POSITION AND FORCE CONTROL OF ELECTRO-HYDRAULIC SERVO SYSTEM WITH EXPERIMENTAL VERIFICATION

By

Mohamed El- Sayed Mahmoud Essa

A Thesis Submitted to the
Faculty of Engineering at Cairo University
in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

In

Electrical Power and Machines Engineering

FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY
GIZA, EGYPT
2018

POSITION AND FORCE CONTROL OF ELECTRO-HYDRAULIC SERVO SYSTEM WITH EXPERIMENTAL VERIFICATION

By

Mohamed El- Sayed Mahmoud Essa

A Thesis Submitted to the
Faculty of Engineering at Cairo University
in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

In

Electrical Power and Machines Engineering

Under the Supervision of

Prof. Dr. M. A. Moustafa Hassan
.....
Professor of Control of Power Systems
Electrical Power and Machines Dept.
Faculty of Engineering, Cairo University

Prof. Dr. Magdy A. S. Aboelela
.....
Professor of Automatic Control
Electrical Power and Machines Dept.
Faculty of Engineering, Cairo University

Prof. Dr. Saber M. Abdraboo
.....
Professor of Automatic control &System Dynamics
Mechanical Engineering Dept.
Shoubra Faculty of Engineering, Benha University

FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY
GIZA, EGYPT
2018

POSITION AND FORCE CONTROL OF ELECTRO-HYDRAULIC SERVO SYSTEM WITH EXPERIMENTAL VERIFICATION

By

Mohamed El- Sayed Mahmoud Essa

A Thesis Submitted to the
Faculty of Engineering at Cairo University
in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

In

Electrical Power and Machines Engineering

Approved by the
Examining Committee

_____
Prof. Dr. M. A. Moustafa Hassan, Thesis Main Advisor

_____
Prof. Dr. Magdy A. S. Aboelela, Member

_____
Prof. Dr. Saber M. Abdraboo, Member

_____
Prof. Dr. Ahmed M. Fahim Saker, Internal Examiner

_____
Prof. Dr. Abdel Halim Mahmoud Bassiuny, External Examiner
- Prof. of Mechatronics and Control, Faculty of Engineering at Helwan, Helwan University

FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY
GIZA, EGYPT
2018

Engineer's Name: Mohamed El Sayed Mahmoud Essa
Date of Birth: 23/ 5/ 1988
Nationality: Egyptian
E-mail: mohamed.essa@iaet.edu.eg
Phone: 01155501618/ 01004186894
Address: El lebeiny St., Fysal, Giza

Registration Date: 1 /10/ 2014
Awarding Date: …./…./……..
Degree: Doctor of Philosophy
Department: Electrical Power and Machines Engineering

Supervisors:

Prof. M. A. Mustafa Hassan
Prof. Magdy A. S. Aboella
Prof. Saber M. Abdraboo

Examiners:

Prof. Abdel Halim M. Bassiuny (External examiner)
Prof. Ahmed M. Fahim Saker (Internal examiner)
Prof. M. A. Moustafa Hassan (Thesis main advisor)
Prof. Magdy A. S. Aboelela (Member)
Prof. Saber M. Abdraboo (Member)

Title of Thesis:

Position and Force Control of Electro-Hydraulic Servo System with Experimental Verification

Key Words:
Electro Hydraulic Servo System; Model Predictive Control; Cuckoo Search Algorithm; Genetic Algorithm; Fuzzy Logic Controller.

Summary:

This thesis presents the investigation of experimental hardware electro hydraulic servo system based on control strategies and optimization techniques. The designed control strategies are classical, fractional order controllers, fuzzy logic controllers and model predictive controllers. In addition, the used optimization techniques to tune the parameters of studied control strategies are Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization and Cuckoo Search Algorithm. The priority of applying hybrid and switching model predictive controllers for position and force control respectively in the studied electro hydraulic servo system.

الملخص

تستخدم الأنظمة الكهروهيدروليكية فى نطاق واسع من التطبيقات الصناعية وذلك للتحكم فى تتبع وضع الأسطوانة والقوة المؤثرة عليها بدقة عالية. ومن أمثلة هذه التطبيقات ، جهاز محاكاة الطيران، والحفارات الهيدروليكية، وآلات الحفر النفقي، والمكابس الهيدروليكية. أما بالنسبة للنظام المدروس فى هذه الرسالة فهو عباره عن نظام ميكاترونيك مقلد لماكينة ضغط هيدروليكية، وهى تعتمد على التحكم الآلي المصمم على أساس بطاقة الحصول على البيانات (NI- 6014) وكذلك تتألف أيضا من الأجزاء الميكانيكية والكهربائية والأجهزة الخاصة بعمليات القياس.

في هذه الرسالة تم عرض دراسة عن عمل نموذجين محاكاة للنظام أحدهما خطي والأخر غير خطي للتحكم فى الوضع والقوة لمكينة الضغط الهيدروليكية المقلدة. حيث أنه تم تنفيذ عملية تحديد الهوية للوضع والقوة للنظام المدروس باستخدام نموذج الاستدلال الضبابى المتكيف العصبى (ANFIS) والنموذج الخطي (ARX). وبالإضافة إلى ذلك، فى هذا البحث يتم عرض تصميم استراتيجيات التحكم الكلاسيكية والتحكم الكسرى والتحكم النسبى التفاضلى الضبابى و والتحكم النسبى التفاضلى الكسرى الضبابى واستراتيجية جديدة مبتكرة (NG- ANFIS) ونموذج التحكم التنبؤي النموذجى. وعلاوة على ذلك، تم استخدام خوارزميات سرب الجسيمات الامثل المعدل والخوارزمية الجينية وخوارزمية بحث الوقواق للعثور على المعاملات المثلى لاسترتيجيات التحكم المقترحة. مع العلم أنه تم تنفيذ الدراسة عن طريق نماذج المحاكاة أولا، ثم التحقق معمليا لهذه النتائج من خلال النظام الكهروليكى المحاكى لماكينة الضغط. وفى النهاية أظهرت نتائج المحاكاة والنتائج التجريبية أن طريقة ال (ANFIS) استطاعت تمثيل النظام فى شكل نموذج بنسبة 99% للوضع و 92% للقوة وكذلك أظهرت النتائج بأن التحكم التنبؤى الخليطى النموذجي بالنسبة للتحكم فى الوضع والانتقالى للقوة يمتلك أفضل نتائج لمعايير الأداء المطلوبة مقارنة باستراتيجيات التحكم الأخرى بحيث أنه أستطاع أن يعطى متوسط زمن الثبات بحوالى 0.75 ثانية ومتوسط زمن ارتفاع حوالى 0.45 ثانية ومتوسط النسبة المئوية للتخطى حوالى 1%. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام إشارات اختبار مختلفة (موجة جيبية ومتعددة المراحل ومربعة) للتحقق من كفاءة استخدام التحكم التنبؤى النموذجى في هذا المجال. وفي هذه الحالة، تظهر النتائج أيضاً أنه لديه سلوك تتبع جيد مع هذه الاشارات بمتوسط درجة التقارب بحوالى 95%. بالاضافة الى ذلك تم دراسة تغير بعض عوامل النظام وكذلك تأثير اشارات الازعاج على اداء التحكم التنبؤى المقترح وأظهرت النتائج قدرته على التغلب على هذه التغيرات. ونتيجة لذلك، فإن التحكم التنبؤى النموذجى الخليطى والانتقالى يكونوا لهم الأولوية في تطبيقهم على نظام الضغط الكهروهيدروليكي المدروس فى هذه الرسالة.

وتحتوى الرساله على سته أجزاء مقسمة كالتالى:

الفصل الاول: ويحتوى على ملخص للأبحاث السابقة ومناقشتها ومعرفة أوجه قوتها وضعفها ويحتوى كذلك على نظرة عامة عن الرسالة وأهدافها والاسهامات المنفذة.

الفصل الثانى: ويتناول بالشرح كيفيه عمل محاكاه لنظام هيدروليكى و تجهيزه معمليا لاجراء عملية بناء نموذج معمليا للنظام.

الفصل الثالث: يقدم وصفاً مختصراً عن استراتيجيات التحكم المنفذة والطرق المستعملة لايجاد افضل معاملات لهذه الاستراتيجيات.

الفصل الرابع: ويعرض النتائج في صورة أشكال و جداول سواء كانت نتائج نظام محاكاة رياضي أو لنظام هيدروليكى معملي.

الفصل الخامس: ويقدم مناقشة للنتائج التى تم الحصول عليها معملياً او عن طريق المحاكاه ويعرض مناقشة لنتائج اختبار النظام فى حالة تغير عوامل النظام أو تعرضه لاشارات الازعاج.

الفصل السادس: ويستخلص هذا الفصل خاتمة موجزة عن هذا البحث واقتراحات مستقبلية .

بالاضافة الى ذلك، تحتوى الرسالة على قائمه بالمراجع والابحاث المنشورة والقابلة للنشر من الرسالة وملحقين.

الاستنتاجات والاعمال المستقبليه

من خلال النتائج النظرية والمعملية التى تم الحصول عليها من نظام كهروهيدروليكى لماكينة ضغط صناعية مقلدة وبناءاً على مقاييس معينة لاداء استراتيجيات التحكم المصممة فقد تبين جودة استخدام التحكم التنبؤى النموذجى للوضع والقوة (الخليط للوضع والانتقالى للقوة) عن باقى المتحكمات المنفذة فى الرسالة وذلك يرجع لطبيعه النظام الهيدروليكى غير الخطية وقدرته على التنبؤ باشارة التحكم المطلوبة والمناسبة. وبالاضافة الى ذلك يوجد العديد من الأعمال المستقبلية التى تجعل النظام الهيدروليكى لمكينة الضغط المقلدة أكثر جودة وافضل أداء عن طريق أخذ الاعتبارات الاتيه:

- تطبيق استراتيجيات التحكم التى تم تصميمها فى الرسالة على نظام هيدروليكى أخر مثل ماكينة اختبار المواد لمعرفة كفاءة هذه المتحكمات مع النظام الجديد.
- دراسة المشكلة الخاصة بتوفير الطاقة فى مجال الهيدروليك.
- تنفيذ متحكمات ذات التظبيط الحى وتطبيقها على هذا النظام.
- تنفيذ نموذج للمضخة وأخذه فى الاعتبار فى التصميم.
- تطوير و تنفيذ نظام هيدروليكى للعمل على الاشارات ذات الترددات العاليه.
- تصميم متحكمات عن طريق استخدام تقنيات التطور لدوال متعدده الهدف.
- دراسة الاستقرارية للنظام وتحليلها فى حالة الاستراتيجيات المصممة.

مهندس: محمد السيد محمود عيسى

تاريخ الميلاد: 23/ 5/ 1988

الجنسية: مصرى

تاريخ التسجيل: 1/ 10/ 2014

تاريخ المنح: ...\...\.....

القسم: هندسة القوى والالات الكهربية

الدرجة: دكتوراة الفلسفة

المشرفون:

ا.د محمد أحمد مصطفى حسن

ا.د مجدى عبد الغنى سليمان

ا.د صابر محمود عبد ربه

الممتحنون:

أ.د عبد الحليم محمود بسيونى (الممتحن الخارجي)

أ.د أحمد محمد فهيم صقر (الممتحن الداخلي)

أ.د محمد أحمد مصطفى حسن (المشرف الرئيسي)

أ.د مجدى عبد الغنى سليمان (عضو)

أ.د صابر محمود عبد ربه (عضو)

عنوان الرسالة:

التحكم فى الموضع والقوة لنظام كهروهيدروليكى مؤازر مع التحقيق المعملى

الكلمات الدالة:

الانظمة الهيدروليكية، التحكم التنبؤى النموذجى، تحكم قوى وموضعى، التحكم الضبابى، المحاكاة

ملخص الرسالة:

هذا البحث يقدم كيفية تنفيذ نظام تجريبى معملى لنظام كهروليكى مؤازر معتمد على استراتيجيات للتحكم وطرق تظبيط وافضلية. ومن هذه الانظمة الاستراتيجية الخاصة بالتحكم التى تم تصميمها فى هذا البحث هى التحكم التقليدى والكسرى والضبابى واستراتيجية مبتكرة معتمده على التكيف الضبابى وكذلك التحكم التنبؤى النموذجى وخليط كل من التحكم التنبؤى والتحكم التقليدى. أما بالنسبة لاساليب البحث عن الافضلية فهى الخوارزميات الجينية وسرب الجزئيات الامثل المعدل وخوارزميات بحث الوقواق. وبالاضافة الى ذلك فانه تم عمل نظام تحديد الهوية باستخدام اكثر من طريقة وأثبت النتائج المعملية والمحاكاة على الافضلية فى تطبيق التحكم التنبؤى النموذجى لهذا النظام الصناعى.

التحكم فى الموضع والقوة لنظام كهروهيدروليكى مؤازر مع التحقيق المعملى

اعداد

محمد السيد محمود عيسى

رسالة مقدمة إلى كلية الهندسة – جامعة القاهرة
كجزء من متطلبات الحصول على درجة

دكتوراه الفلسفة

في

هندسة القوى والآلات الكهربية

يعتمد من لجنة الممتحنين:

الاستاذ الدكتور: **محمد أحمد مصطفى حسن** المشرف الرئيسى

الاستاذ الدكتور: **مجدى عبد الغنى سليمان** عضو

الاستاذ الدكتور: **صابر محمود عبد ربه** عضو

الاستاذ الدكتور: **أحمد محمد فهيم صقر** الممتحن الداخلي

الاستاذ الدكتور:**عبد الحليم محمود بسيونى** الممتحن الخارجي

- استاذ الميكاترونيات والتحكم بكلية الهندسة بحلوان – جامعة حلوان

كليــة الهندســة - جامعــة القاهــرة
الجيـزة - جمهوريـة مصـرالعربيــة

2018

التحكم فى الموضع والقوة لنظام كهروهيدروليكى مؤازر مع التحقيق المعملى

اعداد

محمد السيد محمود عيسى

رسالة مقدمة إلى كلية الهندسة – جامعة القاهرة

كجزء من متطلبات الحصول على درجة

دكتوراه الفلسفة

في

هندسة القوى والآلات الكهربية

تحت اشراف

أ.د محمد أحمد مصطفى حسن
استاذ متفرغ بقسم هندسة القوى والآلات الكهربية
كلية الهندسة – جامعة القاهرة

أ.د مجدى عبد الغنى سليمان
استاذ متفرغ بقسم هندسة القوى والآلات الكهربية
كلية الهندسة – جامعة القاهرة

أ.د صابر محمود عبد ربه
استاذ بقسم الهندسة الميكانيكية
كلية الهندسة بشبرا – جامعة بنها

كليــة الهندســة - جامعــة القاهــرة

الجيـزة - جمهوريـة مصـرالعربيــة

2018

التحكم فى الموضع والقوة لنظام كهروهيدروليكى مؤازر مع التحقيق المعملى

اعداد

محمد السيد محمود عيسى

رسالة مقدمة إلى كلية الهندسة – جامعة القاهرة
كجزء من متطلبات الحصول على درجة

دكتوراه الفلسفة

في

هندسة القوى والآلات الكهربية

كليــة الهندســة - جامعــة القاهــرة
الجيـزة - جمهوريـة مصـرالعربيــة
2018

Acknowledgments

I want to thank **Allah** for his great plan for my life that always works towards my ultimate good and for his unconditional love.

I want to thank **Prof. Dr. M. A. Moustafa Hassan, Prof. Dr. Magdy A. S. Aboelela** and **Prof. Dr. Saber M. Abdraboo** for their encouragement, advises, support, patience and learning to accomplish this thesis.

I would like to thank **Prof. Dr. Abdel Kader A. Ibrahim** for his advises, encouragement and support to complete this thesis.

I want to thank **Dr. Ali El Gendy** for his advises and support to complete this work.

I would like to thank **Prof. Dr. Ahmed M. F. Saker** and **Prof. Dr. Abdel Halim Mahmoud Bassiuny** for their revision to the thesis.

I would like to thank my father, my mother, my brother and my sisters for their continuous support, encouragement and their unconditional love.

Special thanks for my wife, **Eng. Omnia Fikry Sayed** for her continuous support, her advises and revision the thesis.

I want to thank also **Dr. Mohamed Khalifa**, **Eng. Osama Abdel Tawab**, **Eng. M. Zekry Eng. Tarek Sabra, Eng. Ahmed Aboelftouh, Eng. Anas M. Thabet, Eng. Omnia Shawky, Eng. Samar Gamal, Eng. Islam Ahmed and Eng. Bassant** for their help and advices to complete this work.

Table of Contents

ACKNOWLEDGMENTS……i

TABLE OF CONTENTS……..…ii

LIST OF TABLES……..……..v

LIST OF FIGURES……vi

LIST OF ABBREVIATIONS……..……x

LIST OF SYMBOLS…….....xii

ABSTRACT…….……...xv

CHAPTER 1: INTRODUCTION AND LITERATURE REVIEW……...1

1.1 Introduction…...……1
1.2 Literature Review……...……..2
1.3 Main Contribution…….5
1.4 Thesis Outline...…….....8

CHAPTER 2: SYSTEM MODELING AND IDENTIFICATION……10

2.1 Introduction…….…...10
2.2 Description and Modeling of The Studied System ……..…….10
2.2.1 Hydraulic Cylinder Model……13
2.2.1.1 Pressure Dynamics Of Hydraulic Chamber……14
2.2.1.2 Load Equation……15
2.2.1.3 Piston Friction……..15
2.2.2 Servo Valve Model……...16
2.3 Mechanical Saturation……20
2.4 Experimental Test Rig ……..……20
2.5 System Identification……..22
2.6 Identification Methods……...25
2.6.1 ARX Model……..25
2.6.2 ANFIS Model……...27
2.7 Online Validation Test……...30
2.8 Summary……35

CHAPTER 3: CONTROL STRATEGIES AND DESIGN……36

3.1 Introduction……36
3.2 Proportional Integral Derivative (PID) Controllers……36
3.3 Fractional Order Controllers ($PI^{\lambda}D^{\delta}$) ……37

3.3.1 Realization of Fractional Order Controllers……...38
3.4 Fuzzy Systems……38
3.4.1 Fuzzy Logic Controllers……39
3.4.1.1 Fuzzy PD Controller……40
3.4.1.2 Fractional Order Fuzzy PD Controller……41
3.5 NG- ANFIS Controllers……42
3.6 Switching Controllers……43
3.7 Model Predictive Control (MPC) ……43
3.8 Hybrid MPC- PID……... ……46
3.9 Tuning Methods……47
3.9.1 Genetic Algorithm (GA) ……47
3.9.2 Modified Adaptive Accelerated Coefficient Particle Swarm Optimization (MAACPSO) ……50
3.9.3 Cuckoo Search Algorithm (CSA) ……...52
3.10 Summary……53

CHAPTER 4: APPLICATION OF CONTROL STRATEGIES……...54

4.1 Introduction……54
4.2 Modes of Control……54
4.2.1 Position Control……..54
4.2.2 Force Control…… .55
4.3 Types of Switching Modes……55
4.3.1 Hybrid Signal Control……55
4.3.2 Switching based on Logic Circuit……..55
4.3.3 Switching based on Time……...56
4.3.4 Switching based on ANFIS……56
4.3.5 Separate Switching……57
4.4 Simulation and Experimental Results……57
4.4.1 Genetic Algorithm Results……57
4.4.2 Modified Adaptive Accelerated PSO Results……63
4.4.3 MPCs Results……...68
4.4.3.1 MPC based Trial and Error Method……...68
4.4.3.2 MPC based CSA and GA……..……....74
4.5 Summary……83

CHAPTER 5: RESULTS AND DISCUSSION……84

5.1 Introduction……84
5.2 Discussion of Results……84
5.2.1 Discussion of Genetic Algorithm Results……..84
5.2.2 Discussion of MAACPSO Results……86
5.2.3 Discussion of MPC Results ……...88

5.2.3.1 MPCs based Trial and Error Method……...….88
5.2.3.2 MPCs based CSA and GA…….....….89
5.3 Sensitivity of Parameters……92
5.4 Disturbance Rejection……98
5.5 Summary……..……101

CHAPTER 6: CONCLUSION AND FUTURE WORK……..….102

6.1 Conclusion……102
6.2 Future Work……...103
REFERENCES……...…..104
PUBLICATIONS……..108
APPENDIX A……...109
APPENDIX B……113