



دراسة وتحليل التحكم في تردد الحمل في محطات الطاقة الكهرومائية



بحث تكميلي لنيل درجة البكالوريوس مرتبة الشرف في الهندسة الكهربائية

إعداد:

2031815882	اعتماد أحمد محمد سعيد
2031051598	محمد المصطفى عابدين على عثمان
2031043260	وعد يوسف بخيت بلال

إشراف:

أ/ مشاعر السر رباح



كلية الهندسة
جامعة الشيخ عبد الله البدري
إبريل - 2026



المستخلص

يهدف هذا المشروع إلى دراسة وتحليل تردد الحمل في المحطات الكهرومائية، باعتباره أحد المعايير الحيوية لاستقرار الشبكة الكهربائية وكفاءتها. تعتمد الدراسة على فهم العلاقة بين تغيرات الحمل وتذبذب التردد الناتج عنها، وكيفية تأثير هذه التغيرات على أداء المحطات وسلامة المعدات.

تم تحليل استجابة النظام في حالات مختلفة، بما في ذلك التشغيل دون متحكم والمتحكم بوسائل تقليدية بالإضافة إلى استخدام المتحكمات الذكية مثل التحكم الضبابي لتحسين استقرار التردد وتقليل التذبذبات.

أظهرت النتائج أن النظام دون متحكم يعاني من تذبذبات واضحة وزمن استقرار طويل عند حدوث تغير في الحمل، بينما ساهم إدخال أنظمة التحكم في تحسين استقرار التردد وتسريع الاستجابة الديناميكية للنظام. كما أظهرت المقارنة أن المتحكم الضبابي يقدم أعلى كفاءة في تحقيق استقرار التردد وأدق تحكم في التذبذبات مقارنة بالمتحكمات التقليدية .

يعتمد المشروع على استخدام أدوات المحاكاة وتحليل البيانات لمتابعة أداء المحطات الكهرومائية تحت سيناريوهات تحميل مختلفة، مما يتيح تقديم توصيات عملية لتحسين تصميم أنظمة التحكم وضمان استقرار الشبكة الكهربائية وزيادة موثوقية تشغيل المحطات.

Project Abstract

This project aims to study and analyze load frequency in hydroelectric power plants, as it is a critical parameter for grid stability and operational efficiency. The study focuses on understanding the relationship between load variations and the resulting frequency fluctuations, as well as their impact on plant performance and equipment safety.

The system response was analyzed under different scenarios, including operation without a controller, conventional PI control, and advanced fuzzy logic control to enhance frequency stability and minimize oscillations. The results indicated that the system without a controller experiences significant oscillations and a long settling time when subjected to load changes, whereas implementing control strategies improved frequency stability and accelerated the system's dynamic response. Comparatively, the fuzzy logic controller demonstrated the highest efficiency in maintaining frequency stability and providing precise control over oscillations.

The project relies on simulation tools and data analysis to evaluate hydroelectric plant performance under various loading scenarios, enabling practical recommendations for optimizing control system design, ensuring grid stability, and increasing plant reliability.

الآية

بسم الله الرحمن الرحيم

قال تعالى:

يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ ءَامَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ۚ

(المجادلة: 11)

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ
لِّأُولِي الْأَلْبَابِ ﴿١٩٠﴾

(آل عمران: 190)

الإهداء

إلى من علمني ان الإتقان في العمل عبادة والإجتهاد سر الوصول وإلى من كان دعاؤه شمعة
تضيء دروبنا المعتمدة

إلى الوالد الكريم صاحب القلب الكبير الذي زرع فينا بذور الطموح والصبر وإلى من علمنا أن
النجاح لا يصنع إلا بالصبر والسعي الدؤوب أهديه هذا الجهد عرفاناً بجميل لن يوفى حقه.

وإلى الأم العظيمة رمز العطاء والتضحية ومصدر الحنان الذي لا ينضب وإلى من كانت
ابتسامتها بلسماً يزيل كل التعب.

إلى إخوتي وأخواتي الذين ساندونا بكل ما هو ممكن حتى نحقق غاياتنا فكانوا السند والعون
المستمر.

إلى تلك الصداقات النبيلة التي تشاركت معنا مرارة الجهد وحلاوة الإنجاز وإلى كل زميل تقاسم
معانا هم الدراسة ولحظات الفخر.

إلى هؤلاء جميعاً نهدي ثمرة هذا المشوار وفرحة الحصاد راجين من الله أن يجعله في ميزان
حسناتهم.

الشكر والعرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات وبِعونه وتوفيقه تنجز الاعمال.

يسرنا ان نتقدم بجزيل الشكر والامتنان والتقدير الوافر الى من كان لها الفضل في توجيه هذا العمل الى بر الأمان

الأستاذة الفاضلة مشاعر السر التي قدمت لنا الدعم المتواصل والتوجيهات الدقيقة والنصائح القيمة التي كانت الأساس لإنجاز هذا العمل على أكمل وجه.

كما نتوجه بخالص الشكر الى جميع اعضاء هيئة التدريس على ما وفروه لنا من بيئة تعليمية محفزة وموارد أكاديمية

ختاماً نرجو ان يكون هذا البحث إضافة متواضعة للمكتبة العلمية وان يكون الجهد خالصاً لله ونافعاً للبلاد

فهرس المحتويات

I.....	المستخلص
II.....	PROJECT ABSTRACT
III.....	الآية
IV.....	الإهداء
V.....	الشكر والعرفان
VI.....	فهرس المحتويات
VIII.....	فهرس الأشكال
IX.....	فهرس الجداول
<u>1.....</u>	<u>1الفصل الأول: المقدمة</u>
2.....	1-1 مقدمة:
3.....	2-1 مشكلة البحث:
3.....	3-1 أهداف البحث:
4.....	4-1 منهجية البحث:
4.....	5-1 خطة البحث:
<u>6.....</u>	<u>2الفصل الثاني: الإطار النظري للتقرير</u>
7.....	2-1 مفاهيم استقرار نظام الطاقة
8.....	2-2 أساسيات التحكم في التردد:
9.....	3-2 اليات التحكم الأولية والثانوية والثالثية:
9.....	1-3-2 التحكم الأولي:
9.....	2-3-2 التحكم الثانوي (LFC/AGC):
11.....	3-3-2 التحكم الثالثي:
11.....	4-2 التمثيل الرياضي لديناميكيات نظام الطاقة للتحكم في التردد:
11.....	1-4-2 نموذج المولد والحمل:
12.....	2-4-2 نموذج الحاكم:
12.....	3-4-2 نموذج التوربين:
12.....	5-2 مبادئ التحكم في التردد:
13.....	6-2 نموذج التحكم في التردد لمنطقة واحدة:
13.....	7-2 نموذج التحكم في تردد الحمل متعدد المناطق:
14.....	8-2 أهداف التحكم في تردد الحمل (LFC):
<u>15.....</u>	<u>3 الفصل الثالث: التصميم والتنفيذ</u>
16.....	1-3 مقدمة:

16	2-3 تصميم النظام:
16	1-2-3 مكونات النظام
17	2-2-3 آلية النظام :
18	3-3 تنفيذ المحاكاة:
18	1-3-3 نموذج النظام الأساسي :
19	2-3-3 تطبيق المتحكمات على النظام الأساسي:
22	<u>4 الفصل الرابع: النتائج والتحليل</u>
23	1-4 مقدمة:
23	2-4 عرض النتائج:
26	3-4 تحليل النتائج:
27	4-4 المقارنة بين المتحكمات:
29	<u>5 الفصل الخامس: الخلاصة والتوصيات</u>
30	1-5 الخلاصة:
30	2-5 التوصيات:
32	3-5 المراجع:
32	4-5 الأوراق العلمية:

فهرس الأشكال

- شكل (3-1) يمثل المخطط الكتلي للنظام 17
- شكل (3-2) يوضح النظام الأساسي دون متحكم 19
- شكل (3-3) يمثل النظام باستخدام المتحكم PI 20
- شكل (3-4) النظام باستخدام المتحكم PID 20
- شكل (3-5) يوضح النظام باستخدام المتحكم الضبابي FUZZY 21
- شكل (4-1) استجابة التردد للنظام بدون متحكم 23
- شكل (4-2) استجابة التردد للنظام بمتحكم PI 24
- شكل (4-3) استجابة تردد النظام باستخدام متحكم PID 25
- شكل (4-4) استجابة التردد للنظام باستخدام المتحكم الضبابي FUZZY 26

فهرس الجداول

جدول (4-1) مقارنة استجابة المتحكمات 27

الفصل الأول المقدمة

الفصل الأول

المقدمة

1-1 مقدمة:

في أنظمة الطاقة الحديثة يعد الحفاظ على امدادات كهرباء مستقرة وموثوقة أمر بالغ الأهمية. ومن المعايير المهمة التي يجب مراقبتها والتحكم فيها باستمرار هو تردد النظام حيث أنه يشير الي التوازن بين توليد الطاقة والطلب على الأحمال. عند اختلال هذا التوازن ينحرف التردد عن قيمته الاسمية مما يؤدي الي عدم إستقرار النظام وتلف المعدات وفي الحالات الشديدة انقطاع كهربى واسع النطاق .

يُعد التحكم في تردد الحمل الآلية المسؤولة عن الحفاظ على تردد النظام ضمن الحدود المقبولة من خلال تعديل خرج المولدات إستجابة لتغيرات الحمل. كما أشار خان وآخرون (2023) "يستطيع نظام الطاقة المستقر تحمل الإضطرابات والتقلبات ومتطلبات الحمل المتغيرة أما اذا اصبح النظام غير مستقر فقد يحدث انقطاع في التيار الكهربائي وفي أسوأ الأحوال قد يؤدي الي الإظلام التام" وهذا يبرز الأهمية الحاسمة لإستراتيجيات التحكم في تردد الحمل الفعالة في أنظمة الطاقة الحديث.

لقد زادت أهمية التحكم في تردد الحمل بشكل كبير في السنوات الأخيرة بسبب العديد من العوامل بما في ذلك التكامل المتزايد لمصادر الطاقة المتجددة المتغيرة والتعقيد المتزايد لشبكات الطاقة والتطور نحو الشبكات الذكية

تلعب محطات الطاقة الكهرومائية دوراً حيوياً ومتعدد الجوانب في أنظمة الطاقة الحديثة وباعتبارها تقنية طاقة متجددة متطورة توفر الطاقة الكهرومائية مزايا مثل الموثوقية العالية والمرونة التشغيلية والقدرة على التشغيل التلقائي. وفي سياق التحكم في التردد تعد محطات الطاقة الكهرومائية تعد محطات الطاقة الكهرومائية ذات قيمة خاصة نظراً لقدرتها على الإستجابة السريعة. وكما اوضح آسو وآخرون (2022) فإن قدرتها على توفير الطاقة دون انقطاع بالتردد المطلوب أمر بالغ الأهمية لاسيما في الأنظمة العزولة أو ضعيفة التوصيل.

يعد إستقرار التردد شرطاً أساسياً لتشغيل نظام الطاقة بأمان كما ان الحفاظ على التردد ضمن حدود دقيقة (50 هيرتز عادة) أمراً ضرورياً لحماية المعدات وأمن النظام وكفاءة الطاقة وإستقرار تشغيل الأنظمة

المترابطة. وقد زادت تحديات الحفاظ على استقرار التردد مع انخفاض قصور النظام الذاتي نتيجة لتزايد استخدام الموارد القائمة على العاكسات وزيادة تنوع مصادر الطاقة المتجددة، مما يجعل استراتيجيات التحكم في تردد الحمل المتقدمة أكثر حيوية

1-2 مشكلة البحث:

يتمحور التحدي الأساسي في الحاجة الملحة لتطوير وتحسين استراتيجيات التحكم في تردد الحمل في محطات الطاقة الكهرومائية وذلك لمواجهة التأثيرات الديناميكية الحرجة الناتجة من التغيرات في تدفق المياه

والاستجابة البطيئة للحاكمات المائية التي قد تلحق ضرر بالتوربينات والمولدات والأنظمة المساعدة مما يؤدي لإصلاحات مكلفة وتوقف التيار لفترة من الزمن وعدم معالجة هذه التحديات بكفاءة يهدد استقرارية وموثوقية الشبكة ويصعب الحفاظ على التردد ضمن الحدود الآمنة والمطلوبة

1-3 أهداف البحث:

يهدف هذا البحث الي تقديم دراسة وتحليل شاملين للتحكم في ترددات الاحمال في محطات الطاقة الكهرومائية مع التركيز على فهم تحديات واستراتيجيات التحكم المتقدمة المطبقة على توليد الطاقة الكهرومائية وتشمل هذه الأهداف:

1- استكشاف وتحليل المبادئ الأساسية لنظام التحكم في تردد الحمل بهدف فهم العوامل المؤثرة على استقرارية التردد في نظام الطاقة

2- تقييم استراتيجيات التحكم التقليدية للتحكم في تردد الحمل في المحطات المائية ومقارنة فعاليتها لتحديد افضل معلمات ضبط التي تحقق اسرع زمن استجابة واقل خطأ في الحالة المستقرة واقل تجاوز للتردد

3- التحقيق في اساليب النمذجة لمحطات الطاقة الكهرومائية في دراسة التحكم في تردد الحمل بما في ذلك نماذج دالة النقل وتمثيلات مساحة الحالة وبيئة المحاكاة

4- تقييم التطبيقات الواقعية ودراسات الحالة لتطبيق التحكم في تردد الحمل في محطات الطاقة الكهرومائية واستخراج الرؤى العملية

5- تحديد التحديات والوجهات المستقبلية في التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية وخاصة في سياق أنظمة الطاقة المتطورة ذات الانتشار العالي للطاقة المتجددة وتقنيات الشبكة الذكية

1-4 منهجية البحث:

تعتمد هذه الدراسة على منهجية تحليلية استقصائية تركز على المراجعة الدقيقة للادبيات الموثوقة يليها تحليل واستخلاص المعلومات لتوفير نظرة عامة وشاملة حول موضوع التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية ومعالجة اهداف البحث بشكل منهجي

تضمن المنهجية الخطوات الرئيسية التالية:

1- المراجعة الشاملة للادبيات ومصادر المعلومات حيث يعد هذا هو الأساس الذي تُبنى عليه الدراسة حيث يتم جمع المعلومات من المعايير الاقليمية والدولية مثل (IEEE) المتعلقة باستقرارية الشبكة وضوابط التحكم في التردد والحصول على وثائق وبيانات تقنية من الشركات المصنعة ودراسة وتحليل الحالة الفعلية.

2- بعد جمع البيانات يتم تحليلها وتلخيصها لضمان تغطية شاملة ومنظمة لموضوع التحكم في التردد ويتم مع ذلك مقارنة وتلخيص الاستراتيجيات المختلفة للتحكم في تردد الحمل التي تم تناولها في الادبيات وتحديد مزايا وعيوب كل منها.

3- النمذجة والمحاكاة حيث يتم هنا تطوير النماذج الرياضية وذلك ببناء نموذج رياضي ديناميكي لنظام المحطة الكهرومائية في بيئة محاكاة مثل (MATLAB\Simulink) .

ثم تطبيق سناريوهات التحكم المختلفة وإختبارها على المحطة ومحاكاة الاستجابة للاضطرابات التي تحدث في الحمل ثم تحليل ومقارنة نتائج المحاكاة بناءً على مقاييس الاداء المحددة.

1-5 خطة البحث:

الفصل الاول: يقدم خلفية عن البحث ويناقش المشكلة والاهداف والمنهجية التي يقوم عليها البحث والمخطط التفصيلي.

الفصل الثاني: يناقش الادبيات ويراجع أساسيات تنظيم التردد واسباب وتأثيرات انحرافات التردد بالإضافة الى نظرة عامة عن أنظمة الحماية والتقنيات ذات الصلة بظروف التردد الزائد.

الفصل الثالث: يشرح تمثيل مكونات النظام باستخدام المعادلات الرياضية وتنفيذ النظام على "Simulink /MATLAB".

الفصل الرابع: يعرض نتائج محاكاة النظام وأداء كل متحكم ومقارنة بين المتحكمات (PI) (FUZZY) (PID).

الفصل الخامس: الخلاصة والتوصيات حيث يلخص هذا التقرير النتائج الرئيسية والاتجاهات الناشئة ويقدم توصيات للحصول على أفضل استقرار لتردد الحمل في المحطات الكهرومائية. و يختتم التقرير بقائمة المراجع

الفصل الثاني

الإطار النظري للتقرير

الفصل الثاني

الإطار النظري للتقرير

2-1 مفاهيم استقرار نظام الطاقة:

يعد استقرار نظام الطاقة شرطاً أساسياً لضمان موثوقية تشغيل الشبكات الكهربائية حيث يشير الي قدرة نظام الطاقة على استعادة توازن التشغيل بعد تعرضه لإضراب فزيائي مع تحديد معظم متغيرات النظام بحيث يبقى النظام بأكمله تقريباً سليماً ويمكن تصنيف استقرار نظام الطاقة بشكل عام إلي ثلاث فئات هي استقرار الدوار واستقرار الجهد واستقرار التردد.

يعد استقرار التردد هو المحور الأساسي لهذا البحث حيث يتعلق بقدرة النظام على الحفاظ على تردد ثابت بعد تعرضه لاضطراب ينتج عنه اختلاف القيم بين التوليد والحمل

قد يؤدي عدم استقرار التردد الي تقلبات تردد مستمرة مما يؤدي الي تعطل وحدات التوليد والحمل

المبدأ الأساسي الذي يحكم استقرار التردد هو معادلة توازن الطاقة:

$$W = \left(\frac{1}{2} H [P_m - P_e] \right) dt$$

حيث:

$W \equiv$ هو التغير في تردد الزاوي

$H \equiv$ هو ثابت القصور الذاتي

$P_m \equiv$ هي القدرة الميكانيكية المدخلة

$P_e \equiv$ هي القدرة الكهربائية الخارجة

توضح هذه المعادلة أن أي اختلاف بين مدخلات الطاقة الميكانيكية ومخرجات الطاقة الكهربائية سيؤدي إلي تغير في تردد النظام حيث أن معدل تغير التردد (ROCOF) يتناسب عكسيا مع قصور النظام الذاتي والذي توفره بشكل أساسي الكتل الدوارة للمولدات المتزامنة.

في أنظمة الطاقة التقليدية التي تهيمن عليها المولدات المتزامنة يوفر القصور الذاتي المتأصل مقاومة طبيعية لتغيرات التردد ومع ذلك كما يشير خان وآخرون (2023) "في السنوات الأخيرة أصبح نظام الطاقة التقليدي نظاماً هجيناً مع زيادات في الربط البيني لمصادر الطاقة المتجددة والتيار المستمر عالي الجهد وتخزين الطاقة " وقد أدى هذا التطور إلى انخفاض قصور النظام الذاتي وبالتالي قابلية التأثر باضطرابات التردد مما يجعل آليات التحكم الفعالة في التردد أكثر أهمية من أي وقت مضى.

2-2 أساسيات التحكم في التردد:

عادة يتم تنظيم التحكم في تردد الحمل في أنظمة الطاقة في بنية هرمية مع طبقات تحكم متعددة تعمل على نطاقات زمنية مختلفة:

1/ التحكم الأساسي في التردد: يعرف أيضاً باسم التحكم في الانخفاض أو استجابة المنظم وهي أسرع استجابة تلقائية (في غضون ثواني) لانحرافات التردد وهي تضمن الضبط التلقائي لمخرج المولد بناءً على قياسات التردد المحلية باستخدام خاصية تحكم تناسبي (انخفاض). يعمل التحكم الأساسي على تثبيت التردد ولكنه لا يعيده إلى القيمة الاسمية.

2/ التحكم الثانوي في التردد: يعرف أيضاً باسم التحكم التلقائي في التوليد Generation أو التحكم في تردد الحمل Load ويعمل هذا على نطاق زمني بالدقائق ويهدف إلى استعادة التردد إلى قيمته الاسمية والحفاظ على تبادلات الطاقة المجدولة بين مناطق التحكم .

يستخدم التحكم الثانوي عادةً إجراء تحكم تكاملي للقضاء على خطأ التردد في الحالة المستقرة.

3/ التحكم الثالثي في التردد: يتضمن هذا تعديلات يدوية أو تلقائية على إرسال التوليد والاحتياجات لتحسين تشغيل النظام وتخفيف الإزدحام واستعادة إحتياجات التحكم الثانوي ويعمل على نطاق زمني من عشرات الدقائق الي ساعات.

يتضمن التمثيل الرياضي لحلقة التحكم الأساسية في التردد ما يلي:

النطاق الميت للمنظم وديناميكياته

ديناميكيات المولد والحمل

آليات التحكم بالتغذية الراجعة

بالنسبة لنظام طاقة احادي المنطقة يمكن تمثيل استجابة التردد بدالة النقل التالية:

$$G_s = \left(\frac{1}{D} + 1sH \right) / \left(1 + \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{s2H} \right) Gg \ s \ Gt \ s \right)$$

حيث

$D \equiv$ هو معامل تخميد الحمل

$H \equiv$ هو ثابت القصور الذاتي

$Gg(s) \equiv$ دالة نقل المنظم

$Gt(s) \equiv$ دالة نقل التوربين

تشكل دالة النقل هذه هي الأساس لنماذج أكثر تعقيداً تتضمن مناطق متعددة وتقنيات توليد متنوعة واستراتيجيات تحكم متقدمة

2-3 آليات التحكم الأولية والثانوية والثالثة:

2-3-1 التحكم الأولي:

التحكم الأولي في التردد هو خط الدفاع الأول ضد انحرافات التردد وهو يعمل باستمرار وتلقائياً ويستجيب لتغيرات التردد في غضون ثواني .

وتشمل الخصائص الرئيسية للتحكم الأولي ما يلي:

- عمل منظم سرعة ليستشعر انحرافات السرعة والتردد وضبط مدخلات الطاقة للمحرك الرئيسي
- خاصية الانخفاض: لتحديد العلاقة بين انحراف التردد وتغير خرج الطاقة وعادة ما يتم التعبير عنه كنسبة مئوية

- التحكم النسبي: هو وحدة تحكم نسبية اي انه يمكنه القضاء على خطأ التردد في الحالة المستقرة بالنسبة للوحدات الكهرومائية يتضمن التحكم الأساسي ضبط موضع البوابة التحكم للتحكم في تدفق المياه عبر التوربين يحتوي هذا الإجراء الميكانيكي على تأخيرات وعدم خطية يجب مراعاتها في تصميم التحكم.

2-3-2 التحكم الثانوي (LFC/AGC)

يتم التحكم هنا في تردد الحمل على نطاق زمني أطول ويهدف إلي :

- إستعادة تردد النظام إلي قيمته الإسمية

- التحكم في تردد الحمل (LFC)

يعمل النظام من خلال مراقبة التردد في شبكة الطاقة ومقارنته بقيمه مرجعية محددة مسبقاً اذا انحرف التردد عن القيمة المرجعية يرسل النظام إشارات المولدات لضبط توليد الطاقة ويتحقق ذلك من

خلال ضبط كمية الماء المرسل إلي التوربينات مما يؤدي إلي تغيير في توليد الطاقة ويساهم في الحفاظ على استقرار التردد وضمان التوازن بين توليد الطاقة والطلب عليها

2-3-2 أهمية النظام:

- 1- استقرار التردد: يساهم النظام في الحفاظ على استقرار التردد في شبكة الطاقة مما يضمن التشغيل الآمن للمعدات الكهربائية.
- 2- التوازن بين التوليد والطلب: يساعد النظام في تحقيق التوازن بين توليد الطاقة والطلب عليها مما يمنع انقطاع التيار الكهربائي.
- 3- تقليل الأعطال: يمكن أن يساهم التحكم في تردد الحمل في تقليل الأعطال في شبكة الطاقة من خلال الحفاظ على استقرار التردد وتجنب التغيرات الكبيرة في توليد الطاقة.

2-3-2 التحديات:

- 1- تعقيد شبكة الطاقة : يمكن ان يكون التحكم في تردد الحمل معقداً نظراً لتعقيد شبكة الطاقة وتعدد المولدات والمستهلكين.
- 2- التغيرات في الطلب: يمكن ان يتغير الطلب على الطاقة بشكل كبير خلال اليوم مما يتطلب من التحكم في تردد الحمل
- 3- التكامل مع مصادر الطاقة المزدودة: يمكن ان يمثل دمج مصادر الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية تحدياً للتحكم في تردد الحمل نظراً للتقلبات في توليد الطاقة

2-3-2 الأجهزة المستخدمة في قياس تردد الحمل (LFC):

- 1- أجهزة القياس: أجهزة تقيس تردد الطاقة
- 2- أجهزة التحكم: أجهزة إلكترونية تحلل البيانات وتتخذ القرارات
- 3- أجهزة مراقبة: لمراقبة وتعقب أداء شبكة الطاقة
- 4- أجهزة الإتصال: أجهزة تنقل البيانات بين أجزاء مختلفة من شبكة الطاقة
- 5- أنظمة التحكم في المولدات: أنظمة تتحكم في المولدات لضبط توليد الطاقة

2-3-3 التحكم الثالثي:

يمثل التحكم الثانوي أبسط طبقة من طبقات التحكم في التردد حيث يعمل على نطاق زمني يتراوح من عشر دقائق الي ساعات وتشمل وظائفه الأساسية ما يلي:

1- التوزيع الاقتصادي لموارد الطاقة

2- إدارة قيود النقل

3- استعادة احتياطات التحكم الثانوي

4- التعامل مع حالات الطوارئ وتغير ظروف النظام

يمكن تنفيذ التحكم من خلال إجراءات التشغيل اليدوية أو الأنظمة الآلية مثل التوزيع الاقتصادي المقيد بالامان أو أنظمة إدارة الطاقة

في سياق توليد الطاقة الكهرومائية غالباً ما يتضمن التحكم الثلاثي التنسيق بين وحدات كهرومائية متعددة مع مراعاة قيود موارد المياه واللوائح والبيئية وأهداف التحسين طويلة الأجل

2-4 التمثيل الرياضي لديناميكيات نظام الطاقة للتحكم في التردد:

تضمن النمذجة الرياضية لديناميكيات نظام الطاقة لدراسات التحكم في التردد عادة تمثيلات خطية للمكونات المختلفة وتفاعلاتها وذلك لنظام طاقة أحادي المنطقة تضمن نموذج استجابة التردد الأساسي ما يلي:

2-4-1 نموذج المولد والحمل:

$$\Delta f(s) = \left(\frac{1}{2H_s + D} \right) \Delta P_m(s) - \Delta PL(s)$$

حيث:

$\Delta f \equiv$ انحراف التردد

$\Delta P_m \equiv$ التغير في القدرة الميكانيكية

$\Delta P_L \equiv$ التغير في طاقة الحمل

$H \equiv$ ثابت القصور الذاتي

$D \equiv$ يمثل معامل تخميد الحمل

2-4-2 نموذج الحاكم:

$$\Delta P_g(s) = \left(\frac{1}{T_g s + 1} \right) \left(\Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s) \right)$$

حيث:

$\Delta P_g \equiv$ تمثل التغير في خرج الحاكم

$\Delta P_{ref} \equiv$ يمثل التغير في إعداد الطاقة المرجعية

$T_g \equiv$ يمثل ثابت زمن الحاكم

$R \equiv$ تمثل تنظيم السرعة

2-4-3 نموذج التوربين:

$$\Delta P_m(s) = \left(\frac{1}{T_t s + 1} \right) \Delta P_g(s)$$

حيث :

$T_t \equiv$ يمثل ثابت زمن التوربين.

2-5 مبادئ التحكم في التردد:

يعد الحكم في تردد الحمل مكوناً حاسماً في تكوين في تشغيل نظام الطاقة ويركز بشكل أساسي على الحفاظ على تردد النظام عند قيمته الإسمية وضمان الحفاظ على عمليات تبادل الطاقة المجدولة بين المناطق المترابط وتتضمن المبادئ الأساسية للتحكم في التردد الحمل ما يلي:

1- موازنة التوليد والحمل:

يراقب التحكم في تردد الحمل والتوازن بين التوليد والحمل داخل منطقة التحكم باستمرار . اي عدم تطابق ينتج عنه انحراف في التردد ، والذي يهدف التحكم في تردد الحمل الي تصحيحه.

2-الحفاظ على التبادل المجدول:

في الأنظمة المترابطة يضمن التحكم في تردد الحمل ان تلبي كل منطقة تحكم طلب الحمل

الخاص بها بالإضافة الي تبادل الطاقة الصافي المجدول مع المناطق المجاورة .

3-استخدام خطأ التحكم في المنطقة(ACE):

يعد خطأ التحكم في المنطقة (ACE) اشارة الإدخال الأساسية للتحكم في تردد الحمل (LFC) في الأنظمة متعددة المناطق. فهو يجمع بين انحراف طاقة خط الربط وانحراف التردد في مقياس واحد يوجه إجراء التحكم.

4- إجراء التحكم التكاملي: يستخدم التحكم في تردد الحمل (LFC) عادةً التحكم التكاملي لدفع خطأ التردد في الحالة المستقرة وانحراف طاقة خط الربط الي الصفر.

5- تنسيق الموارد: ينسق نظام التحكم في تردد الحمل (LFC) استجابة وحدات التوليد المتعددة داخل منطقة تحكم لمعالجة اشارة منطقة الخطأ (ACE)

2-6 نموذج التحكم في التردد لمنطقة واحدة :

يمثل نموذج التحكم في التردد لمنطقة واحدة نظام طاقة معزول او منطقة تحكم داخل ترابط اكبر بإفتراض انه يعمل بشكل مستقل لأغراض التحكم في التردد. يتضمن مخطط الكتلة عادة ما يلي:

- المنظم: يمدج استجابة منظم السرعة لانحرافات التردد وتغييرات نقطة الضبط المرجعية.

- التوربين: يمثل ديناميكيات المحرك الرئيسي (مثل التوربين البخاري او المائي).

- المولد/الحمل: يمثل القصور الذاتي الدوراني وخصائص الحمل المعتمدة على تردد المنطقة

- وحدة التحكم: تستخدم لضبط النقطة المرجعية للمنظم بناءً على انحراف التردد

الهدف في نظام المنطقة الواحدة إستعادة التردد الي قيمته الاسمية بعد اضطراب الحمل. يتم تقييم

الأداء بناءً على مقاييس مثل وقت الاستقرار والتجاوز وخطأ الحالة المستقرة

2-7 نمذج التحكم في تردد الحمل متعدد المناطق:

تتكون معظم أنظمة الطاقة من مناطق تحكم متعددة مترابطة. يوسع مفهوم التحكم في تردد الحمل

متعدد المناطق مفهوم المنطقة الواحدة من خلال دمج خطوط الربط التي تربط المناطق المختلفة. تشمل

الجوانب الرئيسية ما يلي:

- تدفق طاقة خط الربط: ينمذج تبادل الطاقة بين المناطق والذي يعتمد على فرق التردد ومعامل طاقة التزامن لخطوط الربط

- التحكم المنسق: تستجيب وحدات التحكم في التردد المنخفض (LFC) في كل منطقة لخطأ التحكم (ACE) في المنطقة الخاص بها لإستعادة كل من التردد والتبادل المجدول

- خطأ التحكم في المنطقة (ACE).

يسمح نموذج المناطق المتعددة بدراسة التفاعلات بين مناطق التحكم، وتأثير الاضطرابات في منطقة ما على المناطق الأخرى وتصميم إستراتيجيات التحكم المنسق.

8-2 اهداف التحكم في تردد الحمل (LFC)

1- خطأ تردد لحالة المستقرة الصفري: ضمان عودة تردد النظام الي قيمته الاسمية بعد حدوث اضطراب.

2- انحراف طاقة خط الربط في الحالة المستقرة الصفري: ضمان عودة تبادل الطاقة الفعلي بين المناطق الي القيمة المجدولة

3- استجابة ديناميكية سريعة ومستقرة: تحقيق تخميد سريع لتذبذبات التردد وطاقة خط الربط مع الحد الأدنى من التجاوز ووقت الإستقرار.

4- المتانة: الحفاظ على اداء مقبول على الرغم من الإختلافات في معلمات النظام وظروف التشغيل.

5- تشمل الاهداف الثانوية تقليل جهد التحكم، وتقليل تآكل وحدات التوليد، والتنسيق مع الإرسال الإقتصادي.

الفصل الثالث

التصميم والتنفيذ

الفصل الثالث التصميم والتنفيذ

1-3 مقدمة:

يتناول هذا الفصل عرض التصميم العام لنظام التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية، حيث يتم توضيح النماذج الرياضية التي تم اعتمادها لتمثيل مكونات النظام المختلفة بما في ذلك التوربين المائي والمولد والحاكم.

كما يستعرض الفصل منهجية تنفيذ النظام باستخدام أدوات المحاكاة، مع شرح خطوات بناء النموذج وتطبيق متحكمات مختلفة لتحسين استجابة التردد عند حدوث تغيرات في الحمل.

يهدف الفصل الى توضيح الكيفية التي تم بها تحويل الجانب النظري الي نموذج عملي قابل للتحليل والدراسة .

2-3 تصميم النظام:

يهدف نظام التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية الي المحافظة على استقرار التردد عند القيمة الاسمية (50) رغم التغيرات المستمرة في الحمل. يعتمد النظام على تنظيم القدرة الميكانيكية الداخلة الي المولد من خلال التحكم في التوربين المائي باستخدام الحاكم (G)، وذلك لتحقيق التوازن بين القدرة المولدة والحمل

1-2-3 مكونات النظام

يتكون النظام من عدة عناصر كما موضح في الشكل(1-3)

1- الحاكم (Governor):

يقوم بمراقبة التردد والاستجابة لاي تغير في الحمل، حيث يتحكم في كمية الماء الداخلة للتوربين لتحقيق التوازن بين القدرة المولدة والحمل.

2- التوربين المائي (Hydro turbine):

يحول الطاقة الميكانيكية للمياه المتدفقة الي قدرة ميكانيكية لتشغيل المولد وبالتالي المساهمة في توليد الكهرباء.

3- المولد (Generator model):

يعمل على تحويل الطاقة الميكانيكية الي طاقة كهربائية. ويزود الشبكة الكهربائية بالطاقة المطلوبة.

4- الحمل (load model):

يمثل استهلاك الطاقة الكهربائية من قبل المستخدمين، ويؤثر تغييره المباشر على تردد النظام، مما يستدعي تدخل الحاكم لضبط التردد

توضح هذه المكونات بالمعادلات:

Governor:

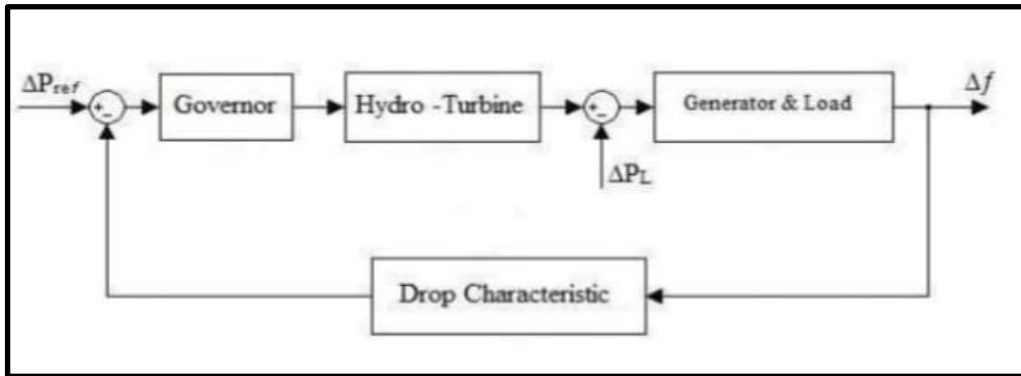
$$\Delta P_m = \frac{1}{R} \Delta f$$

Turbine:

$$\frac{\Delta P_t(s)}{\Delta P_m(s)} = \frac{1}{T_s + 1}$$

Generator:

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_t(s)} = \frac{K}{M_s + D}$$



شكل (3-1) يمثل المخطط الكتلي للنظام

3-2-2 الية النظام :

عند حدوث زيادة في الحمل يؤدي ذلك لإنخفاض التردد نتيجة زيادة الطلب على الطاقة. يقوم

الحاكم بإستشعار هذا الإنخفاض ويعمل على تعديل تدفق المياه الى التوربين المائي، مما يؤدي الي زيادة القدرة الميكانيكية المقدمة الى المولد. يقوم المولد بتحويل هذه الطاقة الميكانيكية الى كهرباء، وبالتالي استعادة التردد الى قيمته الاسمية. وبالمثل عند إنخفاض الحمل، يتم تقليل تدفق المياه لضمان استقرار التردد.

3-3 تنفيذ المحاكاة:

تم تنفيذ نموذج نظام التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية بإستخدام بيئة (Simulink) في برنامج (MATLAB)

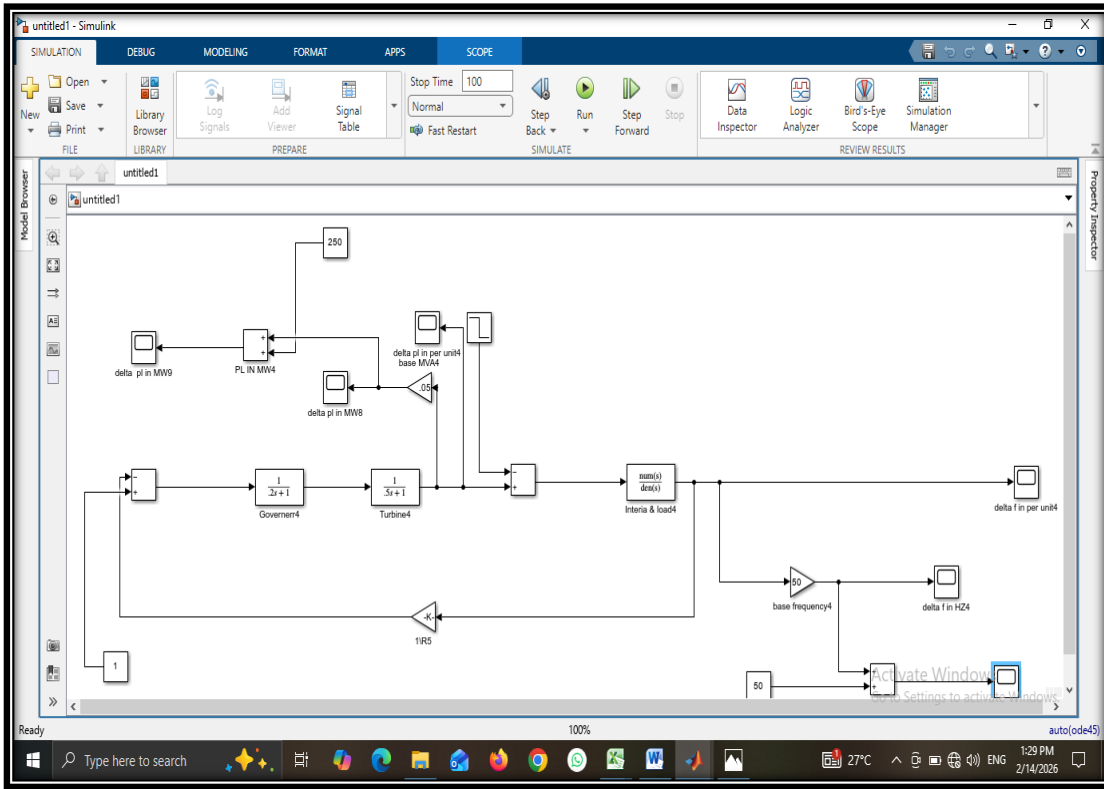
تتيح بيئة (MATLAB) إمكانية تمثيل المكونات المختلفة للنظام بشكل مرئ بإستخدام (Simulation) مما سهل ربط الحاكم والتوربين المائي والمولد والحمل بشكل منطقي وديناميكي.

تم بناء النموذج بحيث يشمل جميع مكونات النظام، مع ادراج المتحكمات الثلاثة (PI /PID /FUZZY) لتقييم اداء كل منها في استقرار التردد عند حدوث تغيرات في الحمل.

كما تم ضبط المعلمات الخاصة بكل متحكم لتناسب مع خصائص النظام، بهدف دراسة سلوك النظام تحت ظروف تشغيل مختلفة وتحليل استجابته للتقلبات في الحمل، استعداداً لعرض النتائج ومقارنتها في الفصل التالي.

3-3-1 نموذج النظام الأساسي :

تم بناء النظام ليشمل المكونات الرئيسية لنظام التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية وهي: الحاكم (Governor)، التوربين المائي (hydraulic turbine)، المولد (Generator)، والحمل (Load) كما موضح في الشكل (2-3).

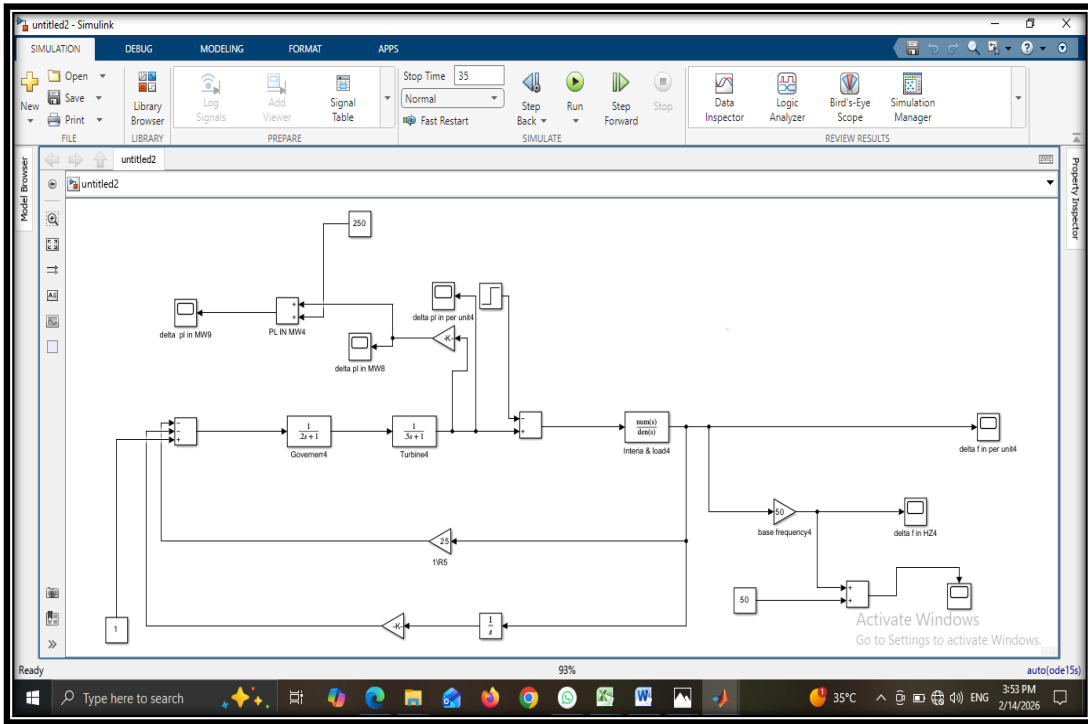


شكل (2-3) يوضح النظام الأساسي دون متحكم

2-3-3 تطبيق المتحكمات على النظام الأساسي:

:PI Controller -1

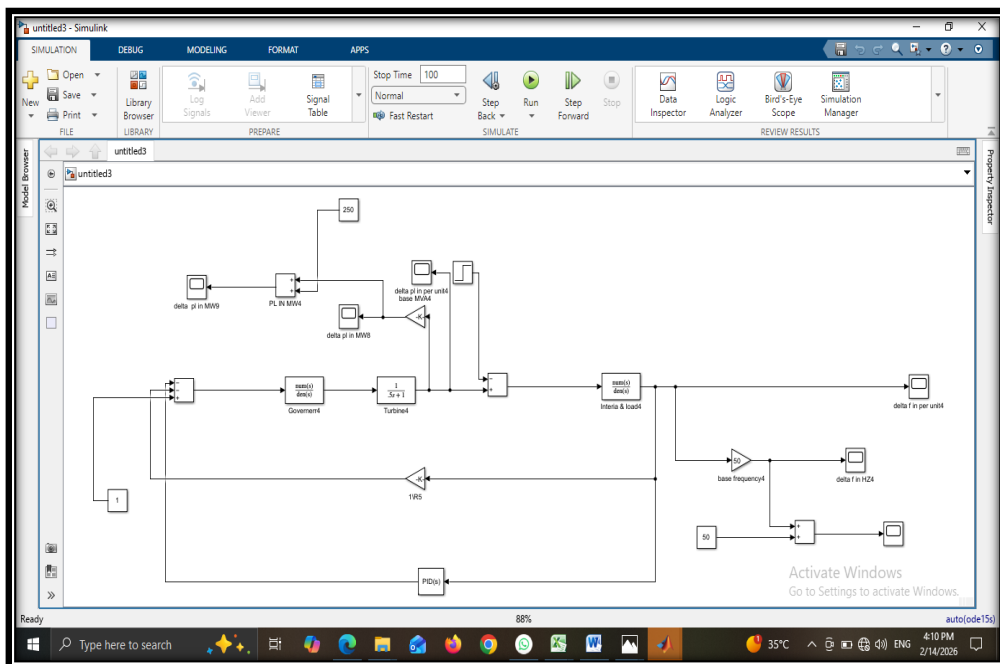
تم ادخال المتحكم PI في النظام الأساسي لضبط استجابة التردد عند حدوث تغيرات في الحمل لضمان استقرار التردد وتقليل الخطأ المستمر كما موضح في الشكل (3-3).



شكل (3-3) يمثل النظام باستخدام المتحكم PI

:PID Controller-2

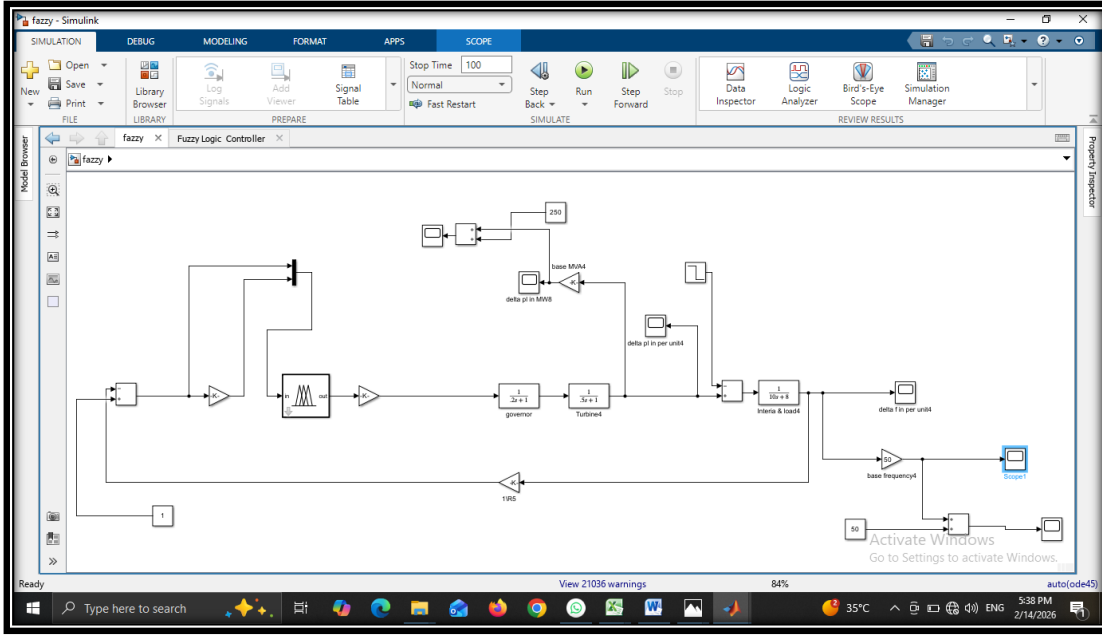
تم استخدام المتحكم PID على نفس النظام الأساسي لتحسين الاستجابة وتقليل التذبذبات بشكل أسرع للحصول على تردد أكثر استقرار كما موضح في الشكل (3-4)



شكل (3-4) النظام باستخدام المتحكم PID.

:Fuzzy Logic Controller-3

تم تطبيق المتحكم الضبابي Fuzzy Logic على النظام الأساسي حيث يقوم بتحليل مدخلات النظام واتخاذ القرارات وفق قواعد منطقية لضبط التردد بشكل ديناميكي وذكي لضمان استجابة مرنة وسريعة عند تغير الحمل كما موضح في الشكل (3-5).



شكل (3-5) يوضح النظام باستخدام المتحكم الضبابي Fuzzy Logic

الفصل الرابع

النتائج والتحليل

الفصل الرابع

النتائج والتحليل

1-4 مقدمة:

يتناول هذا الفصل عرض وتحليل النتائج التي تم الحصول عليها من خلال محاكاة نظام التحكم في تردد الحمل المحطات الكهرومائية باستخدام المتحكمات المختلفة (PI /PID /FUZZY LOGIC). ويهدف أيضاً الي تقييم اداء كل متحكم من حيث استجابة التردد عند حدوث تغيرات في الحمل، وذلك من خلال تحليل الرسوم البيانية ومقارنة النتائج للوصول الي افضل أسلوب تحكم يحقق استقرار النظام، كما يتضمن التوصيات والمقترحات التي يمكن الاستفادة منها لتحسين اداء النظام في الدراسات المستقبلية

2-4 عرض النتائج:

1-استجابة التردد للنظام بدون متحكم:



شكل (4-1) استجابة التردد للنظام بدون متحكم

يوضح الشكل(1-4) أعلاه استجابة التردد للنظام الأساسي دون استخدام أي متحكم عند حدوث

تغير في الحمل. يلاحظ أن قيمة التردد يتأثر بشكل واضح حيث ينخفض عن قيمته الاسمية ويظهر تنذب ملحوظ، مما يدل على عدم استقرار النظام في غياب نظام تحكم ويؤكد ذلك أهمية استخدام متحكمات مناسبة لحسين استجابة النظام والمحافظة على استقرار التردد

2- استجابة التردد للنظام بمتحكم PI.



شكل (2-4) استجابة التردد للنظام بمتحكم PI

يوضح الشكل (2-4) استجابة التردد للنظام عند استخدام متحكم PI، حيث يلاحظ تحسن في أداء النظام مقارنة بالنظام دون متحكم ، اذ يقل التنذب بشكل نسبي ويقترب التردد من قيمته الاسمية. ومع ذلك لا يزال النظام يحتاج الي زمن اطول للاستقرار مما يدل على ان اداء المتحكم PI جيد لكنه ليس الأمثل.

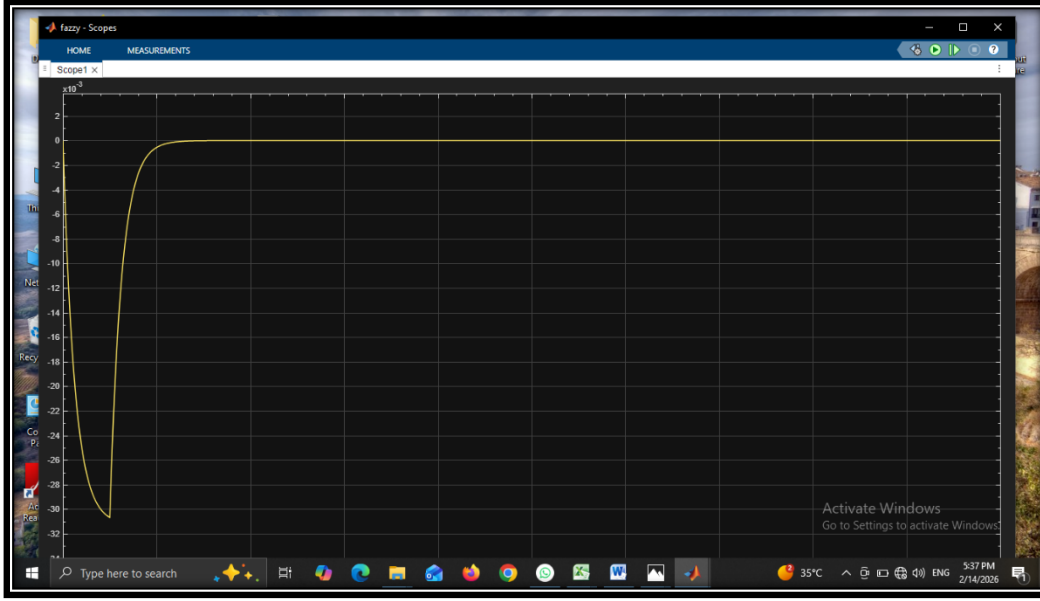
3- استجابة تردد النظام باستخدام متحكم PID .



شكل (3-4) استجابة تردد النظام باستخدام متحكم PID

يوضح الشكل (3-4) استجابة التردد للنظام عند استخدام متحكم PID، حيث يلاحظ تحسن كبير في أداء النظام مقارنة بالمتحكم PI، إذ يتم تقليل التذبذبات وزيادة نسبة الاخماد بشكل واضح ويصل النظام الي حالة الاستقرار في زمن اقل. كما يقترب التردد من قيمته الاسمية، مما يدل على كفاءة المتحكم PID في تحسين استجابة النظام.

4- استجابة التردد للنظام باستخدام المتحكم الضبابي FUZZY LOGIC .



شكل (4-4) استجابة التردد للنظام باستخدام المتحكم الضبابي FUZZY

يوضح الشكل (4-4) إستجابة التردد للنظام عند إستخدام المتحكم الضبابي، حيث يظهر النظام استجابة أكثر مرونة واستقراراً مقارنة بالمتحكمات التقليدية. كما يتم تقليل الذبذبات بشكل كبير ويصل التردد الي قيمته الاسمية بسرعة، مما يدل على كفاءة المتحكم الضبابي في التعامل مع التغيرات الديناميكية في الحمل

3-4 تحليل النتائج:

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها من محاكاة نظام التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية، يمكن ملاحظة التأثير الواضح لتغير الحمل على استقرار التردد ف النظام. حيث أظهر النظام الأساسي بدون إستخدام أي متحكم إستجابة غير مستقرة تمثلت في ارتفاع ملحوظ في التردد وظهور ذبذبات مستمرة ثم استقرار التردد في غير قيمته الاسمية مما يدل على عدم قدرة النظام على إستعادة حالته الطبيعية بشكل ذاتي.

عند استخدام المتحكم PI، لوحظ تحسن في أداء النظام مقارنة بالحالة بدون متحكم، حيث ساهم في تقليل التذبذبات وتحسين استجابة التردد بشكل نسبي. إلا أن النظام لا يزال يعاني من بطء في الوصول إلى حالة الاستقرار، مما يشير إلى أن هذا النوع من المتحكمات يوفر أداءً مقبولاً ولكنه ليس كافياً لتحقيق أفضل استجابة ممكنة.

أما عند استخدام متحكم PID فقد أظهر النظام تحسناً ملحوظاً في الأداء، حيث تقلت الذبذبات بشكل أكبر مقارنة بالمتحكم PI، كما إنخفض زمن الإستقرار بصورة واضحة. ويعزي ذلك الي تأثير الجزء التفاضلي (Differentiation) الذي ساعد في التنبؤ بسلوك النظام وتقليل التغيرات المفاجئة، مما يجعل إستجابة النظام اكثر سرعة ودقة.

في المقابل قدم المتحكم الضبابي (Fuzzy logic) أفضل اداء بين جميع المتحكمات المستخدمة، حيث أظهر قدرة عالية على التكيف مع تغيرات الحمل، مما أدى إلى تقليل التذبذبات إلى حد كبير وتحقيق استجابة سلسة وسريعة للتردد. كما تميز هذا المتحكم بمرونته في التعامل مع الأنظمة غير الخطية، مما جعله أكثر كفاءة في الحفاظ على استقرار التردد مقارنة بالمتحكمات التقليدية .

بشكل عام، يتضح من التحليل أن استخدام تقنيات التحكم يلعب دوراً أساسياً في تحسين أداء النظام، حيث يزداد مستوى الاستقرار كلما تم استخدام متحكم أكثر تطوراً. وبناءً على النتائج، يمكن اعتبار المتحكم الضبابي الخيار الأفضل لتحقيق استجابة مستقرة وسريعة في أنظمة التحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية.

4-4 المقارنة بين المتحكمات:

يوضح الجدول ادناه مقارنة بين المتحكمات الثلاثة من حيث التردد النهائي وزمن الإستقرار ومدى التغير في التردد عن قيمته الاسمية

جدول (4-1) مقارنة استجابة المتحكمات

الانحراف	زمن الاستقرار (s)	(HZ)التردد النهائي	نظام التحكم
0.5+	17	50.35	بدون متحكم
0.6+	14	49.03	PI
0.15-	9	50	PID
0.031-	7	50	Fuzzy

أظهرت النتائج أن تقنيات التحكم الحديثة، خاصة المتحكم الضبابي، توفر استجابة أسرع واستقراراً

أفضل مقارنة بالمتحكمات التقليدية، خاصة في الأنظمة ذات السلوك غير الخطي

الفصل الخامس

الخلاصة والتوصيات

الفصل الخامس

الخلاصة والتوصيات

5-1 الخلاصة:

تؤكد نتائج الدراسة أن النظام الكهربائي بدون أي متحكم يعاني من تذبذبات واضحة وزمن استقرار طويل عند حدوث تغيرات في الحمل، ما يعكس محدودية القدرة على الحفاظ على استقرار التردد. أما عند إدخال أنظمة التحكم، فقد لوحظ تحسن ملحوظ في استقرار التردد وتقليل التذبذبات، مع استجابة أسرع ودقة أكبر في التحكم. ومن بين أنظمة التحكم المختلفة، أظهر المتحكم الضبابي أعلى مستوى من الكفاءة، حيث يجمع بين سرعة الاستجابة والدقة في ضبط التردد، مما يجعله الخيار الأمثل لتطبيقات التحكم في الحمل داخل المحطات الكهرومائية، ويؤكد أهمية استخدام تقنيات التحكم الذكي لضمان استقرار النظام وموثوقيته على المدى الطويل.

5-2 التوصيات:

1- اعتماد المتحكم الضبابي في المحطات الكهرومائية:

نظراً لأدائه المتفوق في تقليل التذبذبات وتحقيق استقرار سريع للتردد، يُنصح بتطبيق المتحكم الضبابي كنظام أساسي للتحكم في تردد الحمل في المحطات الكهرومائية.

2- دمج أنظمة التحكم الذكي مع مراقبة البيانات:

استخدام أنظمة التحكم مع واجهات إنترنت الأشياء (IOT) يتيح متابعة أداء النظام بشكل لحظي، وتحليل البيانات عن بُعد لتوقع المشكلات وتحسين الأداء المستمر.

3- إختبار وتحليل البيانات تحت ظروف حمل متنوعة:

يُوصى بإجراء اختبارات شاملة للنظام تحت تغيرات مختلفة في الحمل لضمان استقرار التردد وتحسين استجابة النظام قبل التطبيق العملي.

4- تطوير إستراتيجيات تحكم هجينة:

يمكن الجمع بين تقنيات التحكم التقليدية والذكاء لتحقيق توازن بين الاستجابة السريعة والدقة العالية

في التحكم، خاصة في الحالات الحرجة أو الطارئة.

5- تدريب العاملين على إستخدام الأنظمة الذكية:

توفير التدريب المناسب للمهندسين والفنيين لضمان فهم آليات عمل المتحكم الضبابي وأنظمة التحكم الذكي، مما يرفع كفاءة التشغيل ويقلل من الأخطاء البشرية.

6- إستمرارية البحث والتطوير:

تشجيع الدراسات المستقبلية لتطوير متحكمات أكثر كفاءة ودمج تقنيات جديدة لتحسين استقرار التردد وتحقيق أفضل أداء اقتصادي وبيئي للمحطات الكهرومائية

3-5 المراجع:

- 1- Power System Stability and Control – Prabha Kundur, 1994.
- 2- Modern Power System Analysis – I.J. Nagrath & D.P. Kothari, 2003.
- 3- Power System Analysis and Design – J Dunan Glover et al. 2012.
- 4- Modern Control Engineering – Katsuhiko Ogata, 2010.
- 5- Control Systems Engineering – Norman S. Nise, 2015.
- 6- Fuzzy Logic with Engineering Applications – Timothy J. Ross, 2010.
- 7- Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Klir & Yuan, 1995.

4-5 الأوراق العلمية:

- 1- Load Frequency Control using Fuzzy Logic Controller – 2012.
- 2- Automatic Generation Control of Hydro Power Plants – 2015.
- 3- Comparison of PI, PID and Fuzzy Controllers for LFC – 2018.