن (والفضل أيضاً) أن نقوم باستخدام النماذج الخطية لتوصيف عمل الجمل المتحكم بها، ثم إضافة نماذج خطية أخرى تحاول توصيف العوامل التي تخرج بالنظام عن سلوكه الخطي. نماذج التأثير اللاخطي هذه تُفرض بدايةً بأبسط شكل ممكن (لتقليل التعقيد)، ويتم اختبار عملها، فإن أعطت النتائج المرجوة تم اعتمادها، وإلا تتم زيادة دقتها وتعقيدها حتى نصل في النهاية إلى نموذج خطي للجمله يصف أداءها بمساعدة توصيف مناسب للتأثيرات اللاخطية التي يتعرض لها نظام التحكم.

ويجدر بالذكر أن مشاكل النماذج الممثلة لأنظمة التحكم لا تقتصر على عدم الخطية، بل تظهر كعوامل مؤثرة فيها أيضاً الإشارات الضجيجية التي تتعرض لها الجمله، سواء على مستوى الضجيج المتعلق بإشارات التحكم نفسها، أو الضجيج الناتج عن القياسات (كقياسات متحولات الحالة الداخلة في التغذية العكسية للمتحكم). ولكل من هذه المؤثرات طرق خاصة للتعامل معه، فالتشويش الحاصل على قانون التحكم يمكن التغلب عليه (أو التخفيف منه) عن طريق إضافة بعض الحدود المعرفّة لهذا التشويش على نموذج الجمله المستخدم وعلى حسابات قانون التحكم على حد سواء، وبمعرفة هذا التشويش نتمكن من التعامل معه. وأما

ضجيج القياسات فتستخدم له عمليات ترشيح نسبية كمحاولة للتغلب عليه، لكن المرشحات نفسها تضيف بعض التأثيرات على النظام والتي قد لا تكون دائماً في صالح أداء المتحكم، ولذلك وحسب [7] فإن موضوع استخدام المرشحات في التحكم التنبؤي لا يزال قيد البحث والتطوير، إلا أن أشكالاً من مرشحات التمرير المنخفض LPF تستخدم عادة لمواجهة حساسية النظام للتشويش الحاصل في عمليات القياس التي يعتمد عليها.

من منطلق أهمية النماذج الرياضية في عملية التحكم التنبؤي سنعرض فيما يأتي وباختصار أهم النماذج الشائعة في تمثيل الجمل ضمن المتحكمات التنبؤية. وسيكون هذا العرض تمهيداً لاستخدام كل من هذه النماذج في عملية التنبؤ ومن ثم اشتقاق قانون التحكم التنبؤي الخاص بها.

لقد اعتاد الصناعيون على استخدام نماذج الاستجابة النبضية FIR لتمثيل الجمل التي تعترضهم، وذلك بسبب سهولة فهمها والتعامل معها، لكن رغم أن لهذه النماذج ميزة أساسية تتمثل بقلّة تأثيرها بالضجيج إلا أنها تتطلب من النظام مساحات ذاكرية أكبر لتخزين كل البيانات الواردة من عملية تقييم استجابة النظام<sup>1</sup>. ومع التقدم في عمليات النمذجة بدأت تظهر تقنيات جديدة بميزات متقدمة، وأصبح التوجه يميل أكثر فأكثر باتجاه استخدام توابع النقل ومعادلات الحالة لتمثيل الأنظمة المختلفة.

من أهم ميزات معادلات الحالة سهولة التعامل معها ضمن الأنظمة متعددة المداخل والمخارج، وقد دُعمت بأبحاث نظرية كثيرة جداً عن كيفية استخدامها في المتحكمات والمخمنات، وعن كيفية تحليل النماذج وقوانين التحكم المبنية عليها. أما توابع النقل ورغم أن تمثيل الأنظمة بمدخل ومخارج عديدة ضمنها أمر يحتاج بعض الجهد، إلا أن عدم حاجتها إلى عمليات تخمين لمتحولات الحالة يعد نقطة في صالحها<sup>2</sup>.

## 2-3-1 نماذج معادلات الحالة:

بالأخذ بعين الاعتبار أن الدليل  $k$  يمثل رقم العينة ضمن الفضاء الزمني المتقطع، فإن معادلات الحالة تعطى بالصيغة العامة على الشكل التالي:

<sup>1</sup> نظرياً نحتاج لتقييم استجابة النظام مرة واحدة لتابع مثل القفزة الواحدة مثلاً، لكن في التطبيق العملي لا بد من تقييم هذه التجربة عدة مرات للحصول على نتائج وسطية يمكن اعتمادها ضمن المتحكم بحيث نستطيع تحييد الأخطاء في عملية التقييم. هذا الأمر يضاعف من كمية البيانات عدة مرات.  
<sup>2</sup> يرى البعض [7] أن حاجة نماذج توابع النقل إلى مرشحات لتخفيض الضجيج قد يشكل على نحو ما استعاضة عن عمليات التخمين.

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix} \\ x_{k+1} & \quad A \quad x_k \quad B \quad u_k \\ \\ \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ \vdots \\ y_l(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{l1} & c_{l2} & \cdots & c_{ln} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{l1} & d_{l2} & \cdots & d_{lm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix} \\ y_k & \quad C \quad x_k \quad D \quad u_k \end{aligned} \right\} [2-1]$$

وبشكل مختصر نكتب:

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k \end{aligned} \right\} [2-2]$$

حيث:

- $x$  تمثل شعاع الحالة من الأبعاد  $(n * 1)$ .
- $y$  تمثل مخارج الجملة وهي من الأبعاد  $(l * 1)$ .
- $u$  هو شعاع مداخل الجملة (أي مخارج المتحكم) من الأبعاد  $(m * 1)$ .

والمصفوفات  $A, B, C, D$  هي المصفوفات التي تعرف النموذج، وعادة تكون  $D = 0$  في الجمل الحقيقية.

يجدر بالذكر أن عدد المداخل والمخارج ليس متساوياً في معظم التطبيقات  $l \neq m$ ، وضمن هذا المجال نميز حالتين:

- $l < m$ : وعندها فإن أكثر من دخل يمكن استخدامها للتحكم بخرج واحد، وهذا يعطي النظام حرية أكبر<sup>1</sup> ومجالاً لاختيار الدخل المناسب للتحكم بالخرج بشكل أمثل.
- $l > m$ : في هذه الحالة لاتتوافر للنظام درجة حرية كافية للتحكم بجميع المخارج بنفس المستوى، وتظهر بعض الانزياحات عن القيم المرجعية في بعض المخارج، ولا بد من معايير إضافية هنا لبناء خوارزمية التحكم.

<sup>1</sup> هذا مايسمى في التحكم بمفهوم درجات الحرية (d.o.f.).



**2-1-3-1 تضمين الاضطرابات في النموذج:**

يمكن لمعادلات الحالة أن تحتوي على حدود ممثلة للاضطرابات الحاصلة إما على الخرج أو على تحولات الحالة. لتمثيل هذه الاضطرابات في الحالتين نلاحظ ما يلي:

**• في حالة الاضطرابات الحاصلة على الخرج:**

تعطى بشكل عام بشكل ضجيج أبيض تكاملي، ويضاف إلى النموذج بصيغة حد  $d_k$  يعطى على الشكل:

$$d_{k+1} = d_k + v_k$$

حيث  $v_k$  مقدار التغير في الضجيج بين عينة وعينة وهو غير معروف، كما أن  $d_k$  نفسه يفترض مجهولاً، ولذلك يتم تخمينه ضمن الخوارزمية. وأما معادلة الخرج فتصبح على الشكل:

$$y_k = Cx_k + Du_k + d_k \quad [2-3]$$

بهذا يصبح لدينا حد ضجيجي غير معرف إضافة إلى شعاع متحولات حالة هي نفسها مجهولة عادة، لذا ويهدف استخدام مراقب يعطي تخميناً لقيم هذه المتغيرات نُضمّن الضجيج ضمن ديناميكية النظام نفسه، وتصبح معادلات الحالة عندها بالشكل:

$$\left. \begin{aligned} z_{k+1} &= \tilde{A}z_k + \tilde{B}u_k \\ y_k &= \tilde{C}x_k + Du_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad [2-4]$$

حيث:

$$z_{k+1} = \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ d_{k+1} \end{bmatrix} ; \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} ; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad \tilde{C} = [C \quad I]$$

**• في حالة الاضطرابات الحاصلة على متحولات الحالة:**

يعطى الضجيج  $d_k$  كما في الحالة السابقة، إلا أنه يضاف إلى معادلة متحولات الحالة على الشكل:

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Fd_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k \end{aligned} \right\} \quad [2-5]$$

ويتمثل بالإضافة مراقب نضمن الضجيج في ديناميكية النظام ليصبح النموذج بالشكل التالي:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{z}_{k+1} &= \tilde{A}\mathbf{z}_k + \tilde{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \tilde{C}\mathbf{x}_k + D\mathbf{u}_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad [2-6]$$

وهو مشابه ظاهرياً للنموذج السابق إلا أن الاختلاف يكمن في صيغ مصفوفات الأمثال التي تعطى كما يلي:

$$\mathbf{z}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ d_{k+1} \end{bmatrix} ; \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & F \\ 0 & I \end{bmatrix} ; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad \tilde{C} = [C \quad 0]$$

### 2-3-2 نماذج توابع النقل:

من أكثر النماذج شيوعاً لتوابع النقل المستخدمة في التحكم التنبؤي النموذج المعروف باسم CARIMA<sup>1</sup>، وهو يتيح مجالاً واسعاً لنمذجة الحالات المختلفة لتوابع النقل عن طريق تغيير قيم بارامترات، ويعطى عادة لنظام وحيد الدخل والخرج بالشكل:

$$a(z)y_k = b(z)u_k + \frac{T(z)}{\Delta(z)}v_k \quad [2-7]$$

حيث:

- $z$  هو متحول الفضاء الزمني المنقطع.
- $v_k$  متحول بمتوسط صفري يمثل الضجيج والتشويش في القياسات على حد سواء.
- $\Delta(z)$  يعطى بالعلاقة:  $\Delta(z) = 1 - z^{-1}$ ، حيث  $z^{-1}$  هو التأخير بمقدار عينة واحدة.
- $T(z)$  تابع يستخدم في عملية التخلص من المركبات الضجيجية في الإشارة.

وعلى الرغم من وجود طرق لحساب أفضل قيمة لكل من الأشعة  $a(z)$  و  $b(z)$  و  $T(z)$ ، إلا أن للتابع  $T(z)$  تأثيراً على جودة الاستجابة ضمن الحلقة المغلقة، ولذا يعد في مجال التحكم التنبؤي من المتحولات التصميمية، ويعطى القيمة التي تضمن أفضل مستوى أداء حتى ولو لم تكن قيمته الأمثلية.

أن من الشائع أن تكتب توابع النقل بالصيغة المنشورة:

<sup>1</sup> هو اختصار Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average

$$y_{k+1} + a_2 y_k + \dots + a_n y_{k-n+1} = b_1 u_k + b_2 u_{k-1} + \dots + b_n u_{k-n+1} + d_{k+1} \quad [2-8]$$

باعتبار:

$$a(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$b(z) = b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}$$

$$d_k = \frac{T(z)}{\Delta(z)} v_k$$

### 2-3-2-1 تضمين الاضطرابات في النموذج:

كما سبق فإن الطريقة الأفضل للتخلص من الضجيج هي عن طريق احتوائه ضمن النموذج الرياضي للجملة، ولو أمعنا النظر في نموذج توابع النقل، وباختيار  $T(z) = 1$  نجد أن:

$$d_k = \frac{1}{\Delta(z)} v_k \quad \equiv \quad d_{k+1} = d_k + v_k$$

الأمر الذي يعني أن الحد  $\frac{T(z)}{\Delta(z)} v_k$  يمثل نموذجاً للضجيج مماثلاً للنموذج الذي وجدناه في نماذج معادلات الحالة. واختيار قيمة التابع  $T(z)$  هي التي تحدد نوع الضجيج الذي نتعامل معه، ففي حالة  $T(z) = 1$  اعتبرنا الضجيج ضجيجاً أبيض، وباختيار قيم  $T(z)$  مختلفة نعود إلى الحالات السابقة الموضحة في المعادلات [2-4] و [2-5].

### 2-3-2-2 إلغاء خطأ الحالة الساكنة:

إن الضجيج الممثل بالقيمة  $d_k$  لا يملك بالضرورة متوسطاً صفرياً، الأمر الذي قد يؤدي إلى ظهور أخطاء في الحالة الساكنة للنظام، وهو أمر يؤثر بشكل كبير في التحكم التنبؤي على صحة اشتقاق قانون التحكم الذي يفترض وجود معلومات دقيقة عن القيم التي يتم التنبؤ بها، ولذلك فإنه لا بد من محاولة إلغاء هذا الخطأ في النموذج المعتمد على توابع النقل. والطريقة التي يعتمد عليها العاملون في مجال التحكم التنبؤي تقوم على تحويل بسيط في شكل تابع النقل ليعطي الخرج بناءً على تزايدات قيم الدخل بدلاً من قيم الدخل المباشرة  $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ ، ويتم ذلك بضرب المعادلة [2-7] بالحد  $\Delta$  لنحصل على النموذج التالي:

$$[a(z)\Delta(z)]y_k = b(z)\Delta u_k + T(z)v_k \quad [2-9]$$

وفيه نجد أن  $v_k$  ذو متوسط صفري، وهو لا يؤثر على عملية التنبؤ لذلك نفرض قيمته في الحالة المستقرة صفرًا. بذلك نكون قد حصلنا على نموذج يلغي الخطأ الساكن ويسعى فيه الخرج إلى القيمة المرجعية عندما تسعى التغيرات في الدخل إلى الصفر، أي أن:

$$y = ref \quad \text{if} \quad \Delta u = 0 \quad ; \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \Delta u_k = 0$$

### 3-2-3-2 القواعد العامة لاختيار $T(z)$ بالنسبة للتحكم التنبؤي:

بما أن  $T(z)$  لا يؤثر فقط على حذف الضجيج وإنما على قوة أداء المتحكم، ونظراً لأن حساباته تصميمية وليست تحليلية جاهزة، فإن عدة خطوط عريضة تم وضعها لتعطي فكرة عامة عن القيم التي يأخذها هذا العنصر، أهم هذه القواعد هي:

1. اختيار قيمة  $T(z) = \hat{a}\hat{T}$  حيث  $\hat{a}$  تحتوي على الأقطاب المسيطرة للنظام، و  $\hat{T}$  تحتوي على أقطاب أخرى أقرب للواحد. من أجل أنظمة بمعدل أخذ عينات نموذجي تعتبر القيمة:

$$T(z) = [1 - 0.8z^{-1}]^n$$

قيمة ذات أداء جيد [7].

2. يتم تصميم  $1/T$  ليكون مرشح تمرير منخفض يحذف الترددات العالية دون التأثير على ترددات النظم نفسها.

3. لو أن قيمة  $T(z) = 1$  تعطي أداءً جيداً فلا داعي لتعقيد قيمة  $T(z)$  أكثر.
4. اختيار  $T(z) = a$  مكافئ لاستخدام نموذج الاستجابة النبضية FIR.
5. إن حساب قيمة تحليلية للتابع  $T(z)$  عملية معقدة بسبب عدم خطيتها.

### 3-3-2 نماذج الاستجابة النبضية FIR:

رغم أن الاهتمام يتحول عنها إلا أنها لعبت دوراً مهماً في المتحكمات التنبؤية الصناعية سابقاً، وهي تتضمن نوعين:

**2-3-3-1 الاستجابة لتابع النبضة Impulse response:**

تعطى فيها الاستجابة بشكل عام بدلالة المداخل والمخارج والضجيج على الشكل التالي:

$$y_k = G(z)u_k + d_k \quad [2-10]$$

حيث  $G(z)$  يعطى في الحالة المستقرة من خلال سلسلة تايلور على الشكل:

$$G(z) = \sum_{i=0}^{\infty} G_i z^{-i} \quad [2-11]$$

وكما في توابع النقل فإن لقيمة  $G_i$  طرقةً معيارية لحسابها.

إن من مساوئ هذه الطريقة إن الإشارات المطبقة على الجمل الصناعية ليست نبضية، لذلك فإن مفهوم الاستجابة لإشارة نبضة لا يعطي تقريباً واضحاً عما يحصل على أرض الواقع، كما أنها قد تحتاج عدداً كبيراً من الحدود لتعطي نموذجاً فعالاً. لكن يجب ألا نُغفل أن ميزة هذه الاستجابة تكمن في عدم حاجتها إلى تحديد مسبق لمرتبة النموذج، أو للتعريف بقيمة للزمن الميت.

**2-3-3-2 الاستجابة لتابع القفزة الواحدية Step response:**

وهي تشبه الطريقة السابقة من حيث أنها عبارة عن تقييم لاستجابة النظام لتابع دخل محدد، لكن التابع هنا أكثر واقعية وقرباً من الحياة العملية وهو تابع القفزة الواحدية، والذي يُعرّف كسلسلة على الشكل التالي:

$$H(z) = \sum_{i=0}^{\infty} H_i z^{-i} \quad [2-12]$$

حيث أن:

$$H(z) = \frac{T(z)}{\Delta(z)}$$

وتكون معادلة الخرج بدلالة الدخل والضجيج من الشكل:

$$y_k = H(z)\Delta u_k + d_k \quad [2-13]$$

وهنا تظهر أيضاً مشكلة الحاجة إلى عدد كبير من الحدود لتمثيل الاستجابة بشكل دقيق، لكن وفي الوقت نفسه نجد أيضاً أن لا حاجة لتحديد مرتبة النموذج أو لتعريف الزمن الميت.

## 2-4 إجراء عملية التنبؤ باستخدام النماذج المختلفة:

إن الركيزة الأساسية الثانية في عملية بناء متحكم تنبؤي بعد نمذجة الجملة المراد التحكم بها هي الاعتماد على هذا النموذج للتنبؤ بمخارج النظام المستقبلية انطلاقاً من الدخل الحالي والمداخل المستقبلية.

فيما يأتي سنبين طريقة الحصول على المخارج المستقبلية المُتنبأ بها اعتماداً على كل نموذج من النماذج التي سبقت الإشارة إليها، لنقود هذه الخطوة مباشرة إلى عملية صياغة أمر التحكم الذي سيطبق على الجملة الفعلية.

تجدر الإشارة إلى أن الرموز التي ستستخدم في المعادلات فيما يأتي مبينة ضمن دليل الرموز في بداية البحث، ولذا لا بد من مراجعته للمتابعة في عملية الاشتقاق بشكل واضح.

### البنية العامة لعملية التنبؤ:

بفرض المتحول  $x$  متحول الحالة في النظام المدروس، عندئذ يعطى الشكل العام للخروج المستقبلي بالشكل:

$$y_{\rightarrow k} = H\Delta u_{\rightarrow k-1} + Px_{\leftarrow k} \quad [2-14]$$

حيث:

- $H$  هي مصفوفة Toeplitz ( $C_{G/\Delta}$ ) لاستجابة النظام لتابع القفزة الواحدية.
- $P$  هي مصفوفة تعتمد عناصرها على بارامترات النظام بشكل مباشر ولكن لاخطياً.

## 2-4-1 التنبؤ باستخدام معادلات الحالة:

إن استخدام معادلات الحالة في التنبؤ بسيط ومباشر، فبالعودة إلى معادلة الخرج نجد أن الحصول على قيمة للخرج في اللحظة التالية يحتاج فقط إزاحة زمنية لمتحول الحالة لحظة واحدة إلى الأمام، ليصبح النموذج على الشكل<sup>1</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= A\mathbf{x}_k + B\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_{k+1} &= C\mathbf{x}_{k+1} \end{aligned} \right\} \quad [2-15]$$

وبناءً على هذا النموذج يمكن الآن إيجاد الخرج المتنبأ به في أي لحظة زمنية قادمة، ففي اللحظة  $k + 2$  يصبح النموذج:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+2} &= A\mathbf{x}_{k+1} + B\mathbf{u}_{k+1} \\ \mathbf{y}_{k+2} &= C\mathbf{x}_{k+2} \end{aligned} \right\} \quad [2-16]$$

وبتعويب قيمة  $\mathbf{x}_{k+1}$  من [2-15] في [2-16] نجد أن:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+2} &= A^2\mathbf{x}_k + AB\mathbf{u}_k + B\mathbf{u}_{k+1} \\ \mathbf{y}_{k+2} &= C\mathbf{x}_{k+2} \end{aligned} \right\} \quad [2-17]$$

وبالتقدم لحظتين زمنييتين نستطيع كتابة النموذج في اللحظة  $k + 3$  اعتماداً على [2-17] بالشكل:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+3} &= A^2\mathbf{x}_{k+1} + AB\mathbf{u}_{k+1} + B\mathbf{u}_{k+2} \\ \mathbf{y}_{k+3} &= C\mathbf{x}_{k+3} \end{aligned} \right\} \quad [2-18]$$

وبتعويب قيمة  $\mathbf{x}_{k+1}$  من [2-15] في [2-18] نجد:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+3} &= A^2[A\mathbf{x}_k + B\mathbf{u}_k] + AB\mathbf{u}_{k+1} + B\mathbf{u}_{k+2} \\ \mathbf{y}_{k+3} &= C\mathbf{x}_{k+3} \end{aligned} \right\} \quad [2-19]$$

<sup>1</sup> لقد تم اعتماد النموذج دون إضافة الضجيج ( $D=0$ ) بهدف التبسيط، وذلك لأن التعامل مع الضجيج في حالة التنبؤ يحتاج إلى إدخال مفهوم تكاملي للحصول على إزاحة صفرية.

كل ما سبق يقودنا إلى اشتقاق الخرج المتنبأ به في أي لحظة  $n$  من المستقبل بالشكل التالي:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+n} &= A^n \mathbf{x}_k + A^{n-1} B \mathbf{u}_k + A^{n-2} B \mathbf{u}_{k+1} + \dots + B \mathbf{u}_{k+n-1} \\ \mathbf{y}_{k+n} &= C \mathbf{x}_{k+n} = C [A^n \mathbf{x}_k + A^{n-1} B \mathbf{u}_k + A^{n-2} B \mathbf{u}_{k+1} + \dots + B \mathbf{u}_{k+n-1}] \end{aligned} \right\} [2-20]$$

وبالتالي يمكننا تشكيل كامل شعاع التنبؤ على مجال أفق تنبؤ  $n_y$  على الشكل:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ x_{k+2} \\ x_{k+3} \\ \vdots \\ x_{k+n_y} \end{bmatrix}}_{x_{\rightarrow k}} = \underbrace{\begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^{n_y} \end{bmatrix}}_{P_{xx}} x_k + \underbrace{\begin{bmatrix} B & 0 & 0 & \dots \\ AB & B & 0 & \dots \\ A^2 B & AB & B & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A^{n_y-1} B & A^{n_y-2} B & A^{n_y-3} B & \dots \end{bmatrix}}_{H_x} \underbrace{\begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ u_{k+2} \\ \vdots \\ u_{k+n_y-1} \end{bmatrix}}_{u_{\rightarrow k-1}} \quad [2-21]$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ y_{k+3} \\ \vdots \\ y_{k+n_y} \end{bmatrix}}_{y_{\rightarrow k}} = \underbrace{\begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{n_y} \end{bmatrix}}_P x_k + \underbrace{\begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots \\ CAB & CB & 0 & \dots \\ CA^2 B & CAB & CB & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{n_y-1} B & CA^{n_y-2} B & CA^{n_y-3} B & \dots \end{bmatrix}}_H u_{\rightarrow k-1} \quad [2-22]$$

وباختصار:

$$\left. \begin{aligned} x_{\rightarrow k} &= P_{xx} x_k + H_x u_{\rightarrow k-1} \\ y_{\rightarrow k} &= P x_k + H u_{\rightarrow k-1} \end{aligned} \right\} [2-23]$$

## 2-4-2 التنبؤ باستخدام توابع النقل:

إن للتنبؤ باستخدام توابع النقل طرقاً كثيرة تمت دراستها في تاريخ التحكم التنبؤي، وهي في مجملها تؤدي إلى نفس الهدف وتعطي نتائج متقاربة، ورغم أن كثيراً من الأبحاث اعتمدت على معادلة diophantine للحصول على المخارج المستقبلية [7]، إلا أن التفاصيل المتشعبة التي تمتلكها هذه الطريقة قد تؤدي لضياع الفكرة العامة للتنبؤ كمفهوم. من هنا سننطلق في هذه البحث من عملية اشتقاق لمجموعة من مصفوفات التنبؤ التي ستعطي عند إدماجها في توابع النقل نموذجاً عاماً للمخارج المستقبلية مبنياً على قيم المداخل والمخارج السابقة لها، وهذا المفهوم يعطي صورة أوضح عن عملية التنبؤ بعيداً عن التعقيدات الرياضية.



**2-4-2-1 نموذج CARIMA وحيد الدخل والخرج مع  $T(z) = 1$ :**

بالاعتماد على النموذج المبين في المعادلة [2-9] والذي تم إلغاء الخطأ الساكن فيه، وبإهمال الضجيج للتبسيط يكون لدينا تابع النقل بالشكل:

$$A(z)y_k = b(z)\Delta u_k \quad [2-24]$$

حيث:

$$\left. \begin{aligned} A(z) = a(z)\Delta(z) &= 1 + A_1z^{-1} + A_2z^{-2} + \dots + a_{n+1}z^{-n-1} \\ b(z) &= b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n} \end{aligned} \right\} \quad [2-25]$$

• خطوة واحدة للأمام:

بكتابة المعادلة [2-24] في اللحظة  $k + 1$  بالاعتماد على [2-25] نحصل على:

$$y_{k+1} = -A_1y_k - \dots - A_{n+1}y_{k-n} + b_1\Delta u_k + \dots + b_n\Delta u_{k-n+1} \quad [2-26]$$

وهي معادلة يمكننا أن نقسمها إلى جزأين، أحدهما يتألف على المداخل والمخارج السابقة وهو قسم معلوم، والآخر مكون من تغيرات الدخل المستقبلية وهو القسم الذي يحدد درجة حرية النظام d.o.f.، وذلك على الشكل:

$$y_{k+1} = \underbrace{-[A_1, \dots, A_{n+1}]y_{\leftarrow k}}_{\text{known}} + \underbrace{[b_2, \dots, b_n]\Delta u_{\leftarrow k-1} + b_1\Delta u_k}_{\text{d.o.f.}} \quad [2-27]$$

تكافئ العلاقة [2-27] ما حصلنا عليه في [2-15].

•  $n$  خطوة للأمام:

قد يبدو لأول وهلة أن عملية إيجاد الخرج المستقبلي في أي لحظة مستقبلية تشابه العملية التكرارية التي قمنا بها في المعادلات [2-15] و [2-16] و [2-18]، وهذا أمر صحيح، إذ يمكننا كتابة المعادلة [2-27] في اللحظة  $k + 2$ ، ثم في اللحظة  $k + 3$  وهكذا... والاعتماد على المنشور [2-27] في كل مرة لتعويض

قيمة التنبؤ في اللحظة  $k + 1$ . وسنحصل من ذلك على القيمة المستقبلية المتنبأ بها في أي لحظة  $n$  قادمة، لكن لو حاولنا تطبيق هذه الطريقة عملياً لوجدنا أن المعادلات الجبرية الناتجة ستكون على درجة كبيرة من التعقيد والطول، والتعامل معها سيكون بأبسط الأوصاف مُجهداً، لذلك سنتبع طريقة أكثر بساطة ووضوحاً للوصول إلى نفس النتيجة المرجوة، وذلك على الشكل التالي:

1. بالاستعانة بالعلاقة [2-26] نكتب قيمة التنبؤ للخروج في كل لحظة زمنية حتى اللحظة  $n_y$  نهاية

أفق التنبؤ (دون تعويض أي معادلة في الأخرى) على الشكل التالي:

$$y_{k+1} + A_1 y_k + \dots + A_{n+1} y_{k-n} = b_1 \Delta u_k + b_2 \Delta u_{k-1} + \dots + b_n \Delta u_{k-n+1}$$

$$y_{k+2} + A_1 y_{k+1} + \dots + A_{n+1} y_{k-n+1} = b_1 \Delta u_{k+1} + b_2 \Delta u_k + \dots + b_n \Delta u_{k-n+2}$$

⋮

$$y_{k+n_y} + \dots + A_{n+1} y_{k-n+n_y+1} = b_1 \Delta u_{k+n_y-1} + \dots + b_n \Delta u_{k-n+n_y}$$

2. نكتب المعادلات السابقة ضمن مصفوفات مرتبة على الشكل التالي:

$$\left. \begin{aligned} & \left[ \begin{array}{cccc} 1 & 0 & \dots & 0 \\ A_1 & 1 & \dots & 0 \\ A_2 & A_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] \underbrace{\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ \vdots \\ y_{k+n_y} \end{bmatrix}}_{y_{\rightarrow k}} + \left[ \begin{array}{cccc} A_1 & A_1 & \dots & A_{n+1} \\ A_2 & A_3 & \dots & 0 \\ A_3 & A_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] \underbrace{\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ x_{k-2} \\ \vdots \\ y_{k-n} \end{bmatrix}}_{y_{\leftarrow k}} x_k \\ & = \left[ \begin{array}{cccc} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & \dots & 0 \\ b_3 & b_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+n_y-1} \end{bmatrix}}_{\Delta u_{\rightarrow k-1}} + \left[ \begin{array}{cccc} b_2 & b_3 & \dots & A_n \\ b_3 & b_4 & \dots & 0 \\ b_4 & b_5 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_{k-1} \\ \Delta u_{k-2} \\ \vdots \\ \Delta u_{k-n+1} \end{bmatrix}}_{\Delta u_{\leftarrow k-1}} \end{aligned} \right\} [2-28]$$

3. بالاعتماد على مفهوم مصفوفة Toeplitz/Hankel (راجع دليل الرموز) يمكننا كتابة [2-28]

بالشكل:

$$C_A y_{\rightarrow k} + H_A y_{\leftarrow k} = C_{zb} \Delta u_{\rightarrow k-1} + H_{zb} \Delta u_{\leftarrow k-1} \quad [2-29]$$

4. من [2-29] نجد الخرج المستقبلي:

$$y_{\rightarrow k} = C_A^{-1} [C_{zb} \Delta u_{\rightarrow k-1} + H_{zb} \Delta u_{\leftarrow k-1} - H_A y_{\leftarrow k}] \quad [2-30]$$

والتي يمكن أن تكتب على الشكل التالي:

$$y_{\rightarrow k} = H \Delta u_{\rightarrow k-1} + P \Delta u_{\leftarrow k-1} + Q y_{\leftarrow k} \quad [2-31]$$

حيث:

$$H = C_A^{-1} C_{zb}$$

$$P = C_A^{-1} H_{zb}$$

$$Q = -C_A^{-1} H_A$$

مع الملاحظة أن حساب المصفوفة  $C_A^{-1}$  يمكن أن يتم بسهولة عن طريق تعويض معاملات التابع  $\frac{1}{A(z)}$  بدلاً من  $A(z)$  في المصفوفة  $C$ .

#### 2-2-4-2 نموذج CARIMA متعدد المداخل والمخارج مع $T(z) = 1$ :

للحصول على هذا النموذج نتبع نفس الإجراءات السابقة تماماً، ونلاحظ أن درجة التعقيد في المعادلات ليست أكبر بكثير من حالة النظام وحيد الدخل والخرج، عدا عن طول المعادلات فقط. وبالانطلاق من العلاقة التالية:

$$y_{k+1} + D_1 y_k + \dots + D_{n+1} y_{k-n} = N_1 \Delta u_k + N_2 \Delta u_{k-1} + \dots + N_n \Delta u_{k-n+1} \quad [2-32]$$

ويتكرر الخطوات 2 و 3 و 4 مما سبق نحصل على:

$$C_D y_{\rightarrow k} + H_D y_{\leftarrow k} = C_{zN} \Delta u_{\rightarrow k-1} + H_{zN} \Delta u_{\leftarrow k-1} \quad [2-33]$$

وتكتب بالشكل:

$$y_{\rightarrow k} = H \Delta u_{\rightarrow k-1} + P \Delta u_{\leftarrow k-1} + Q y_{\leftarrow k} \quad [2-34]$$

حيث:

$$H = C_D^{-1}C_{zN}$$

$$P = C_D^{-1}H_{zN}$$

$$Q = -C_D^{-1}H_D$$

## 2-5 اشتقاق قانون التحكم:

بعد أن وصلنا إلى المرحلة التي نستطيع فيها التنبؤ بقيم الخرج المستقبلية نستطيع الآن المتابعة لبناء قانون التحكم الذي سيقوم المتحكم التنبؤ بحساب قيمته في كل لحظة ضمن الزمن الحقيقي، ثم تطبيقه (أول عنصر منه) على الجملة المراد التحكم بها، وتعد هذه الخطوة نظرياً الخطوة النهائية لبناء متحكم تنبؤي. رغم ذلك لا بد أن نذكر دائماً أن أهم ميزات المتحكمات التنبؤية تكمن حقيقة في إمكانية تعاملها مع قيود أنظمة التحكم المرتبطة بها، لذلك فإن الخطوة النهائية عملياً لبناء المتحكم تكمن في ربط قانون التحكم مع خوارزميات التخمين ومعادلات أمثلة قيود النظام، الأمر الذي يضمن قوة المتحكم التنبؤي في التطبيقات الصناعية.

سنعتمد في اشتقاق قانون التحكم على خوارزمية التحكم التنبؤي المعيارية GPC وذلك لأنها من أعم الخوارزميات المتبعة، وتتحصر الفوارق بينها وبين الخوارزميات الأخرى في بعض الاختلافات ضمن النماذج الرياضية للجمل وبعض القيود التي يتم فرضها على عملية الأمثلة.

## 2-5-1 العناصر الأساسية لتقنية GPC:

لا بد لنا قبل البدء في عملية بناء أمر التحكم المطلوب من استعراض أهم المفاهيم المرتبطة بتقنية GPC والتي هي عملياً إسقاطات مفاهيم التحكم التنبؤي العامة على هذه الخوارزمية بشكل دقيق، وستكون هذه الإسقاطات هي العناصر العملية التي ستكوّن بتفاعلها قانون التحكم التنبؤي.

### 2-5-1-1 تابع الكلفة وقيمه الأمثلة:

تمثل القيمة الأمثلة لتابع الكلفة أصغر قيمة ممكنة له، ويعطى هذا التابع في الخوارزمية المعممة GPC على الشكل التالي:

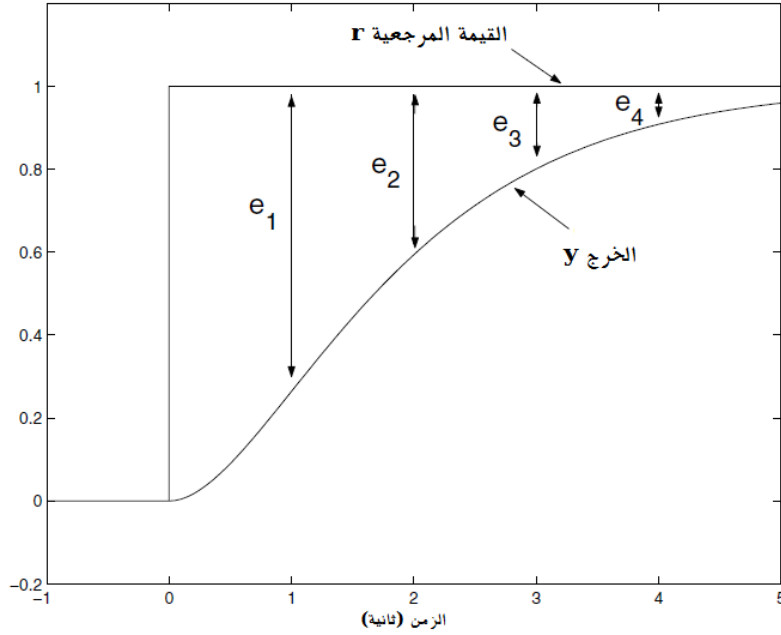
$$J = \sum_{i=n_w}^{n_y} \|r_{k+i} - y_{k+i}\|_2^2 + \lambda \sum_{i=0}^{n_u-1} \|\Delta u_{k+i}\|_2^2$$

$$= \sum_{i=n_w}^{n_y} \|e_{k+i}\|_2^2 + \lambda \sum_{i=0}^{n_u-1} \|\Delta u_{k+i}\|_2^2 \quad [2-35]$$

والذي يعني أن تابع الكلفة يتألف من حدين:

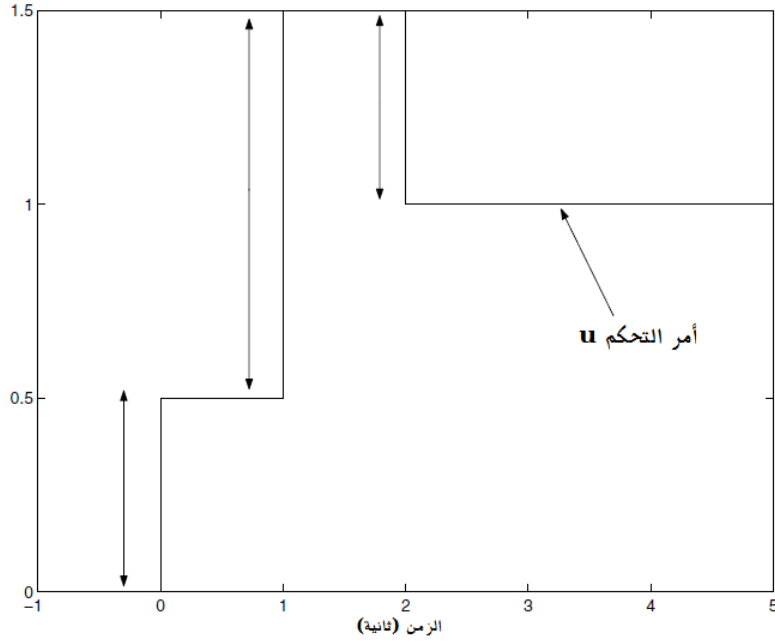
- مجموع مربعات الأخطاء المتوقعة للخروج المستقبلي عن القيمة المرجعية له، بين قيمة ما ابتدائية  $n_w$  وقيمة أفق التنبؤ بالخروج  $n_y$ ، تظهر هذه الأخطاء في الشكل (2-3).
- مجموع مربعات التغيرات في قيم الدخل ضمن فضاء التحكم  $n_u$ ، كما في الشكل (2-4)، ويتم الافتراض أن قانون التحكم يحافظ على قيمته الأخيرة بعد انتهاء هذا المجال، أي أن:

$$\Delta u_{k+i} = 0, \quad i \geq n_u \quad [2-36]$$



الشكل 2-3 الأخطاء الأربعة الأولى

<sup>1</sup> فضاء التحكم هو المجال الذي يعطي فيه المتحكم أوامر لاختبار استجابة النظام لها، وهو دائماً أصغر من فضاء التنبؤ، ويعبر عن درجة الحرية التي يمتلكها المتحكم.



الشكل 2-4 قيم أمر التحكم ضمن فضاء تحكم طوله ثلاث عينات

إن الهدف من تصغير تابع الكلفة يظهر من ملاحظة أن أصغر قيمة ممكنة لهذا التابع  $J = 0$  مرتبطة بعدم وجود إزاحة للخروج عن قيمته المرجعية، وهو ما يعني أن الخطأ صفري في اللحظات التالية  $e_{\rightarrow} = 0$  وقانون التحكم ثابت على آخر قيمة له.

يمكن كتابة تابع الكلفة بصيغة أكثر اختصاراً اعتماداً على القيم الشعاعية والمصفوفات على الشكل التالي:

$$J = \|r_{\rightarrow} - y_{\rightarrow}\|_2^2 + \lambda \|\Delta u_{\rightarrow}\|_2^2 = \|e_{\rightarrow}\|_2^2 + \lambda \|\Delta u_{\rightarrow}\|_2^2 \quad [2-37]$$

#### ❖ القيمة الأمثلية:

إن حساب القيمة الأمثلية لتابع الكلفة  $J$  يتم على مجال محدد بأفق التحكم  $n_u$ ، ويأخذ بعين الاعتبار في حساباته تغيرات أمر التحكم  $\Delta u_{\rightarrow}$  على طول هذا المجال، لذلك يعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$\min_{\Delta u_{\rightarrow}} J = \|e_{\rightarrow}\|_2^2 + \lambda \|\Delta u_{\rightarrow}\|_2^2 \quad [2-38]$$

وبعد إيجاد القيمة الأمثلية لتابع الكلفة يتم الاستفاد منها في حساب أوامر التحكم على طول أفق التحكم، ويتم تطبيق الأمر الأول -كما سبق ذكره- على الجملة الحقيقية، ثم تتكرر العملية في اللحظة الزمنية التالية.

### 2-1-5-2 تأثير أفق التحكم على حسابات التنبؤ:

بالنظر إلى مصفوفات التنبؤ ذات الصيغة العامة [2-14] نجد أن المصفوفة  $H$  تضرب بكامل مجال تغيرات أمر التحكم  $\Delta u_{\rightarrow k-1}$ ، وهي لذلك تعتبر مصفوفة مربعة، ليأخذ ناتج الضرب الشكل التالي:

$$H \cdot \Delta u_{\rightarrow} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{n_y-1} & h_{n_y-2} & h_{n_y-3} & \dots & h_{n_y-n_u} & \dots & h_0 \end{bmatrix}}_H \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_{k|k} \\ \Delta u_{k+1|k} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+n_u-1|k} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+n_y-1|k} \end{bmatrix}}_{\Delta u_{\rightarrow k-1}} \quad [2-39]$$

إلا أنه وبأخذ العلاقة [2-36] بعين الاعتبار فأننا نجد أنه مع ثبات أمر التحكم على قيمة واحدة بعد فضاء التحكم تصبح تغيراته معدومة، ولا داعي عندها لأخذ المصفوفة  $H$  بكاملها (فنواتج الضرب أصفار على أي حال بعد فضاء التحكم)، لذلك نعتمد من المصفوفة  $H$  عدداً من الأعمدة بطول فضاء التحكم فقط لتصبح المعادلة السابقة على الشكل:

$$H \cdot \Delta u_{\rightarrow} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{n_y-1} & h_{n_y-2} & h_{n_y-3} & \dots & h_{n_y-n_u} \end{bmatrix}}_{H_{th}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_{k|k} \\ \Delta u_{k+1|k} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+n_u-1|k} \end{bmatrix}}_{\Delta u_{\rightarrow k-1}} \quad [2-40]$$

وبناءً عليه تصبح المصفوفة  $H$  مصفوفة طويلة بالأبعاد  $n_y * n_u$ ، وشعاع تغيرات الدخل  $\Delta u_{\rightarrow}$  بطول  $n_u$ . وفيما يأتي من هذا البحث سنعتبر أن هذا الشرط محقق دوماً، أي أن  $H = H_{th}$ .

### 2-1-5-3 قيود النظام:

إن من أهم ميزات التحكم التنبؤي قدرته على التعامل مع القيود التي يفرضها النظام على جملة التحكم. هذه القيود تدخل في حساب تابع الكلفة [2-38] ضمن عملية الأمثلة.

في معظم الأنظمة نجد قيوداً على دخل النظام بشكل حدود أعظمية وحدود أصغرية على الشكل التالي:

$$\underline{u}_i \leq u_i \leq \overline{u}_i \quad [2-41]$$

أو على تغيرات دخل النظام:

$$\underline{\Delta u}_i \leq \Delta u_i \leq \overline{\Delta u}_i \quad [2-42]$$

كما قد نجد قيوداً على خرج النظام ومتحولات الحالة:

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x}_i \quad ; \quad \underline{y}_i \leq y_i \leq \overline{y}_i \quad [2-43]$$

وقد تأخذ هذه القيود شكل معادلات تضم أكثر من خرج مثلاً:

$$y_1 + y_2 \leq \overline{y}_{1,2} \quad [2-44]$$

تعتمد هذه القيود على الجملة المتحكم بها وتختلف من جملة لأخرى، إلا أنه بشكل عام يتم اعتبارها خطية على مجال تغيرات أمر التحكم  $\Delta u$ . ولما كان تابع الكلفة [2-38] تربيعياً فإن تضمين القيود ضمنه يتم أيضاً بحل مشكلة أمثلة تربيعية Quadratic Program على كامل مجال  $\Delta u$ .

#### 2-5-1-4 الأنظمة متعددة المداخل والمخارج:

إن تابع الكلفة [2-38] قادر ضمناً على التعامل مع الأنظمة متعددة المداخل والمخارج، إلا أنه نتيجة التأثير المتبادل بين متحولات الحالة في هذه الأنظمة تتأثر أمثلية  $J$ ، وبميل تابع الكلفة لأخذ قيم أكبر مع تزايد هذا التأثير. إلى جانب ذلك تظهر مشكلة اختلاف سرعة أقطاب حلقات متحولات الحالة، الأمر الذي يؤدي (مع وجود العامل السلمي  $\lambda$ ) إلى تفاوت في قساوة التحكم بين مختلف هذه المتحولات. لحل هذه المشكلات لا بد من تغيير في بنية التابع  $J$  يضمن إعطاء كل متحول حالة وزناً منسجماً مع سرعة استجابته، الأمر الذي يؤدي في المحصلة إلى إعطاء أوامر تحكم متجانسة لمختلف حلقات النظام. هذه الأوزان تعطى ضمن تابع الكلفة بشكل مصفوفات توزيع لكل من الدخل  $W_u$  والخرج  $W_y$  تساعد العامل السلمي  $\lambda$  في توضيح أولويات التحكم للمتحكم التنبؤي، ويصبح تابع الكلفة  $J$  على الشكل:



$$J = \sum_{i=n_w}^{n_y} \|W_y(r_{k+i} - y_{k+i})\|_2^2 + \lambda \sum_{i=0}^{n_u-1} \|W_u(\Delta u_{k+i})\|_2^2 \quad [2-45]$$

حيث المصفوفتان  $W_u$  و  $W_y$  قطريتان موجبتان.

تميل هذه الأوزان إلى الزيادة عادة في حجمها مع زيادة حجم فضاءي التنبؤ والتحكم، الأمر الذي يزيد تعقيد العمليات الحسابية، وزيادة التعقيد هذه تؤثر بدورها على الأداء الأمثل للنظام ككل، لذلك يتم عادة تمثيل النظام بالشكل الواحدي، مما يجانس عملياً بين حلقات النظام ويعطي مصفوفات الأوزان قيماً ابتدائية واحدة  $W_u = I$  ;  $W_y = I$ .

فيما يأتي سنقوم باشتقاق أمر التحكم باستخدام معادلات الحالة، والتي تم اعتمادها في البناء العملي للمتحكم التنبؤي، علماً أن تفاصيل عن اشتقاق العلاقات من خلال توابع النقل موضحة في [7].

## 2-5-2 اشتقاق قانون التحكم التنبؤي اعتماداً على معادلات الحالة:

إن الغاية من أمر التحكم في الأساس هي توجيه خرج الجملة المتحكم بها إلى القيمة المرجعية التي يحددها المستثمر، وفي حالة التحكم التنبؤي وجدنا أنه لا بد من وجود نموذج رياضي يصف أداء الجملة داخل المتحكم، يمكن المتحكم من التنبؤ بأداء الجملة المستقبلي، إضافة إلى وجود الجملة نفسها كجزء من نظام التحكم. ولا يخفى أن هناك العديد من العوامل التي تؤدي إلى عدم مثالية النموذج الرياضي المستخدم، من قبيل الضجيج الذي تتعرض له الجملة الحقيقية دون أن تتم مراعاته في النمذجة، أو تغيرات بارامترات الجملة نفسها (كاختلاف قيمة مقاومة المتحرض في محرك نتيجة الحرارة مثلاً). وهنا لا بد للمتحكم التنبؤي من التغلب على عدم التوافق هذا بين الجملة ونموذجها ليكون أداؤه فعالاً.

إن إحدى أكثر الطرق شيوعاً لتحقيق هذا الأمر هو الاعتماد في نموذج الجملة على تغيرات الدخل وليس على الدخل نفسه<sup>1</sup>، في هذه الحالة نستطيع القول:

<sup>1</sup> دخل الجملة ونموذجها هو أمر التحكم الصادر عن المتحكم.

❖ إن تابع الكلفة يعمل على إيجاد الاستجابة الأمثلية للنظام على طول فضاء التحكم، وعند وصول **الخرج الحقيقي**  $y$  إلى قيمته المرجعية  $r$  يجب أن يحافظ أمر التحكم على قيمته الحالية (الأخيرة)، ونحصل على:

$$y = r \quad ; \quad \Delta u = 0 \quad [2-46]$$

في هذه الظروف لا بد **للمنموذج الرياضي** للجملة من إعطاء خرج متتباً به مساو للقيمة المرجعية أيضاً<sup>1</sup>، وإلا فإن المتحكم سيتعامل مع الخرج الحقيقي كما لو أنه لم يصل إلى قيمته المرجعية، وعندها سيعطي أمر تحكم يوصل الجملة الحقيقية إلى استجابة تتضمن خطأ ساكناً، ولن نستطيع الموافقة بين استجابة النموذج واستجابة الجملة مادامنا نعطي قيمة أمر التحكم نفسها لكلي النموذج والجملة. أما عند استخدام تغيرات الدخل فإن المتحكم يراقب خرج النموذج المتوقع  $y_{\rightarrow}$  إلى أن يصل إلى القيمة المرجعية المتتباً بها  $r_{\rightarrow}$ ، عندها يثبت أمر التحكم المتتباً به على آخر قيمة له ويصبح لدينا:

$$y_{\rightarrow} = r_{\rightarrow} \quad ; \quad \Delta u_{\rightarrow} = 0 \quad [2-47]$$

هذا يعني أن المتحكم عند اعتماده تغيرات الدخل بات يتتباً بقيمة التغير (الواجب عليه إعطاؤها) حول **القيمة الحالية لأمر التحكم**، وليس بقيمة أمر التحكم نفسها. قيمة التغير هذه تصبح معدومة عند وصول الخرج إلى القيمة المرجعية في الجملة وفي النموذج، ولو اختلفت قيمة أمر التحكم بينهما نتيجة عدم أمثلية النموذج فإن تغير هذه القيمة يبقى معدوماً وهذا هو المهم، ليتجاوز المتحكم من خلال ذلك ظهور أي انحياز عن القيمة المرجعية سواء في الجملة أو في نموذجها الرياضي.

سنعتمد في عملية اشتقاق أمر التحكم على النموذج المبني على تغيرات أمر التحكم.

### 2-5-2-1 أمر التحكم في نموذج معادلات الحالة المعتمد على تغيرات الدخل:

يعطى نموذج معادلات الحالة عند اعتبار أن الدخل هو تغير أمر التحكم في أحد شكله كما يلي:

<sup>1</sup> في الحقيقة إن الخرج المتتباً به (من النموذج) يسبق الخرج الحقيقي. لكننا هنا لا نتكلم عن التسلسل الزمني وإنما فقط عن الشروط المؤدية لكل استجابة.

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_k \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix}}_{\hat{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix}}_{\hat{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix}}_{\hat{B}} \Delta u_k \\ y_k &= \underbrace{\begin{bmatrix} C & D \end{bmatrix}}_{\hat{C}} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + D \Delta u_k + d_k \end{aligned} \right\} \quad [2-48]$$

على هذا النموذج أن يحقق الشرط [2-46] ، ومع تغير قيمة الاضطراب  $d_k$  يجب أن تتغير قيمة كل من الدخل  $u_k$  ومتحول الحالة  $x$  للحفاظ على هذا الشرط محققاً.

❖ ولحساب قانون التحكم من هذا النموذج نتبع الخطوات التالية:

- أولاً: نوجد معادلات التنبؤ للنموذج [2-48] اعتماداً على العلاقات [2-23]، ونعوض معادلات التنبؤ في علاقة تابع الكلفة [2-37] لنحصل على التابع:

$$J = \|r_{\rightarrow} - H\Delta u_{\rightarrow} - P\hat{x}_k - L.d\|_2^2 + \lambda \|\Delta u_{\rightarrow}\|_2^2 \quad [2-49]$$

حيث:

$$L = \begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \end{bmatrix}$$

- ثانياً: نقوم بإجراء عملية الأمثلة لتابع الكلفة  $J$  على مجال  $\Delta u_{\rightarrow}$ ، وبما أن  $J$  تربيعي وموجب دوماً فإن إيجاد القيمة الأصغرية له يكون بمساواة مشتقه الأول بالصفر:

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{d\Delta u_{\rightarrow}} &= [H^T r_{\rightarrow} - H^T P\hat{x}_k - H^T L.d] - (H^T H + \lambda I)\Delta u_{\rightarrow} \\ \frac{dJ}{d\Delta u_{\rightarrow}} = 0 &\Rightarrow (H^T H + \lambda I)\Delta u_{\rightarrow} = [H^T r_{\rightarrow} - H^T P\hat{x}_k - H^T L.d] \end{aligned} \quad [2-50]$$

- ثالثاً: نعزل  $\Delta u_{\rightarrow}$ :

$$\Delta u_{\rightarrow} = (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T [r_{\rightarrow} - P\hat{x}_k - L.d] \quad [2-51]$$

- رابعاً: إن أمر التحكم هو أول عنصر من  $\Delta u_{\rightarrow}$  أي أن:

$$\Delta u_k = e_1^T \Delta u_{\rightarrow} \quad ; \quad e_1^T = [I \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$$

وعليه فإن:

$$\begin{aligned}\Delta u_k &= e_1^T (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T [r_{\rightarrow} - [P \ L] \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ d \end{bmatrix}] \\ &= P_r r_{\rightarrow} - \hat{K} \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ d \end{bmatrix}\end{aligned}\quad [2-52]$$

حيث:

$$\begin{aligned}P_r &= e_1^T (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T \\ \hat{K} &= e_1^T (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T [P \ L]\end{aligned}$$

ونلاحظ بوضوح من العلاقة [2-51] أن أمر التحكم التنبؤي يتناهي إلى تغذية عكسية بمتحولات الحالة<sup>1</sup>، مضافاً له حد التغذية الأمامية  $P_r r$ .

#### ❖ معادلات الحلقة المغلقة والأثر التكاملي:

يمكن الحصول على علاقة الحلقة المغلقة بتعويض [2-52] في [2-48] لنحصل على :

$$\left. \begin{aligned}x_{k+1} &= \hat{A} \hat{x}_k - \hat{B} \hat{K} \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ d \end{bmatrix} + \hat{B} P_r r_{\rightarrow} \\ y_k &= \hat{C} \hat{x}_k + D \Delta u_k + d_k\end{aligned} \right\} \quad [2-53]$$

ولنتذكر دائماً أن الأثر التكاملي الذي يلغي الخطأ الساكن في الحالة المستقرة يتم ضمانه من خلال عاملين أساسيين، **الأول** هو النموذج الموسع لمعادلات الحالة [2-48] والذي يستعيز عن الدخل بتغيرات هذا الدخل لإلغاء تأثير عدم التماثل بين الجملة والنموذج، و**الثاني** هو وجود نموذج لتخمين الاضطراب  $d_k$ ، هذا النموذج<sup>2</sup> يمكن أن يعتمد على معادلات الحالة النموذجية [2-15] وذلك لأن الدخل  $u_k$  معروف ولا حاجة لتخمينه.

<sup>1</sup> مع تذكر أن متحولات الحالة هنا تختلف عنها في نموذج معادلات الحالة الاعتيادي.  
<sup>2</sup> عملياً يخمن هذا النموذج كلاً من الاضطراب  $d$  ومتحولات الحالة  $x$ .

## 2-6 التعامل مع قيود النظام:

فيما سبق وحتى الآن كنا نتعامل مع الأنظمة دون النظر إلى القيود التي قد تفرضها على عملية التحكم، وكان ذلك بهدف إيضاح فكرة أن الأنظمة التحكم غير المقيدة تمتلك قانون تحكم ثابتاً يمكن المصمم من إجراء تحليل لاستقرار النظام ككل، وهذا النوع من الاختبارات ضروري لأنه يعطي فكرة عن أداء الأنظمة المقيدة، فإذا كان أداء المتحكم ضعيفاً لنظام ما بدون أخذ قيوده بعين الاعتبار فإن المرء لن يتوقع منه أداءً جيداً عند إضافة القيود للنظام. إلا أن العكس غير صحيح للأسف، فلو كان أداء المتحكم جيداً لنظام غير مقيد فليس من الضروري أن يكون أدائه جيداً للنظام المقيد.

في ما يلي سنبين كيف يمكن إضافة القيود لعملية الأمثلة، وكيف يتم حل معادلات النظام الناتجة بشكل عام.

## 2-6-1 معادلات قيود النظام:

إن أيّاً من بارامترات النظام يمكن أن يخضع لقيود معينة، سواء الدخل أو الخرج أو متحولات الحالة. وهدف المصمم أن يُبقي متحكمه القيم التي يتنبأ بها ويجري عليها عمليات الأمثلة ضمن حدود هذه القيود دون تجاوزها. وليتم له ذلك لابد من مقارنة القيم التي يتنبأ بها المتحكم مع قيود النظام على طول فضاءي التحكم والتنبؤ، وبتضمن هذه المقارنة ضمن حسابات تابع الكلفة يضمن المصمم أن المتحكم سيعطي تنبؤاً أمثلماً ضمن حدود قيود النظام في كل لحظة زمنية.

يجدر بالذكر أن معادلات قيود النظام يجب أن تكتب بدلالة خرج المتحكم (أمر التحكم) المطلوب، حيث تحسب القيمة الأمثلية لتابع الكلفة بالنسبة لهذا الأمر.

## 2-6-1-1 القيود على تغيرات الدخل:

باعتبار الحدود العليا والدنيا لتغيرات أمر التحكم هي نفسها الموضحة في [2-42]، وبما أن تغيرات أمر التحكم معدومة بعد فضاء التحكم نستطيع أن نعبر عن قيودها بالشكل:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta u \\ \vdots \\ \Delta u \end{bmatrix}}_{\underline{\Delta U}} \leq \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k-1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+n_u-1} \end{bmatrix} \leq \underbrace{\begin{bmatrix} \overline{\Delta u} \\ \overline{\Delta u} \\ \vdots \\ \overline{\Delta u} \end{bmatrix}}_{\overline{\Delta U}} \quad [2-54]$$

وبصيغة أبسط:

$$\underline{\Delta U} \leq \Delta u_{\rightarrow} \leq \overline{\Delta U} \quad [2-55]$$

وهو ما يمكن التعبير عنه بمتراجحة خطية كما يلي:

$$\begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix} \Delta u_{\rightarrow} - \begin{bmatrix} \overline{\Delta U} \\ -\underline{\Delta U} \end{bmatrix} \leq 0 \quad [2-56]$$

حيث  $I$  تمثل مصفوفة واحدة بالأبعاد المناسبة.

### 2-1-6-2 قيود الدخل:

بما أننا اعتبرنا أن أمر التحكم هو تغير الدخل، نكتب قيمة الدخل المستقبلي كتابع لأمر التحكم قبل اشتقاق معادلات القيود منه، ونجد أن معادلة الدخل تعطى بالعلاقة:

$$u_{\rightarrow} = C_{I/\Delta} \Delta u_{\rightarrow} + \underbrace{\begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}}_L u_{k-1} \quad [2-57]$$

وبأخذ الحدود العظمى والدنيا على الشكل:

$$\underline{u} \leq u \leq \overline{u} \quad [2-58]$$

فإنه يجب مراعاة هذه القيود على طول فضاء التحكم، وبما أن قيمة الدخل تصبح ثابتة بعد  $n_u$  فإن الدخل يبقى ضمن حدوده المسموحة فيما وراء فضاء التحكم. ونستطيع التعبير عن ذلك بالصيغة المصفوفية كما سبق:

$$\begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{u} \\ \vdots \\ \underline{u} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u_k \\ u_{k-1} \\ \vdots \\ u_{k+n_u-1} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{u} \\ \vdots \\ \bar{u} \end{bmatrix} \quad [2-59]$$

وبالتعويض من العلاقة [2-57] يصبح لدينا:

$$\underline{U} \leq C_{I/\Delta} \Delta u_{\rightarrow} + L u_{k-1} \leq \bar{U} \quad [2-60]$$

وهو ما يمكننا كتابته على الشكل:

$$\begin{bmatrix} C_{I/\Delta} \\ -C_{I/\Delta} \end{bmatrix} \Delta u_{\rightarrow} - \begin{bmatrix} \bar{U} - L u_{k-1} \\ -\underline{U} - L u_{k-1} \end{bmatrix} \leq 0 \quad [2-61]$$

### 2-6-1-3 قيود الخرج:

بالمثل يمكننا كتابة الخرج كتابع لأمر التحكم، ثم ومن معادلة التنبؤ [2-31] نعوض في علاقة الحدود العليا والدنيا للخرج لنصل إلى العلاقة النهائية التالية:

$$\begin{bmatrix} H \\ -H \end{bmatrix} \Delta u_{\rightarrow} - \begin{bmatrix} \bar{Y} - Q \Delta u_{\leftarrow} - P y_{\leftarrow} \\ -\underline{Y} - Q \Delta u_{\leftarrow} - P y_{\leftarrow} \end{bmatrix} \leq 0 \quad [2-62]$$

ونلاحظ في حالة الخرج أن مراعاة القيود تتم على طول فضاء التنبؤ  $n_y$ ، إلا أنه في الحقيقة ونتيجة لعدم إمكانية ضمان ألا تتغير قيمة الخرج فيما وراء فضاء التنبؤ بحيث تتخطى القيود المحددة لها، فإنه من الأفضل عملياً أن تتم مراقبة الخرج لما بعد  $n_y$  لضمان عدم حدوث أي تجاوز في قيمة الخرج [7].

❖ وبشكل عام وبما أن المطلوب مراعاة جميع قيود النظام، يمكن أن نمثل كل هذه القيود ضمن متراجعة واحدة تضم جميع المتراجحات السابقة على الشكل:

$$C \Delta u_{\rightarrow} - d_k \leq 0 \quad [2-63]$$

حيث:

$$C = \begin{bmatrix} I \\ -I \\ C_{I/\Delta} \\ -C_{I/\Delta} \\ H \\ -H \end{bmatrix} ; \quad d = \begin{bmatrix} \overline{\Delta U} \\ -\underline{\Delta U} \\ \overline{U} - L u_{k-1} \\ -\underline{U} - L u_{k-1} \\ \overline{Y} - Q \Delta u_{\leftarrow} - P y_{\leftarrow} \\ -\underline{Y} - Q \Delta u_{\leftarrow} - P y_{\leftarrow} \end{bmatrix}$$

ونجد أن  $d_k$  تعتمد على معلومات المداخل والمخارج السابقة، أما  $C$  فهي متغيرة مع الزمن. ومن الملاحظ بوضوح أن عدد المتراجحات الخطية الناتجة عن القيود كبير حتى لو كان كل من  $n_u$  و  $n_y$  صغيراً. ولو فرضنا أن نظامنا له الأبعاد  $n * n$ ، فإن القيود أعلاه تعطي عدداً  $P$  من المتراجحات، حيث:

$$P = 2n(2n_u + n_y) \quad [2-64]$$

## 2-6-2 حل مشكلة الأمثلية مع قيود النظام:

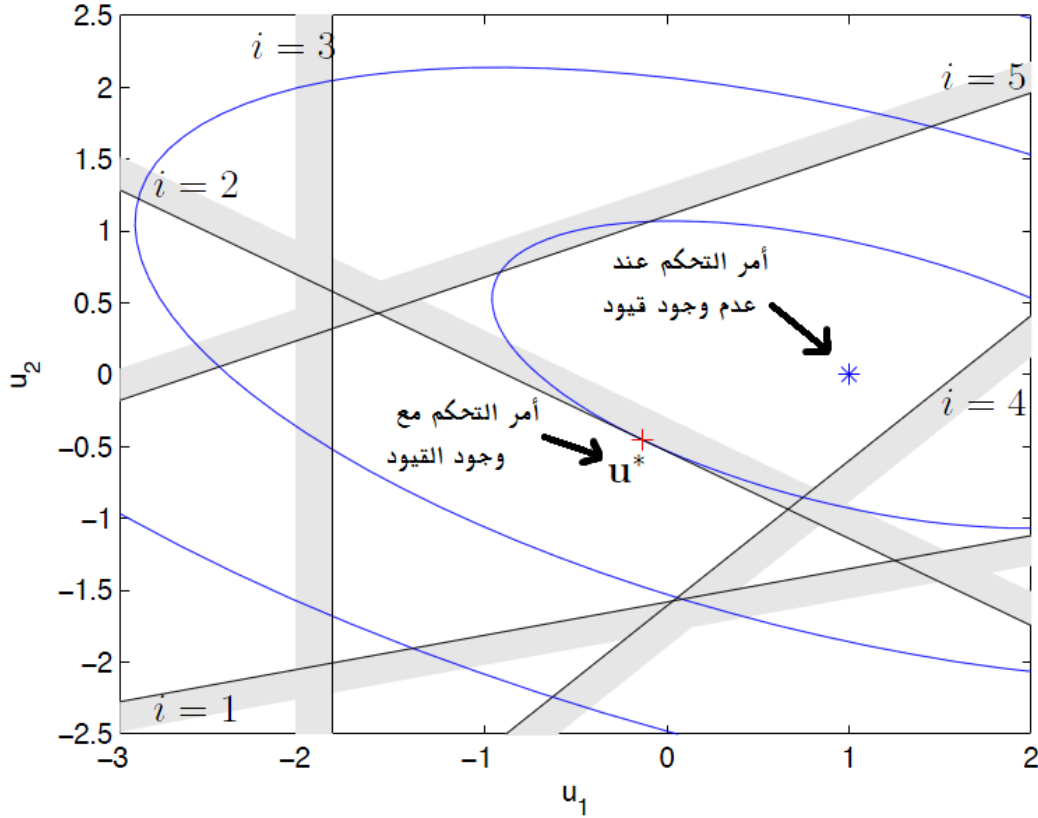
إن حل مشكلة الأمثلية في هذه الحالة يعتمد على تضمين القيود [2-63] ضمن تابع الكلفة المعتمد، وفي حالة التابع [2-49] مثلاً فإن هذه العملية يمكن أن تلخص على الشكل:

$$\min_{\Delta u_{\rightarrow}} J = \|r_{\rightarrow} - H \Delta u_{\rightarrow} - P \hat{x}_k - L \cdot d\|_2^2 + \lambda \|\Delta u_{\rightarrow}\|_2^2 \quad s. t. C \Delta u_{\rightarrow} - d_k \leq 0 \quad [2-65]$$

يتم حل هذه المعادلة عن طريق خوارزميات تربيعية خاصة، ومن الشائع أن توضع طرق مخففة لحل هذا النوع من المعادلات حسب العملية الصناعية المرتبطة بها، إلا أنه توجد بشكل عام برامج تربيعية معيارية تقدم حلولاً مناسبة في معظم الحالات، منها البرنامج المرفق مع بيئة MATLAB البرمجية، ومنها طريقتنا Interior point QP algorithms و Active set algorithms. يوضح الشكل (2-5) طريقة عمل خوارزمية Active set في حالة وجود خمس قيود للنظام، ونلاحظ أن البرنامج التربيعي حدد أمر التحكم



الأمثل كأقرب نقطة للحل الأمثلي (بدون وجود قيود)، بعد أخذ هذه القيود بعين الاعتبار<sup>1</sup>. يمكن التوسع في هذا الموضوع بالعودة إلى [5] و [8].



الشكل 5-2 خوارزمية Active set

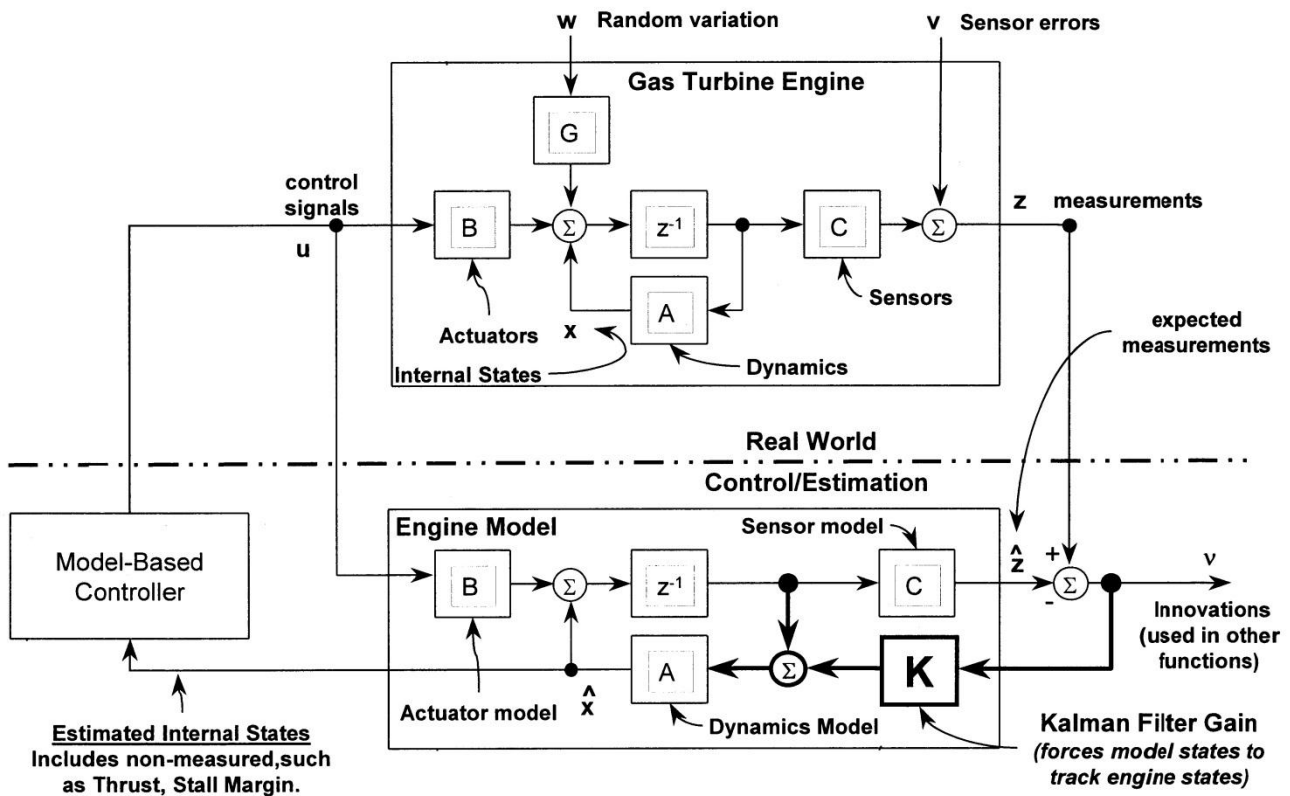
في هذا البحث سنعمد لحل مشكلة الأمثلية عند وجود قيود على النظام على البرنامج التريبي الموجود ضمن بيئة MATLAB، والذي يعطي حلولاً لأنظمة ذات أكثر من عشر درجات حرية بزمن صغير نسبياً.

<sup>1</sup> في الواقع تقوم هذه الطريقة تحديداً بتحويل المترجمات إلى معادلات خطية، ثم تختبر كل مساواة حتى الحصول على أمر التحكم المناسب، والمساواة التي تحقق هذا الأمر تدعى بالمجموعة الفعالة Active set algorithms وهو ما أعطى الخوارزمية اسمها.

## الفصل الثالث

# تصميم متحكم تنبؤي لحركة قيار مسير

## DESIGNING A MODEL PREDICTIVE CONTROLLER OF A DC MOTOR



## تصميم متحكم تنبؤي لمحرك تيار مستمر

### DESIGNING A MODEL PREDICTIVE CONTROLLER OF A DC MOTOR

#### 1-3 مقدمة:

بعد أن عرضنا في الفصل السابق الأسس الرياضية لبناء المتحكمات التنبؤية، وقمنا باشتقاق قانون التحكم حسب تابع الكلفة المعتمد، سنقوم في هذا الفصل بتصميم المتحكم التنبؤي عملياً بهدف التحكم بسرعة وتيار محرك مستمر ذي تهيج مستقل.

إن العمل على تصميم نظام التحكم في هذا البحث قد تم على عدة مراحل نوجزها بما يلي:

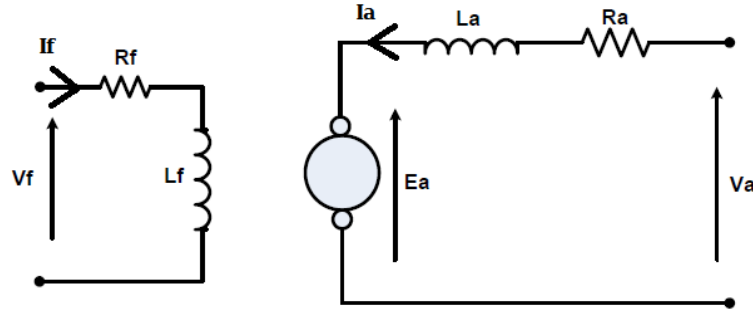
- بناء نموذج للمحرك المستمر لاختبار أداء المتحكم عليه.
- تصميم متحكم تناسبي تكاملي PI للمحرك بهدف إجراء المقارنة بين أداء كل من المتحكمين.
- تصميم المتحكم التنبؤي كبرنامج ثم تضمين هذا البرنامج ضمن بيئة MATLAB/Simulink وذلك إما بشكل مستمر باستخدام مكتبات MATLAB-MPC، أو بشكل منقطع باستخدام مكتبة JMPC.
- اختبار المتحكم ضمن ظروف عمل مختلفة بهدف بيان قوة أدائه وحصانته.

فيما يأتي سنعرض بالتفصيل خطوات العمل التصميمية السابقة لنحصل في نهايتها على المتحكم التنبؤي المطلوب.

#### 2-3 نمذجة محرك التيار المستمر:

تعطى الدارة المكافئة لمحرك تيار مستمر ذي تهيج مستقل كما في الشكل (1-3). وبتطبيق قانون كيرشوف على دارة المتحرض نجد أن:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad [3-1]$$



الشكل 1-3 الدارة المكافئة للمحرك المستمر ذو التهيج المستقل

حيث:

$$E_a = C_m \cdot \Phi \cdot \omega \quad [3-2]$$

بالتعويض في المعادلة [3-1]:

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a = V_a - E_a \quad [3-3]$$

وبإجراء تحويل لابلاس على [3-3]:

$$(L_a \cdot S + R_a) I_a = V_a - E_a \quad [3-4]$$

ومنه نجد تابع النقل للقسم الكهربائي للمحرك:

$$\frac{I_a}{V_a - E_a} = \frac{1}{L_a \cdot S + R_a} \quad [3-5]$$

أما القسم الميكانيكي فتعبر عنه معادلة نيوتن التالية:

$$J \dot{\omega}_m = T_{em} - T_L \quad [3-6]$$

حيث:

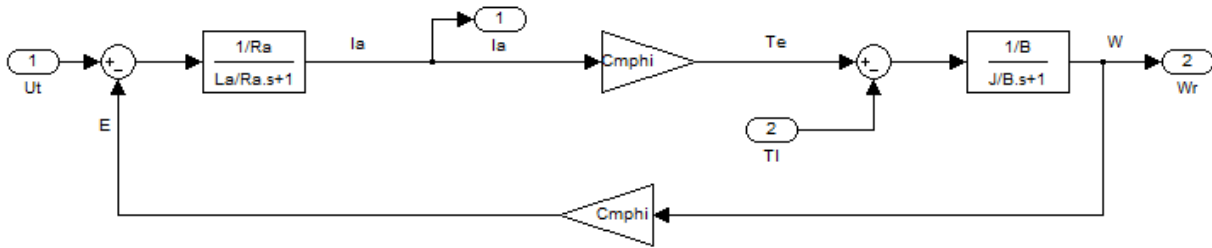
$$T_L = T_d + B \cdot \omega_m \quad [3-7]$$

حيث يمثل  $T_d$  العزم الجاف، و  $B$  ثابت الاحتكاك، وكلاهما يكونان عزم الحمولة  $T_L$ .

بإجراء تحويل لابلاس كما سبق نجد تابع النقل للقسم الميكانيكي للمحرك والذي يعطى على الشكل:

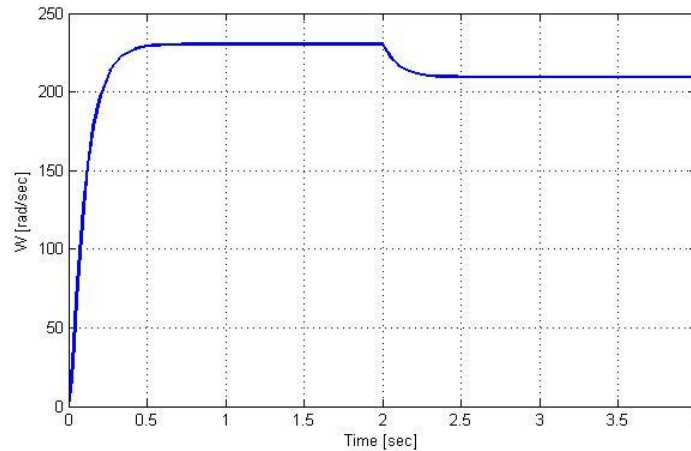
$$\frac{\omega_m}{T_{em} - T_d} = \frac{1}{J \cdot s + B} \quad [3-8]$$

وبتمثيل المعادلات السابقة ضمن بيئة MATLAB/Simulink نحصل على نموذج محرك تيار المستمر ذي التهيج المستقل، والمبين في الشكل (2-3).

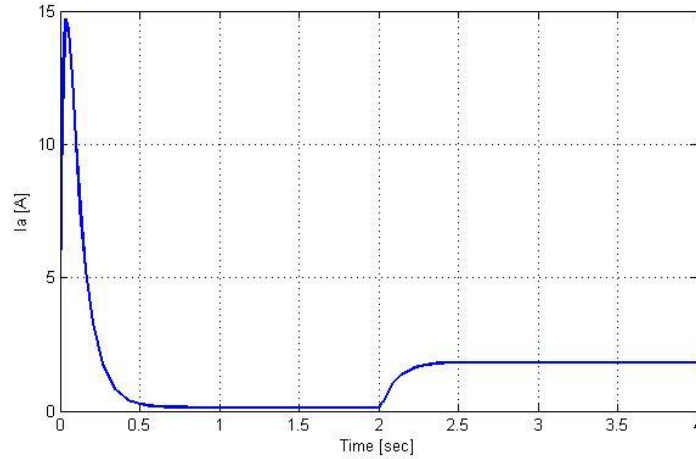


الشكل 2-3 تمثيل المحرك المستمر في بيئة MATLAB/Simulink

وباختبار المحرك بتطبيق الجهد والحمولة الإسميين تنتج إشارات السرعة والتيار الموضحة بالأشكال (3-3) و (4-3).



الشكل 3-3 استجابة السرعة للمحرك المستمر



الشكل 3-4 استجابة التيار للمحرك المستمر

### 3-3 تصميم متحكم تناسبي تكاملي للمحرك:

يعطى تابع النقل للمحرك على الشكل التالي:

$$\frac{\omega_m}{V_a} = \frac{K/J.La}{s^2 + \frac{J.Ra+B.La}{J.La}.s + \frac{Ra.B+K^2}{J.La}} \quad [3-9]$$

حيث:

$$K = C_m \cdot \Phi$$

نقوم بتنظيم سرعة وتيار المحرك بمنظمتين تناسبيتين تكامليتين، الأول ينظم التيار نحذف فيه مع صفر المنظم قطب حلقة التيار الداخلية. والثاني ينظم السرعة، وفيه سنحذف أولاً القطب البطيء مع صفر المنظم، ولتجنب مشاكل هذه الطريقة سنعمد ثانياً إلى تنظيم السرعة بمنظم P-PI يعمل فيه المنظم التناسبي على دمج القطبين معاً، ثم يقوم المنظم PI بحذف أحد هذين القطبين.

بإضافة منظم PI لحلقة التيار بالثوابت  $K_{P-I}$  و  $K_{I-I}$  يصبح تابع نقلها على الشكل:

$$\frac{I_a}{I_{a\_ref}} = \frac{K_{P-I}/L_a}{s + K_{P-I}/L_a} \quad [3-10]$$

حيث:

$$\frac{K_{I-I}}{K_{P-I}} = \frac{R_a}{L_a}$$

نضيف الآن منظم السرعة بالثوابت  $K_{P-\omega}$  و  $K_{I-\omega}$ ، ونحذف القطب البطيء (الميكانيكي) مع صفر المنظم ليصبح تابع النقل على الشكل:

$$\frac{\omega_m}{\omega_{m\_ref}} = \frac{\frac{K.K_{P-\omega}.K_{P-I}}{J.L_a}}{s^2 + \frac{K_{P-I}}{L_a}.s + \frac{K.K_{P-\omega}.K_{P-I}}{J.L_a}} \quad [3-11]$$

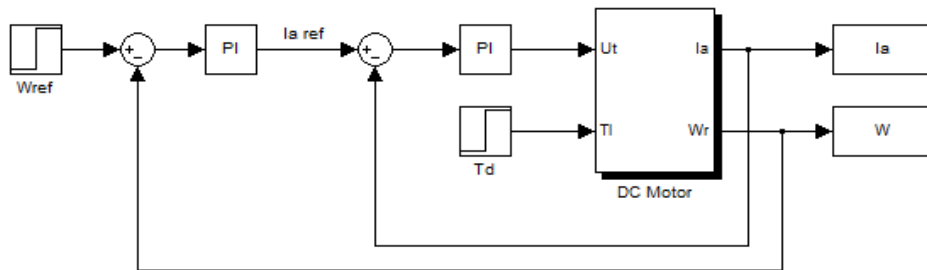
ومنه نحسب قيم الثوابت  $K_{P-\omega}$  و  $K_{I-\omega}$  حيث:

$$\omega_n = \frac{K_{P-I}}{2.L_a.\xi} \quad ; \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad [3-12]$$

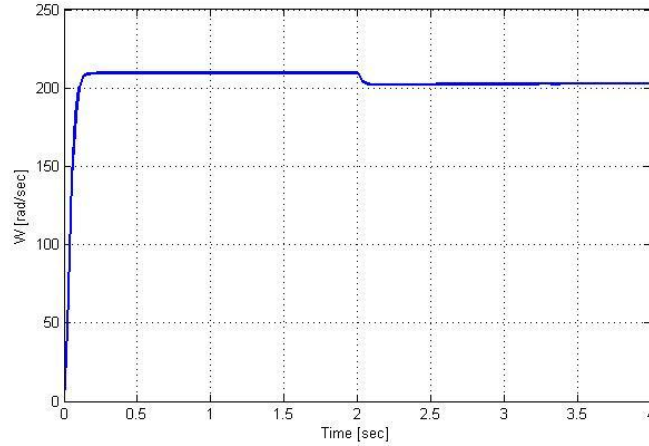
$$K_{P-\omega} = \frac{J.L_a.\omega_n^2}{K.K_{P-I}} \quad [3-13]$$

$$K_{I-\omega} = K_{P-\omega} \frac{B}{J} \quad [3-14]$$

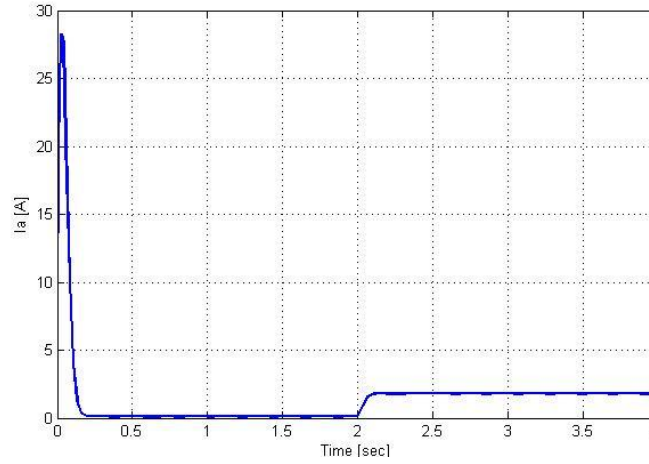
في هذه الحالة يصبح النظام كما هو موضح بالشكل (3-5). ونحصل على الاستجابات الموضحة بالأشكال (3-6) و (3-7) للسرعة والتيار.



الشكل 3-5 تنظيم السرعة والتيار بمنظمي PI



الشكل 6-3 استجابة السرعة مع حذف القطب البطيء



الشكل 7-3 استجابة التيار مع حذف القطب البطيء

ونلاحظ أن تعويض الخطأ الساكن بطيء في هذه الحالة لذلك نعلم إلى استخدام منظم PI للتيار و منظم P-PI للسرعة للحصول على سرعة استجابة مقبولة وتعويض خطأ ساكن مقبول.

في هذه الحالة تكون معادلة النظام بعد تنظيم التيار وإضافة المنظم P وبدون حذف أي من القطبين بالشكل:

$$\frac{\omega_m}{\omega_{m\_ref}} = \frac{\frac{K.K_v.K_{P-I}}{J.La}}{S^2 + (\frac{K_{P-I} + B}{La} + \frac{1}{J}).S + \frac{K_{P-I}.B + K.K_v.K_{P-I}}{J.La}} \quad [3-15]$$

ومنه نحسب قيمة الثابت  $K_v$  حيث:



$$\omega_{n1} = \frac{J.K_{P-I}+B.La}{2.J.La} \quad ; \quad \xi = 1 \quad [3-16]$$

$$K_v = \frac{\omega_{n1}^2.J.La-K_{P-I}.f}{K_{P-I}.K} \quad [3-17]$$

الآن لنحسب قيم الثوابت  $K_{P-\omega}$  و  $K_{I-\omega}$  بعد إضافة المنظم PI حيث تصبح معادلة النظام:

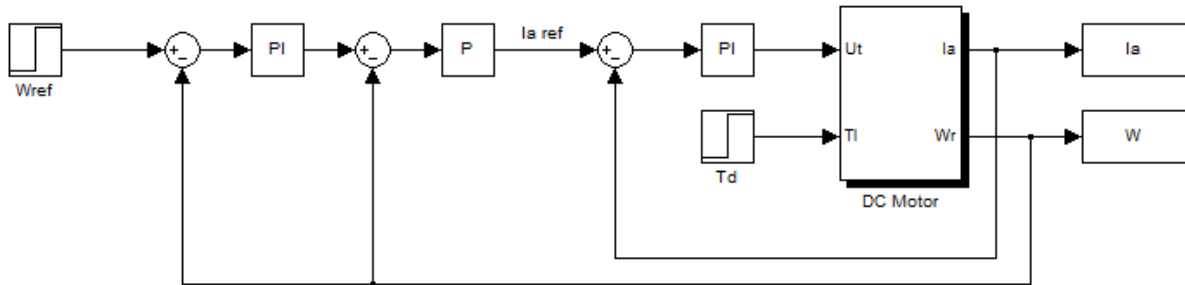
$$\frac{\omega_m}{\omega_{m-ref}} = \frac{\frac{K.K_v.K_{P-I}.K_{P-\omega}}{J.La}}{S^2+P_1.S+\frac{K.K_v.K_{P-I}.K_{P-\omega}}{J.La}} \quad [3-18]$$

$$\omega_{n2} = \frac{P_1}{\sqrt{2}} \quad ; \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad [3-19]$$

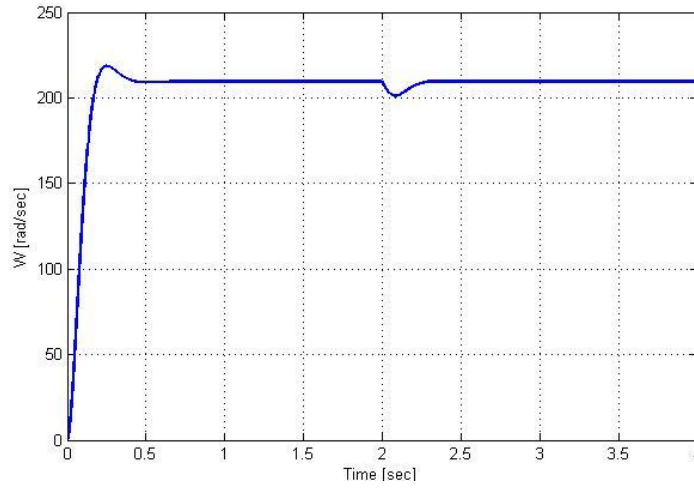
$$K_v = \frac{\omega_{n2}^2.J.La}{K.K_v.K_{P-I}} \quad [3-20]$$

$$K_{I-\omega} = K_{P-\omega}.P_2 \quad ; \quad P_2 = P_1 \quad [3-21]$$

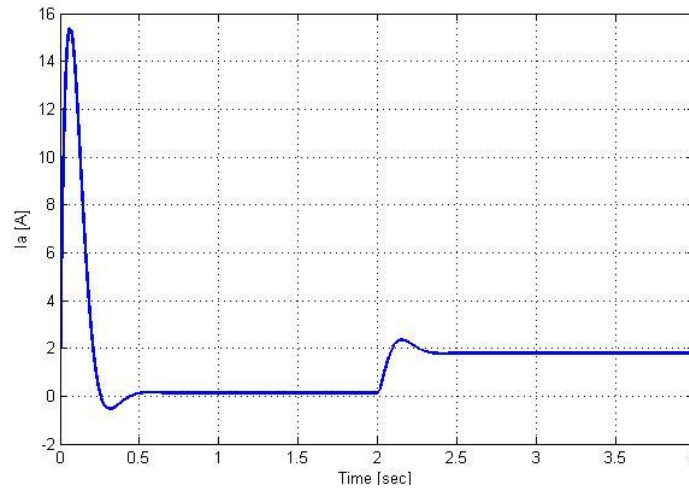
هنا يصبح النظام كما هو موضح بالشكل (8-3). ونحصل على الاستجابات الموضحة بالأشكال (9-3) و (10-3) للسرعة والتيار.



الشكل 8-3 تنظيم التيار بمنظم PI والسرعة بمنظم P-PI



الشكل 9-3 استجابة السرعة بمنظم P-PI



الشكل 10-3 استجابة السرعة بمنظم PI

### 3-4 تصميم المتحكم التنبؤي:

إن تصميم المتحكم التنبؤي هو تطبيق للخطوات النظرية التي تم شرحها بالتفصيل في الفصل السابق، ووضع برمجيات تساعد على تشكيل قانون التحكم النهائي الذي سيصار إلى تطبيقه على الجملة المتحكم بها. ويضاف إلى ذلك الاستعانة ببعض الأنظمة التي تزيد كفاءة المتحكم التنبؤي من قبيل مرشحات Kalman والمخمنات بشكل عام، بهدف تقليل الخطأ الناتج عن عدم التطابق بين الجملة المتحكم بها وبين نموذجها الرياضي داخل المتحكم.

فيما يأتي سنوضح طريقة الحصول على أمر التحكم [2-52] باستخدام بعض النصوص البرمجية التي تستفيد من خواص المصفوفات المشكلة لقانون التحكم في بنائها بشكل تدريجي.

### 3-4-1 تشكيل نموذج معادلات الحالة الموسع:

تعطى معادلات المحرك المستمر في فضاء متحولات الحالة وضمن بيئة MATLAB/Simulink بالشكل التالي:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_c &= [-R_a/L_a, -C_m\phi/L_a ; C_m\phi/J, -B/J]; \\ \mathbf{B}_c &= [1/L_a \ 0; 0 \ -T_L/J]; \\ \mathbf{C}_c &= [1 \ 0; 0 \ 1]; \\ \mathbf{D}_c &= [0 \ 0; 0 \ 0]; \end{aligned}$$

لتحويل هذا النموذج إلى الشكل الموسع [2-48] ننتقل إلى الفضاء المتقطع ونطبق الخوارزمية التالية:

$$\begin{aligned} [\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p, \mathbf{C}_p, \mathbf{D}_p] &= c2d(\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c, ts); \\ [m_1, n_1] &= \text{size}(\mathbf{C}_p); \\ [n_1, n_{in}] &= \text{size}(\mathbf{B}_p); \\ \mathbf{A}_e &= \text{eye}(n_1+m_1, n_1+m_1); \\ \mathbf{A}_e(1:n_1, 1:n_1) &= \mathbf{A}_p; \\ \mathbf{A}_e(n_1+1:n_1+m_1, 1:n_1) &= \mathbf{C}_p * \mathbf{A}_p; \\ \mathbf{B}_e &= \text{zeros}(n_1+m_1, n_{in}); \\ \mathbf{B}_e(1:n_1, :) &= \mathbf{B}_p; \\ \mathbf{B}_e(n_1+1:n_1+m_1, :) &= \mathbf{C}_p * \mathbf{B}_p; \\ \mathbf{C}_e &= \text{zeros}(m_1, n_1+m_1); \end{aligned}$$

**C\_e(:,n1+1:n1+m1)=eye(m1,m1);**

حيث **A\_e** و **B\_e** و **C\_e** هي مصفوفات متحولات الحالة والدخل والخرج على التوالي للنموذج الموسع.

### 3-4-2 إجراء عملية التنبؤ والحساب الأمثلي لتابع الكلفة:

إن إجراء عملية التنبؤ [2-23] يعتمد بشكل أساسي على إيجاد المصفوفتين  $P$  و  $H$  والمعرفتين في العلاقة [2-22]، مع تذكر أننا هنا نعتمد على تغيرات أمر التحكم وليس على قيمته المباشرة، الأمر الذي يعني أن نأخذ بعين الاعتبار العلاقة [2-40] تجنباً لزيادة حجم العمليات الحسابية دون فائدة.

وبمجرد الحصول على هاتين المصفوفتين نستطيع البدء في حساب تابع الكلفة [2-49] لإجراء عملية الأمثلة عليه. وهو ما يقودنا إلى أمر التحكم النهائي [2-52] الذي يعبر عن أول قيمة من شعاع أمر التحكم ذي الطول  $n_u$ .

إن من العناصر المهمة في حساب أمر التحكم تحديد المسار المرجعي للجملة المراد التحكم بها، وبما أنه لدينا أمر تحكم يحسب لعدة خطوات مستقبلية، فإن هذا المسار يتخذ شكل مصفوفة  $R_S$  تعطى بالعلاقة:

$$R_S = \underbrace{[1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T}_{N_u} \cdot r(k) \quad [3-1]$$

حيث:

$$\overline{R_S} = \underbrace{[1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T}_{N_u} \quad [3-2]$$

ونلاحظ من أمر التحكم وجود عدة نواتج ضرب للمصفوفات السابقة، في الواقع إن خصائص هذه المصفوفات المميزة مكنت من إيجاد طرق رياضية لصياغتها ومضاربيها برمجيّاً بشكل فعال و بسيط، كثير من هذه الطرق موضح في [6]. وعليه نستطيع كتابة النص البرمجي لحساب عناصر أمر التحكم المطلوب:

```
n=n1+m1;
h(1,:)=C_e;
P(1,:)=C_e*A_e;
for k=2:Nu
  h(k,:)=h(k-1,:)*A_e;
```

```

P(k,:)= F(k-1,:)*A_e;
end
v=h*B_e;
H=zeros(Nu,Ny); % Declare the dimension of H
H(:,1)=v; % First column of H
for i=2:Ny
    H(:,i)=[zeros(i-1,1);v(1:Nu-i+1,1)]; % Toeplitz matrix
end
BarRs=ones(Nu,1);
H_H= H'*H;
H_P= H'*P;
H_R=H'*BarRs;

```

وعندها يعطى أمر التحكم بالشكل:

```

DeltaU=inv(H_H+Lambda*eye(Nu,Nu))*(H_R*r(k)-H_P*X(k));
deltau=DeltaU(1,1); % First element of the control law

```

### 3-4-3 نظام الحلقة المغلقة:

نلاحظ في أمر التحكم حدين أساسيين، الأول مرتبط بالقيمة المرجعية المطلوبة، والثاني متعلق بالتغذية العكسية لمتحولات الحالة. الآن لتطبيق فكرة الأفق المنسحب علينا أن نجري حسابات أمر التحكم الأمثل في كل لحظة من الزمن المستمر أو المتقطع. وللقيام بذلك نحدد أولاً طول الزمن الذي تجري ضمنه عملية المحاكاة<sup>1</sup>، والقيم الابتدائية لمختلف عناصر نظام التحكم، ثم ندخل أمر التحكم ضمن حلقة تكرارية لحساب قيمته مع كل لحظة زمنية. النص البرمجي التالي يوضح هذه العملية:

```

[n,n_in]=size(B_e);
xm=[0;0]; % Initial value of state variables
Xf=zeros(n,1); % Initial value of state feedback
N_sim=200; % Number of simulation samples
r=ones(N_sim,1)*209.4; % Set point (here of speed)
u=0; % u(k-1) =0

```

<sup>1</sup> في أنظمة الزمن الحقيقي يكون الزمن غير محدد وتكرر العملية طالما أن نظام التحكم قيد التشغيل.

```

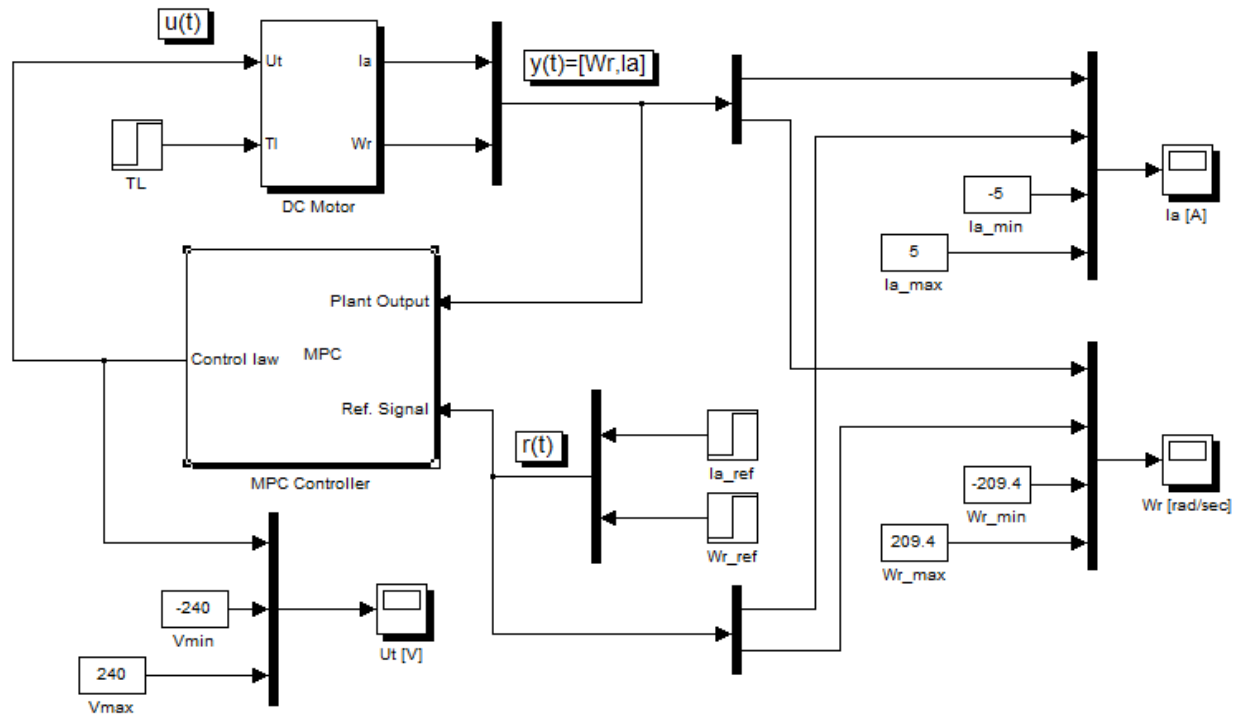
y=0;
for k=1:N_sim;
    DeltaU=inv(H_H+Lambda*eye(Nu,Nu))*(H_R*r(k)-H_P*Xf);
    deltau=DeltaU(1,1);
    u=u+deltau;
    u1(k)=u;
    y1(k)=y;
    xm_old=xm;
    xm=Ap*xm+Bp*u;
    y=Cp*xm;
    Xf=[xm-xm_old;y];
end

```

وبعد أن تمكنا من الحصول على أمر التحكم لا بد من تطبيقه عملياً على الجملة المراد التحكم بها (والتي يتضمن المتحكم نموذجها الرياضي). في هذا البحث تم العمل على نوعين من مكتبات التحكم التنبؤ في بيئة MATLAB/Simulink، الأول يتعامل مع الأنظمة المستمرة وهو متضمن في البيئة البرمجية، والثاني يتعامل مع الأنظمة المتقطعة و قد تم تطويره من قبل الباحث Jonathan Currie في جامعة أوكلاند في نيوزيلاندا.

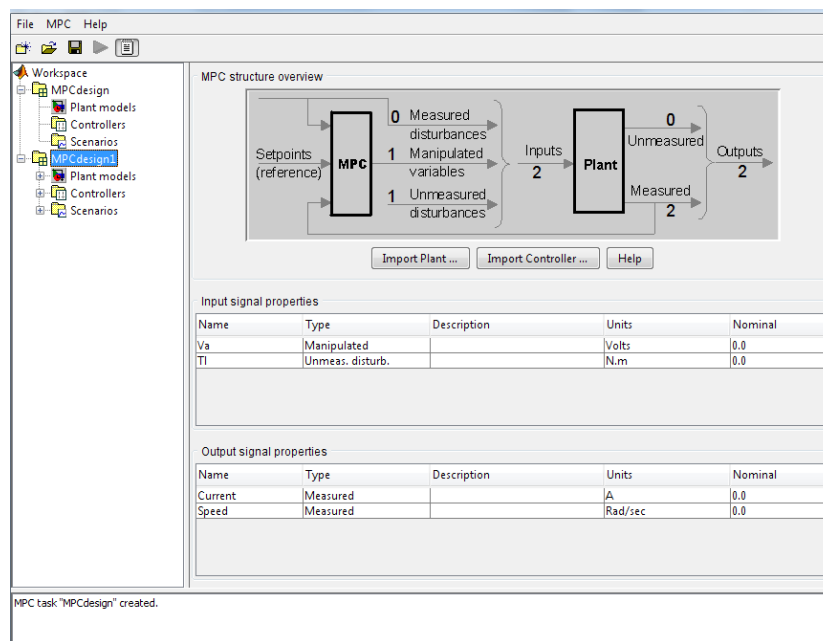
سنعرض فيما يأتي النظام الكامل الذي تتم بناؤه ضمن بيئة MATLAB/Simulink باستخدام الأداة البرمجية MPC TOOL من مكتبة Model Predictive Control، لإيضاح أجزاء هذا النظام قبل أن نقوم بعرض النتائج التي حصلنا عليها من خلاله ضمن فصل النتائج والمناقشة. يبين الشكل (3-1) البنية العامة لهذا النظام.

تقدم MPC TOOL إمكانيات واسعة التعامل مع أنظمة متعددة المداخل والمخارج، وبعد نقطة في صالحها قدرتها على التعامل مع طيف واسع من الاضطرابات الداخلية والخارجية التي يمكن أن تأخذ شكل قيم ثابتة أو شكل توابع ضجيجية يحددها المستخدم. كما يستطيع المستخدم أيضاً الاستفادة من توابع المكتبة نفسها في إضافة أجزاء تكميلية لمتحكمه من مخمنات ومرشحات وغير ذلك، ليتمكن بهذا من بناء متحكم يعمل بالخوارزمية التي يقررها وبدرجة القوة والحصانة التي تتناسب مع تطبيقه.



الشكل 1-3 نظام التحكم باستخدام المتحكم التنبؤي

تولد أداة التحكم التنبؤي ملفاً بلغة C مبنياً على المعطيات التي يحددها المستثمر ضمن واجهة المستخدم المبينة في الشكل (2-3).



الشكل 2-3 الواجهة الرسومية للأداة MPC TOOL

ويتم حقن الملف ضمن صندوق المتحكم في بيئة Simulink بعد أن يُصدَّر إلى نافذة الأوامر الرئيسية، ثم يربط مع باقي عناصر نظام التحكم المبين سابقاً، والذي يتألف بشكل أساسي من المكونات التالية:

- الجملة المراد التحكم بها وهي هنا محرك التيار المستمر.
- الإشارات المرجعية المطلوبة، وهي هنا السرعة والتيار المتحرض.
- عناصر الإظهار لكل من السرعة والتيار وأمر التحكم.

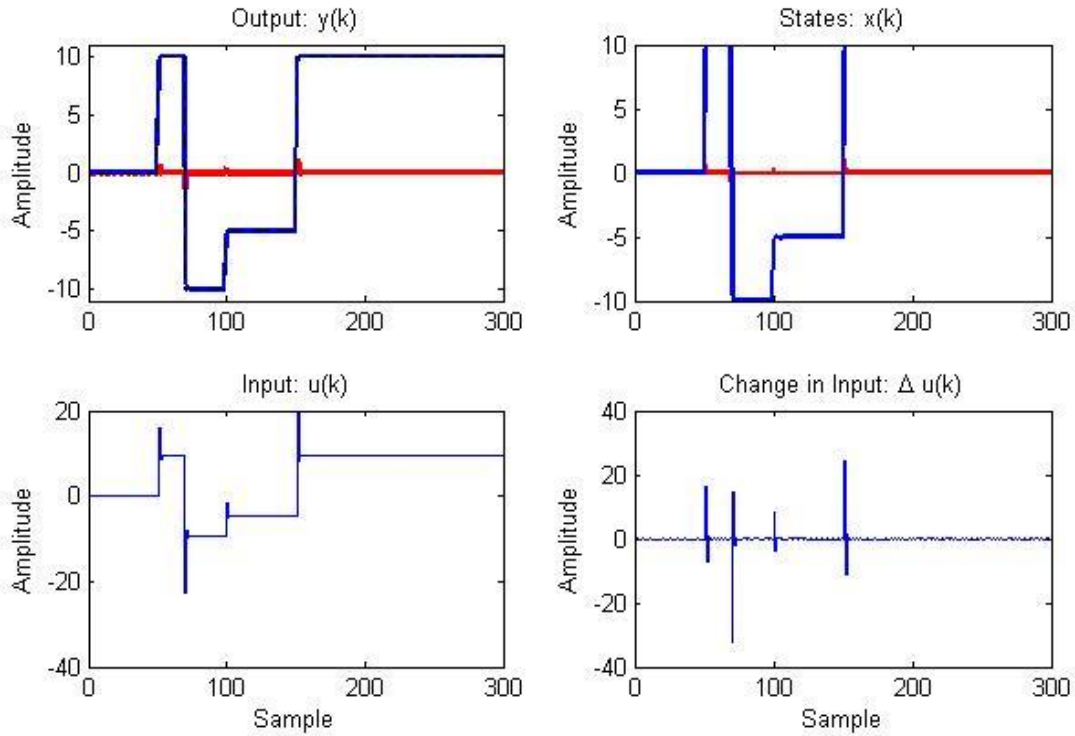
يجدر بالذكر أن كل عناصر المتحكم محتواة في برنامجه الذي يمثل الخوارزمية التي يعمل عليها المستخدم، وهذه العناصر تتضمن بشكل طبيعي قيود النظام ودرجة قساوتها، ومصفوفات الأوزان، والاضطرابات الخارجية والداخلية، وغيرها من المحددات الخاصة بالمتحكم من جهة وبالعملية الإنتاجية من جهة أخرى.



## الفصل الرابع

# النتائج العملية والمناقشة

## RESULTS AND DISCUSSION



## النتائج العملية والمناقشة

### RESULTS AND DISCUSSION

#### 1-4 مقدمة:

في هذا الفصل سنعرض النتائج العملية التي حصلنا عليها باستخدام المتحكم التنبؤي لتنظيم سرعة وتيار محرك التيار المستمر.

إن استجابة السرعة والتيار تعتمد بشكل كبير على عملية معايرة المتحكم، وعملية المعايرة تتم كما سبق ذكره عن طريق مصفوفات الأوزان لكل من المداخل والمخارج ومتحولات الحالة. في هذا البحث قمنا بتحديد هذه الأوزان على الشكل التالي:

- وزن صفري للدخل (الجهد) يعطي المتحكم حرية كاملة في التحكم بالاستجابة عن طريق تغيير قيمة هذا الدخل ضمن الحدود المسموحة.
- وزن الخرج الأول (السرعة) تم إعطاؤه القيمة الأكبر نسبياً (speed weight=10)، وذلك لحث المتحكم على إيصال السرعة إلى قيمتها الإسمية في أقصر وقت ممكن، حيث لا خشية من ارتفاع التيار مع أخذ قيود النظام بعين الاعتبار في معادلات المتحكم.
- وزن الخرج الثاني (التيار) أعطي قيمة صغيرة نسبياً (speed weight=0.1). للحصول على أفضل استجابة.

ضمن هذه الشروط نورد أشكال استجابات التيار والسرعة في حالات متعددة تغطي ظروف عمل المحرك المختلفة.

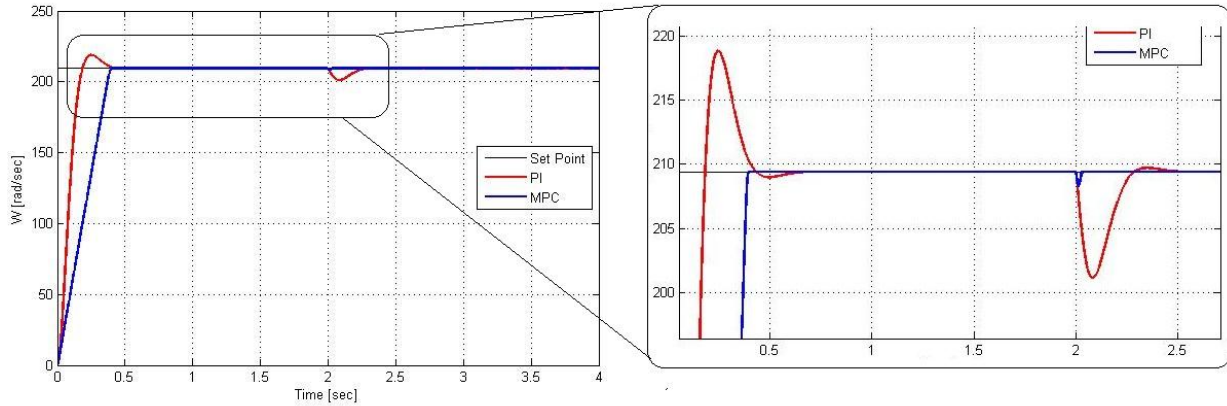
## 2-4 اختبار المتحكم التنبؤي:

## 1-2-4 اختبار أداء المتحكم عند السرعات العالية والمنخفضة:

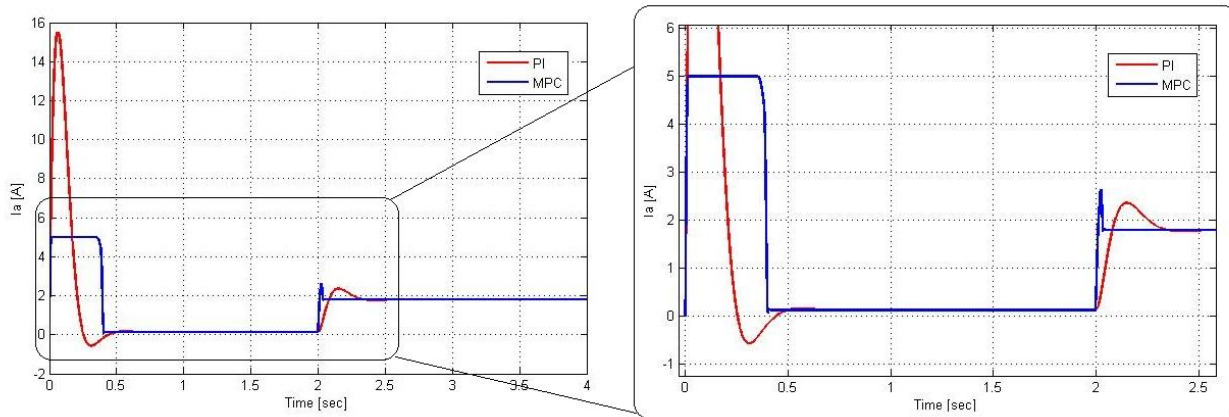
بعد معايرة المتحكم نحصل على الاستجابات التالية للسرعة والتيار، حيث تم تحميل المحرك بحمله الإسمي عند اللحظة (2)، وتم اختباره في حالتين:

## 1-1-2-4 عند السرعات العالية:

تطلب من المتحكم السرعة الإسمية للمحرك، مع التحميل كما سبق فنتج الإشارات الموضحة في الأشكال (1-4) و (2-4).



الشكل 1-4 استجابة السرعة

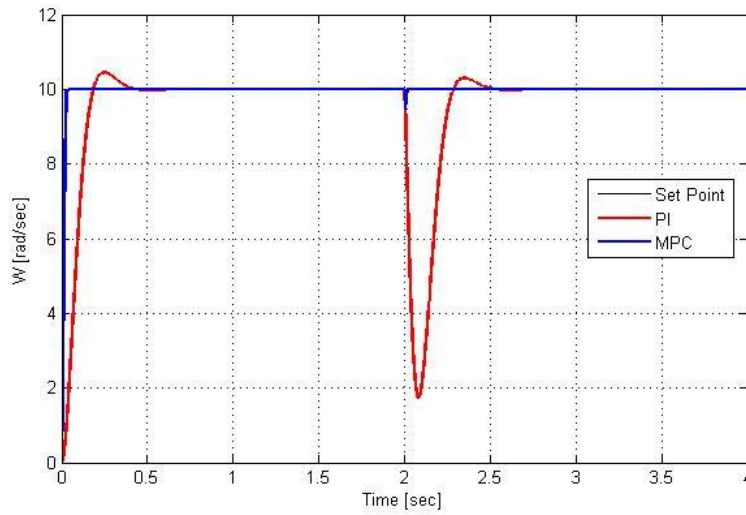


الشكل 2-4 استجابة التيار

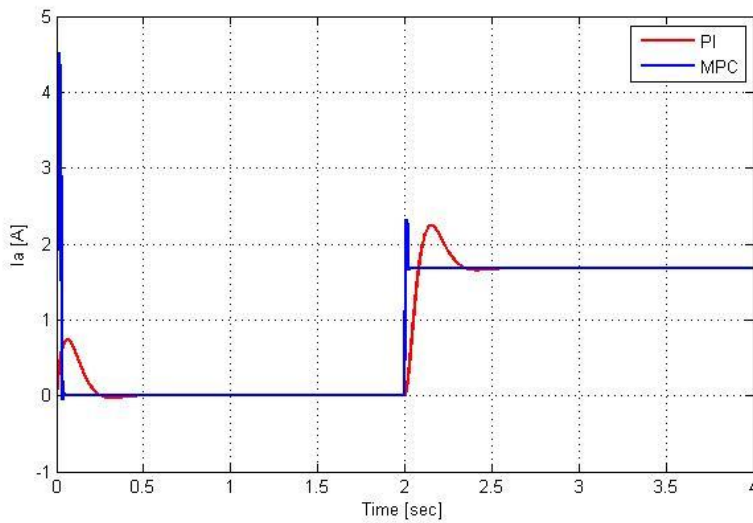
نلاحظ من استجابة التيار الأثر الهام لأخذ قيود النظام بعين الاعتبار ضمن خوارزمية المتحكم، فهنا تم تقييد النظام بقيمة للتيار (5A)، فلم يتجاوز التيار هذه القيمة دون أن يؤثر ذلك على سرعة الاستجابة.

#### 2-1-2-4 عند السرعات المنخفضة:

عند طلب سرعة مساوية إلى ( $w=10 \text{ rad/sec}$ )، نحصل على الاستجابات الموضحة بالأشكال (3-4) و (4-4).



الشكل 3-4 استجابة السرعة



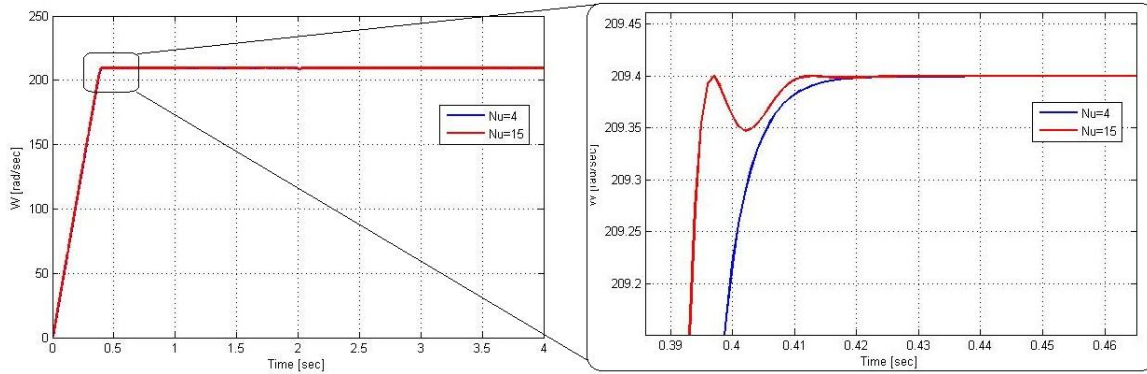
الشكل 4-4 استجابة التيار

ونلاحظ قوة المتحكم التنبؤي بالمقارنة مع المنظم التناسبي التكاملي، وسرعته في الاستجابة وتعويض الخطأ الساكن.

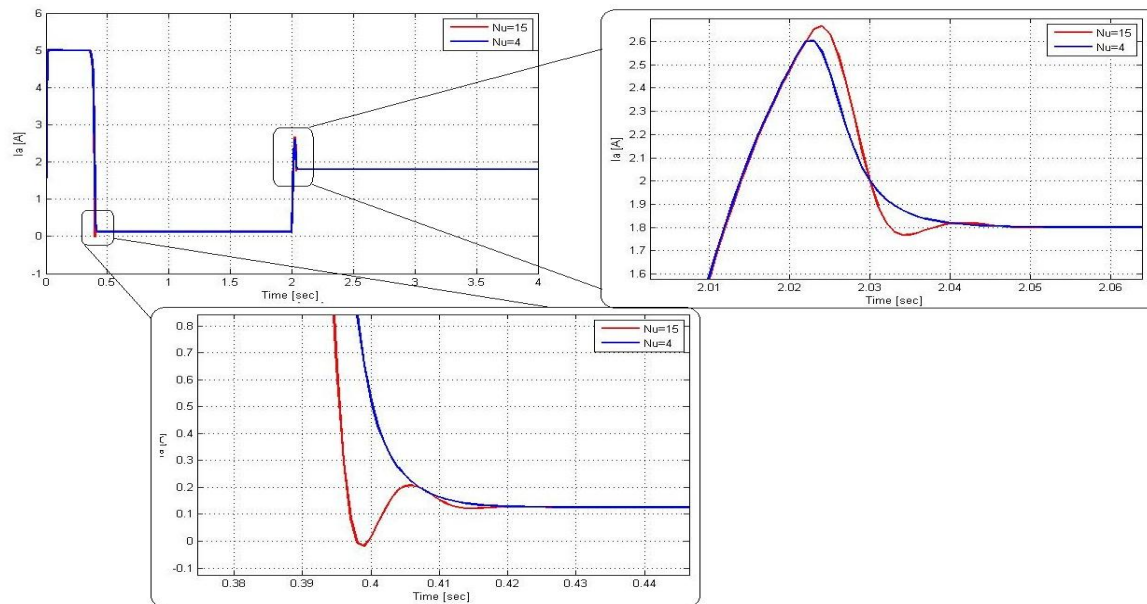
### 4-2-2 تأثير فضاءي التحكم والتنبؤ على استجابة نظام التحكم:

#### 4-2-2-1 أثر أفق التحكم:

أفق التحكم يعطي فكرة عن المجال الذي ينفذ ضمنه المتحكم حساباته الأمثلية. تم اختبار المتحكم عند عدة قيم لأفق التحكم فأعطى الاستجابات الموضحة بالأشكال (4-5) و (4-6).



الشكل 4-5 استجابة السرعة

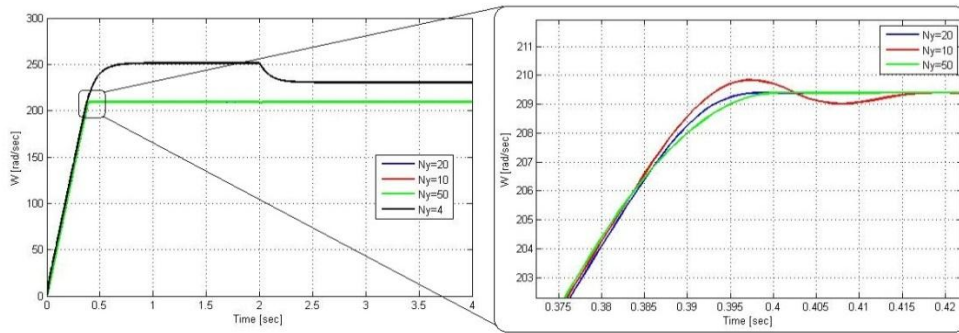


الشكل 4-6 استجابة التيار

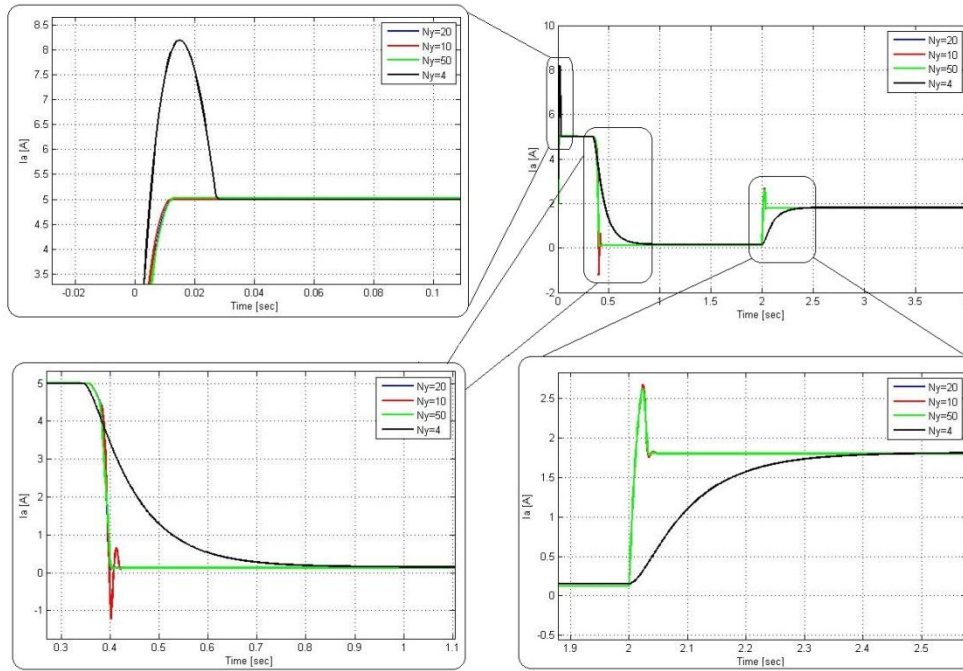
نلاحظ أن تأثير أفق التحكم بسيط طالما أن طوله كافٍ لحسابات استقرار النظام.

#### 2-2-2-4 أثر أفق التنبؤ:

يجب أن يكون أفق التنبؤ أطول من أفق التحكم. وفي حين أن قيمة كبيرة له ليست ذات تأثير مهم على استجابة النظام، إلا أنه إن كان أقل من أفق التحكم لما استطاع المتحكم الحصول على معلومات كافية لحسابات الأمثلية ضمنه. فيما يأتي استجابات التيار والسرعة لقيم مختلفة لأفق التنبؤ بالأشكال (4-7) و (4-8).



الشكل 7-4 استجابة السرعة



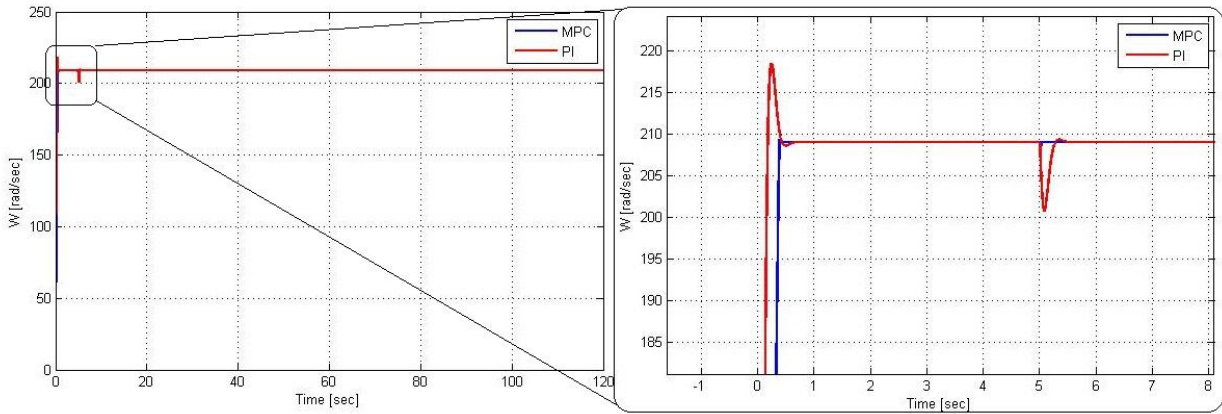
الشكل 8-4 استجابة التيار



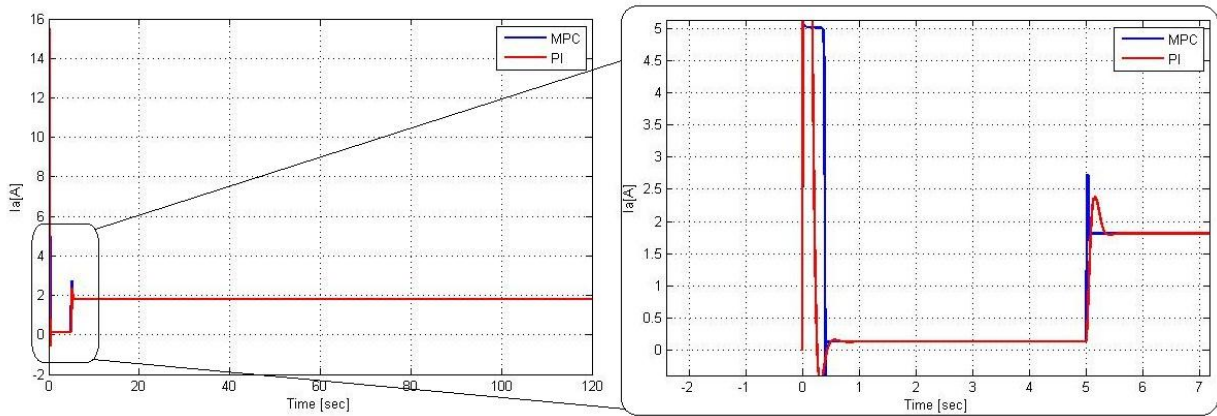
### 3-2-4 تأثير تغيير بارامترات المحرك على استجابة نظام التحكم:

#### 1-3-2-4 أثر تغيير مقاومة المتحرض $R_a$ :

لدراسة أثر تغيير مقاومة المتحرض مع الزمن بازدياد درجة حرارة الملفات، قمنا بزيادة قيمة المقاومة تدريجياً خلال مدة دقيقتين، وكانت استجابة النظام كما هو موضح بالأشكال (9-4) و (10-4).



الشكل 9-4 استجابة السرعة



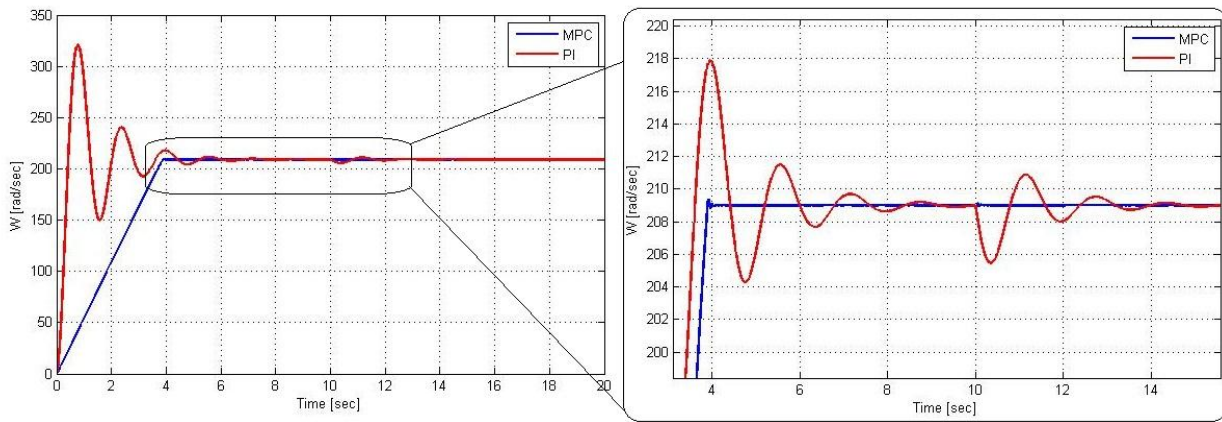
الشكل 10-4 استجابة التيار

حيث نلاحظ أن كلاً من المنظمين لم يتأثر كثيراً بالتغير التدريجي لمقاومة المتحرض.

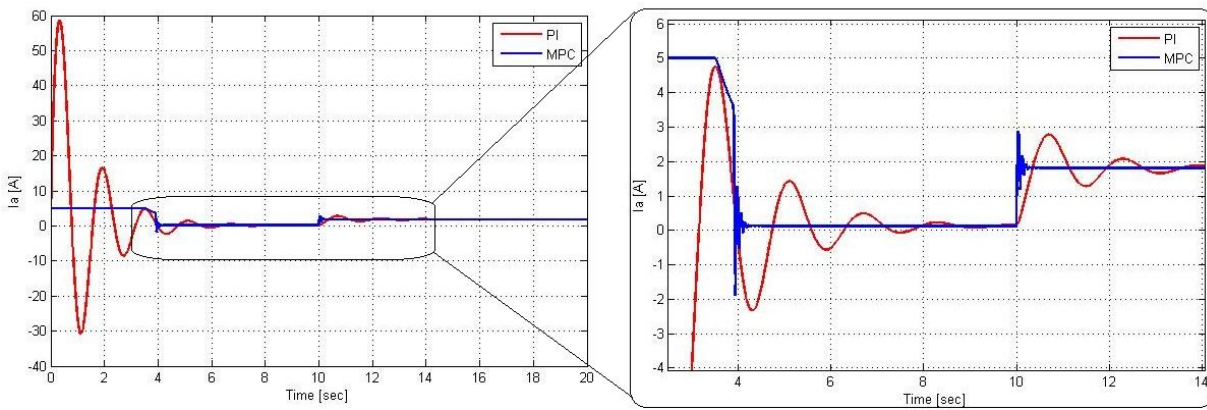
**2-3-2-4 أثر تغيير عزم عطالة المحرك J:**

قمنا بزيادة عزم عطالة المحرك إلى عشرة أضعاف، في الوقت الذي بقيت فيه بارامترات المحرك في النموذج الرياضي داخل المتحكم على حالها، ثم تم إنقاص هذا العزم إلى النصف دون تغيير النموذج أيضاً، وباختبار أثر هذين التغيرين كانت الاستجابات الموضحة بالأشكال (11-4) و (12-4) و (13-4) و (14-4).

**$J(\text{new})=10J$**  •



الشكل 11-4 استجابة السرعة

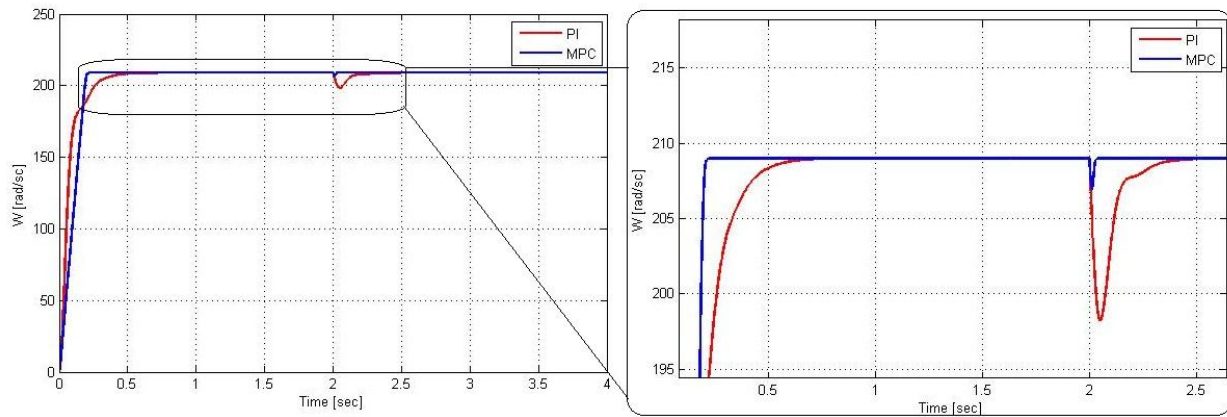


الشكل 12-4 استجابة التيار

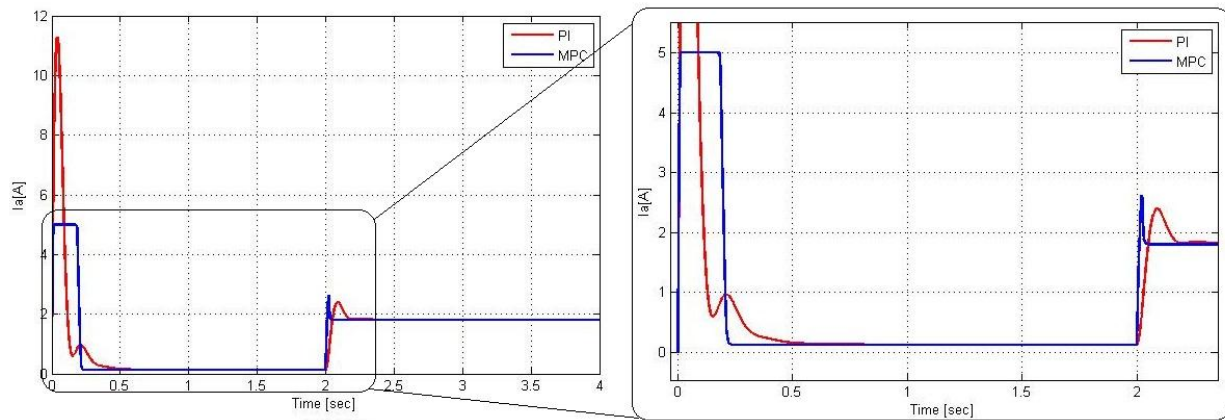


نلاحظ من الأشكال أن المتحكم التنبؤي أبدى حصانة كبيرة ضد تغيرات عزم عطالة المحرك، وكان تأثير الاختلاف بين النموذج والمحرك الحقيقي صغيراً نظراً لاعتماد مخمن داخل الخوارزمية قادر على إلغاء الخطأ الناتج عن عدم التوافق التام بين الجملة الحقيقية ونموذجها الرياضي.

**$J(\text{new})=0.5J$**  •



الشكل 13-4 استجابة السرعة

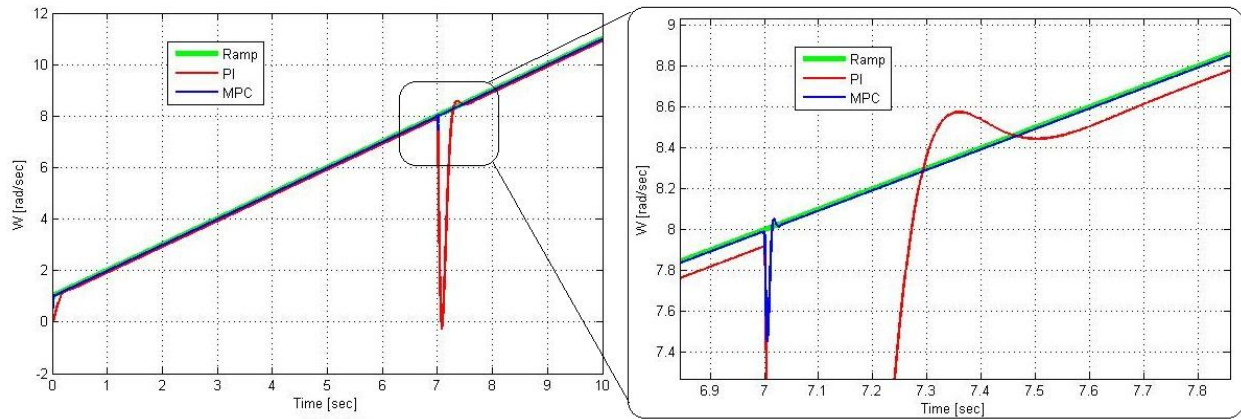


الشكل 14-4 استجابة التيار

## 4-2-4 الاستجابة لإشارة مرجعية متغيرة مع الزمن:

## 1-4-2-4 الاستجابة لإشارة مرجعية متزايدة:

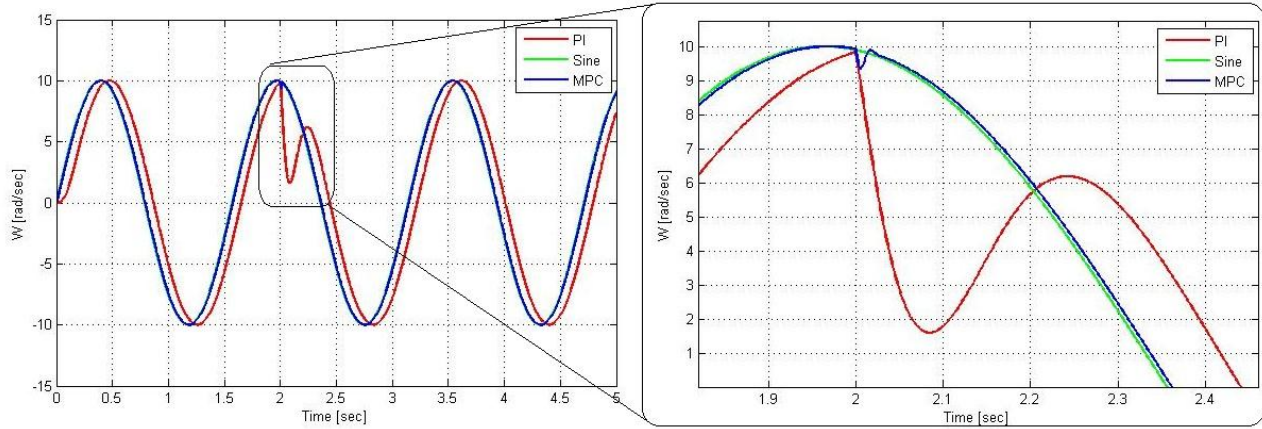
بزيادة الإشارة المرجعية تدريجياً نلاحظ أن المتحكم التنبؤي يقوم بملاحقتها بفعالية أكبر بكثير من المنظم التناسبي التكاملي. ونلاحظ سرعة إلغاء الخطأ الساكن التي يتمتع بها المتحكم التنبؤي نتيجة قيامه بعملية التنبؤ في كل لحظة زمنية، فهو يحاول توقع الخطأ حتى قبل حدوثه فعلياً. الشكل (4-15) يوضح استجابة النظام في هذه الحالة.



الشكل 4-15 استجابة السرعة لإشارة مرجعية متدرجة

## 2-4-2-4 الاستجابة لإشارة مرجعية جيبية:

بإدخال إشارة مرجعية جيبية للمتحكم التنبؤي نلاحظ انطباقاً شبه تام بين خرج النظام والإشارة المرجعية الجيبية، ويبين الشكل (4-16) استجابة السرعة لهذه الإشارة.



الشكل 17-4 استجابة السرعة لإشارة مرجعية جيبية

## الخاتمة والآفاق المستقبلية

في هذا البحث قدمنا مراجعة لتقنية التحكم التنبؤي المعتمد على النماذج الرياضية، وتم تطبيق هذه التقنية على محرك تيار مستمر بهدف اختبارها وبيان قوة متحكماتها.

إن التحكم التنبؤي من الأبحاث التي لاقت انتشاراً كبيراً في الآونة الأخيرة في أوساط الصناعيين نظراً لما تتميز به المتحكمات المبنية عليه من سرعة وقوة في الأداء من جهة، ومن جهة أخرى لقدرتها على إدماج قيود الأنظمة الصناعية في خوارزمية قانون التحكم. وقد كان هذا البحث تطبيقاً لأحد هذه المتحكمات، معتمداً على خوارزمية التحكم التنبؤي العامة Generalized Predictive Control، وموجهاً للتحكم بسرعة وتيار محرك مستمر ذي تهييج مستقل، لتأتي نتائجه على قدر كبير من قوة في الأداء والحصانة ضد تغيرات بارامترات النظام المتحكم به.

إن التزام المتحكم التنبؤي بقيود معينة لنظام التحكم هو من الأمور التي توفر على المستثمر تحديد قيم هذه القيود خارج المتحكم، وهو ما ينتج عنه تأخير مهم في سرعة الاستجابة. إضافة إلى ذلك نجد أن مفهوم التنبؤ قد مكن المتحكم من تلافي حدوث الخطأ بشكل استباقي، ولاحظنا من خلال البحث أن المسارات المرجعية التي يرسمها المتحكم التنبؤي تؤدي دوراً أكثر فاعلية بكثير من القيم المرجعية الفردية التي تحدها المتحكمات الأخرى، وهذا الأمر لم يكن ليتم لولا عملية تحديد أفقي التنبؤ والتحكم، وهما الذان ينظمان كمية المعلومات التي يستحصل عليها المتحكم من الجملة المتحكم بها، وكمية القرارات التي سيتخذها ويعتمدها مستقبلاً لإيصال الجملة إلى قيمها المرجعة المطلوبة. وتحديد هذين الأفقين هو من الميزات التي تفرقت بها تقنية التحكم التنبؤي عن غيرها من تقنيات التحكم السابقة أو حتى المعاصرة لها.

يعد التحكم التنبؤي من العلوم التي لاتزال قيد البحث والتطوير، ورغم أنها وجدت الكثير من التطبيقات الصناعية الناجحة، إلا أن الباحثين يطمحون إلى الارتقاء بها إلى مرحلة يمكن معها تطبيق التقنية على أي عملية إنتاجية بغض النظر عن وجود نموذج رياضي لها، ودون النظر إلى أزمنة التقطيع المطلوبة لعملها. وهذا الأمر يتم بربط التحكم التنبؤي مع تقنيات تحكم أخرى بحيث يتم دمج ميزات كل من هذه التقنيات

للحصول على قوة أكبر في التحكم وتنوع أكثر في الجمل التي يمكن أن يطبق عليها قانون التحكم الناتج دون أن يتأثر بطبيعة كل جملة على حدة.

لقد كان هدفنا من هذا البحث تقديم تقنية تحكم قوية وحديثة لم تتلحقها من الاهتمام في أوساط الأبحاث العربية اللغة. وقد حاولنا أن تكون لغة البحث ميسرة قدر المستطاع لفهم نواة التقنية وأسسها وتفصيلها قبل الولوج إلى معادلاتها وتعقيداتها الرياضية. ثم تم عرض هذه المعادلات بشكل متسلسل لبيان الأسس العملية لبناء متحكم تنبؤي بأبسط شكل ممكن، الأمر الذي يُمكن الطالب والباحث من وضع قدمه على بداية طريق التحكم التنبؤي، والانطلاق بجهد وعزيمته لسبر أغوار هذا العلم، والتبحر فيه حتى نيل مقصده والوصول لغايته. والأمل في نهاية هذا البحث أن نكون قد وفقنا إلى تقديم ما قد يغني المكتبة العربية ولو بمقدمة بسيطة عن تقنية مهمة من تقنيات التحكم المتقدم، والتي تنتظر مستقبلاً واعداً لما تطرحة من أفكار جديدة وحلول مبتكرة. والله ولي التوفيق.

## الآفاق المستقبلية

إن لتقنية التحكم التنبؤي مجالات واسعة للتطوير والبحث، من هذه المجالات التي نوصي بالتعمق في أبحاثها:

1. الانتقال من التحكم التنبؤي الخطي إلى التحكم اللاخطي وتطبيقه على المحرك المستمر أو على المحركات التحريضية.
2. إيجاد برمجيات جديدة لحل المشكلة التربيعية بحيث تكون معيارية وبأقل كلفة ممكنة، لتصبح برمجيات موحدة بين مختلف العمليات الصناعية.
3. الاستفادة من قيم شعاع قانون التحكم في إجراء تصحيح لبارامترات المتحكم في الزمن الحقيقي.
4. تقليل اعتماد المتحكم على النموذج الرياضي للجملة وذلك باعتماد خوارزميات تصحيح للخطأ بين خرج النموذج والجملة.
5. اعتماد تقنية التحكم الغامض في الاستعاضة عن النموذج الرياضي ضمن المتحكم، حيث أن ذلك سيعطي المتحكم قدرة أكبر على التعامل مع أنظمة قد يكون من الصعب إيجاد نماذج رياضية لها.
6. اعتماد الشبكات العصبونية وتقنيات الذكاء الصناعي في إجراء عملية التصحيح بين الجملة ونموذجها.

## المراجع

1. F. L. Lewis, “**Applied Optimal Control and Estimation**”, Prentice-Hall, 1992.
2. S. Joe Qin, Thomas A. Badgwell, “**A survey of industrial model predictive control technology**”, 2002.
3. Iino Yutaka, Koichi Abe, Yasuhisa Tsukamoto, “**Hierarchical Model Predictive Control applied to a Cement Raw Material Mixing Process**”, 2008.
4. E. F. Camacho, C. Bordons, “**Model Predictive Control**”, Springer, 1999.
5. J. M. Maicejowski, “**Predictive Control With Constraints**”, Prentice-Hall.
6. L. Wang, “**Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB**”, Springer, 2009.
7. J. A. ROSSITER, “**Model-Based Predictive Control**”, CRC Press, 2005.
8. M. Cannon, “**C4A Model Predictive Control**”, Course Lectures, 2010.
9. Michael Nikolaou, “**Model Predictive Controllers: A Critical Synthesis of Theory and Industrial Needs**”, University of Houston.
10. Ky M. Vu, “**ISO, MPC and PID: The Good, The Bad and The Ugly Discrete Controllers**”, AuLac Technologies Inc., 2008.
11. J.R. Raol, G. Giriya and J. Singh, “**Modelling and Parameter Estimation of Dynamic Systems**”, IET control engineering series.

12. جوخدار عبد القادر، "آلات التيار المستمر وتصميمها"، منشورات جامعة حلب، 2010.

13. نعلساني أحمد عمار، "أنظمة القيادة 1"، محاضرات، 2010.

14. <http://www.maorielectrical.com>

<a href="#">3-4-2 Prediction and Optimazation</a>	62
<a href="#">3-4-3 Closed Loop Performance</a>	63
<a href="#">Results and Discussion</a>	68
<a href="#">4-1 Introduction:</a>	68
<a href="#">4-2 MPC Performance</a>	69
<a href="#">4-2-1 Testing the Controller At Low and High Speed</a>	69
<a href="#">4-2-1-1 High Speed Performance</a>	69
<a href="#">4-2-1-1 Low Speed Performance</a>	70
<a href="#">4-2-2 Control and Prediction Horizons Effect</a>	71
<a href="#">4-2-2-1 Control Horizon Effect</a>	71
<a href="#">4-2-2-2 Prediction Horizon Effect</a>	72
<a href="#">4-2-3 Effect of Changing Motor Parameters</a>	73
<a href="#">4-2-3-1 Effect of Changing <math>R_a</math></a>	73
<a href="#">4-2-3-1 Effect of Changing the Momentum <math>J</math></a>	74
<a href="#">4-2-4 Testing a time varient SetPoint</a>	76
<a href="#">4-2-4-1 RampSet Point:</a>	76
<a href="#">4-2-4-2 Sine Set Point:</a>	76
<a href="#">Conclusion and Future Work</a>	78



2-3-2-1 Disturbance Model .....	29
2-3-2-2 Integral Action .....	29
2-3-2-3 General Rules for Choosing <b><math>T_z</math></b> .....	30
2-3-3 FIR Models .....	30
2-3-3-1 Impulse response .....	31
2-3-3-2 Step response .....	31
2-4 Prediction Procedure .....	32
General Prediction Structure .....	32
2-4-1 Prediction in State Space Models .....	33
2-4-2 Prediction with Transfer Functions .....	34
2-4-2-1 SISO CARIMA Model with <b><math>T_z = 1</math></b> .....	35
2-4-2-2 MIMO CARIMA Model with <b><math>T_z = 1</math></b> .....	37
2-5 Control Law Derivation .....	38
2-5-1 GPC Basic Components .....	38
2-5-1-1 Cost Function and Optimization .....	38
2-5-1-2 Effect of Control Horizon on Prediction .....	41
2-5-1-3 System Constraints .....	41
2-5-1-4 MIMO Systems .....	42
2-5-2 State Space Based Control Law .....	43
2-5-2-1 Augmented Model Control Law .....	44
2-6 Constraints Handling .....	47
2-6-1 Constraints Equations .....	47
2-6-1-1 Input Changes Constraints .....	47
2-6-1-2 Input Constraints .....	48
2-6-1-3 Output Constraints .....	49
2-6-2 Optimisation with Constraints .....	50
Designing a Predictive Controller Of a DC Motor.....	52
3-1 Introduction .....	53
3-2 DC Motor Model.....	53
3-3 PI Controller of a DC Motor .....	56
3-4 Model Predictive Controller .....	61
3-4-1 Augmented State Space Model .....	61

# CONTENTS

<a href="#">Introduction</a> .....	iv
<a href="#">Purpose of the Project</a> .....	vi
<a href="#">Contents</a> .....	viii
<a href="#">Sempol Guide</a> .....	xi
<a href="#">Introduction to Predictive Control</a> .....	1
<a href="#">1-1 Introduction</a> .....	2
<a href="#">1-2 Why MPC?</a> .....	2
<a href="#">1-2-1 First Step</a> .....	5
<a href="#">1-2-2 Second Step</a> .....	5
<a href="#">1-3 IDCOM Algorithm</a> .....	10
<a href="#">1-4 (DMC) Dynamic Matrix Control Algorithm</a> .....	12
<a href="#">1-6 (QDMC) Quadratic Dynamic Matrix Control Algorithm</a> .....	13
<a href="#">1-7 Predictive Functional Control Algorithm</a> .....	14
<a href="#">Model Predictive Controllers – GPC</a> .....	15
<a href="#">2-1 Intrduction</a> .....	16
<a href="#">2-2 Basic Concepts</a> .....	16
<a href="#">2-2-1 Depending on Prediction</a> .....	18
<a href="#">2-2-2 Model Based Prediction</a> .....	19
<a href="#">2-2-3 Choosing the Optimal Control Law</a> .....	19
<a href="#">2-2-4 Reseeding Horizon</a> .....	20
<a href="#">2-2-5 Safe Performance</a> .....	21
<a href="#">2-2-6 Tuning</a> .....	22
<a href="#">2-2-7 System Constraints</a> .....	22
<a href="#">2-3 Models Used Iin Predictive Control</a> .....	23
<a href="#">2-3-1 State Space Models</a> .....	25
<a href="#">2-3-1-1 Disturbance Model</a> .....	27
<a href="#">2-3-2 Transfer Function Models</a> .....	28

# ACKNOWLEDGMENT

This work was the result of a combination of efforts that have gathered to present all the details and results achieved.

I would like to thank all the people who helped me along the way to reach this point. Special thanks to my supervisor Dr. Abdulkader Joukhadar who was the source of many ideas in this research.

Also, I give special thanks to Mr. Jonathan Currie who was a great help to me, always answering my questions without hesitation.

# ABSTRACT

**M**PC is one of the most promising control techniques that has been developed and implemented along the past two decades. It has been widely used in many industrial plants and especially in chemical processes. Yet, theoretical analysis of this technique and its stability is still taking place until present. In this thesis, we present a review of model predictive control through its implementation on a DC motor. The generalized predictive control (GPC) algorithm is used to control motor's current and speed under constraints associated with each of them. A comparison between MPC and the conventional controllers represented by PID is present to reveal the advantages and disadvantages of this type of controllers.

**Keywords:** MPC, prediction, constrained optimization, DC motor control.

# **Model Predictive Control Of a DC Motor**

**A Thesis Presented In Partial Fulfillment of The Requirements For  
The Degree of Electrical Drive Engineer**

**By  
Hasan Abu-Rasheed**

**Supervisor  
Dr. Abdulkader Joukhadar**