



AIN SHAMS UNIVERSITY

FACULTY OF ENGINEERING

Electrical Power and Machines Engineering

Optimal Asset Management for Smart Grid Applications

A Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy In Electrical Engineering

(Electrical Power and Machines Engineering)

by

Mohamed Ibrahim Ahmed Abd RAhou

Master of Science in Electrical Engineering

(Electrical Power and Machines Engineering)

Faculty of Engineering, Ain Shams University, year 2010

Supervised By

Prof. Dr. Hossam El-Din Abdalla Talaat

Dr. Walid El- Khattam

Cairo - (2019)



AIN SHAMS UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING

Electrical Power and Machines

Optimal Asset Management for Smart Grid Applications

by

Mohamed Ibrahim Ahmed Abd Rabou

Master of Science in Electrical Engineering

(Electrical Power and Machines Engineering)

Faculty of Engineering, Ain Shams, 2010

Examiners' Committee

Name and Affiliation	Signature
Prof. Mousa Awdalla Abdalla Electrical Power and Machines , Benha university	
Prof. Ibrahim Aldesouky Helal Electrical Power and Machines , Ain shams University	
Prof. Hossam El Din Talaat Electrical Power and Machines , Ain shams University	

Date:

Statement

This thesis is submitted as a partial fulfilment to the requirements Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Engineering, Faculty of Engineering, Ain shams University.

The author carried out the work included in this thesis, and no part of it has been submitted for a degree or a qualification at any other scientific entity.

Mohamed Ibrahim Ahmed Abd Rabou

Signature

.....

Date:

Researcher Data

Name : Mohamed Ibrahim
Ahmed Abd Rabou

Date of birth : 05/12/1973

Place of birth : Khanka / Qalubia

Governorate.

Last academic degree : Masters of Science

Field of specialization : Electrical Power Engineering

University issued the degree: Ain Shams University

Date of issued degree : 2010

Current job : Head of Quality
Management at Energy
Management at Siemens
Egypt

Optimal Asset Management for Smart Grid Applications

الإدارة المثلى للأصول لتطبيقات الشبكة الذكية.

ملخص

تعتبر إدارة الأصول واحدة من أهم القضايا في صناعة الطاقة الكهربائية لأنها واحدة من متطلبات الشبكة الذكية. إن الطرق التقليدية لإيجاد دالة معدل الخطر للمحولات تستخدم طرق النمذجة المبينة على البيانات المسجلة للمعدة باستخدام منهج تخطيط الأخطار (HPA) بواسطة دوال مختلفة: التوزيع الطبيعي ، التوزيع اللوغاريتمي ، توزيع ويبل ، صغر توزيع القيمة القصوى.

في هذه الرسالة تم اقتراح طريقة جديدة لتطوير أفضل نموذج لدالة معدل الخطر للمحولات باستخدام دالة متعددة الحدود مبنية على الشبكات العصبية الاصطناعية مع أقل خطأ، وإجراءات تطبيق المنهجية المقترحة بسيطة، وجودة النتائج التي تم الحصول عليها تضمن كفاءة تطبيق هذه المنهجية لتوقع وقت العطل للمحول.

يتم استخدام المعادلة متعددة الحدود المتقدمة لتقدير دالة الكثافة الاحتمالية (PDF) ، ودالة التوزيع التراكمي (CDF). تم تصميم تكاليف دورة الحياة (LCC) على شكل دالة توقع معتمدة على معدل الخطر

وتكلفة الغرامة المتوقعة وهي دالة في الكمية المتوقعة للطاقة غير الموردة للمستهلك (EENS).

تم افتراض ثلاث تكوينات لمحطة المحولات تحت الدراسة للتحقق من صحة الخوارزم المقترح: محولان مستقلين ، محولان مع رابط للقضبان ، وثلاث محولات مع رابطان للقضبان . وكذلك تم افتراض أن المحطة الفرعية تحت الدراسة تغذي أنواع ثلاثة من الأحمال: الحمل التجاري ، الحمل الصناعي والحمل السكني، بحيث يدرس تأثير كل حمل على حدة. تم تقويم تكلفة دورة الحياة المناظرة لكل حالة دراسة بعد حساب تكاليف الغرامة المناظرة لحالة الانقطاع. وتقترح النتائج التي تم الحصول عليها من الدراسة العمر الأمثل لتجديد محولات المحطات الفرعية لكل حالة للحصول على أقل تكلفة لدورة حياة المحطة.

الهدف من هذا البحث هو اقتراح منهجيات جديدة ذات صلة لتحسين إدارة أصول المعدات. أول تركز المنهجية لنمذجة معدل الخطر وظيفية تقوم على الذكاء الاصطناعي. هذا الاختيار يعتمد على السمة غير الخطية للبيانات التاريخية للمعدات الفشل. المنهجية الثانية مكرسة للنمذجة إدارة تكلفة دورة حياة المحول (LCC) في شكل وظائف الاحتمال. نموذج معدل الخطر الجديد سيكون جزء من مكونات LCC. الطاقة غير الموردة ستكون تكلفة الجزء أيضًا أحد مكونات LCC. هذا النهج يتيح تلبية مستوى موثوقية.

الفصل الأول يمثل مقدمة أطروحة بما في ذلك وصف المشكلة ، الدافع البحثي والهدف الاطروحة.

الخلفية النظرية واستعراض الأدبي في الفصل الثاني طبيعة المشكلة هي أولاً تعريف نماذج تكلفة دورة الحياة المستخدمة في الابحاث السابقة ، بعد ذلك ، شملهم الاستطلاع. وأخيرا ، ملخص مبادئ العصبية الاصطناعية ملخص شبكة الخلية العصبية .

الفصل الثالث يقدم المنهجية المقترحة للخطر نمذجة وظيفة معدل الفشل الذى يعتمد على بيانات فشل المحولات التاريخية. وتستند هذه المنهجية على تدريب شبكة عصبية اصطناعية (ANN) لتحقيق أفضل النتائج تعيين بيانات الفشل المخزنة. ثم ، معادلة رياضية تم تطويره ليناسب ANN.

يخصص الفصل الرابع لنمذجة تكلفة دورة الحياة. وصف مفصل لكل مكون من مكونات نموذج LCC المعتمدة. الخطر والاحتمال تستمد الوظائف من وظيفة معدل الخطر كما هو مطلوب من قبل تعريف LCC. ومثالا لمحطة فرعية تعتبر حالة دراسة مع ثلاثة تكوينات مختلفة. الأمثل لل LCC لثلاثة أنماط تحميل ، يتم الحصول عليها ومقارنتها LCC التقليدية.

يعرض الفصل (5) استنتاجات ونتائج العمل ، وتوصيات للبحث في المستقبل.

Optimal Asset Management for Smart Grid Applications

ABSTRACT

Asset management is now one of the most important issues in the electrical energy industry since it is one of the requirements of smart grid. The conventional way of forming the hazard rate function of transformers applies the best modeling based on the history data using Hazard Plotting Approach (HPA) under different functions: Normal Distribution, Lognormal Distribution, Weibull Distribution, and Smallest Extreme Value Distribution.

In this thesis, a new method is proposed to develop the best modeling using Artificial Neural Network- based polynomial model with minimum error to represent the hazard rate function of the power transformers. The procedure of applying the proposed methodology is simple. The quality of the obtained results ensures the adequacy of applying this methodology for expecting the failure age of the transformer.

The developed polynomial equation is used to estimate the Probability Density Function (PDF), and Cumulative Distribution Function (CDF). The Life Cycle Cost (LCC) is

modeled in the form of expectation function based on the hazard rate and the expected penalty cost, which is a function of the Expected Energy Not Supply (EENS).

Three substation configurations have been assumed to check the validity of the proposed algorithm: two standalone transformers, two transformers with bus coupler, and three transformers with two bus couplers. The studied substation is assumed to supply a commercial load, an industrial load or a residential load, one at a time. The LCC is evaluated for the considered case studies after calculating the penalty cost corresponding to each case study which is calculated from the energy not served. The results obtained from the study propose the optimum age of renewing the transformers of the substations which yields the minimum value of LCC.

KEYWORDS: Life Cycle Cost (LCC), Hazard Rate Function,

CONTENTS

ABSTRACT	VIII
CONTENTS	X
LIST OF FIGURES	XIII
LIST OF TABLE	XVI
LIST OF ABBREVIATIONS	XVII
ACKNOWLEDGEMENT.....	XVIII
CHAPTER 1.....	1

INTRODUCTION

1.1 General	1
1.2 Research Motivation	2
1.3 Thesis Objective	2
1.4 Outline of the Thesis	3
CHAPTER 2.....	5

LITERATURE REVIEW

2.1 Introduction	5
2.2 Life Cycle Cost (LCC)	9
2.3. Product Lifetime Data Statistical Analysis	21
2.3.1 Failure Probability Density Function (PDF)	21
2.3.2 Cumulative Distribution Function (CDF)	21
2.3.3 Reliability Function R (t)	22
2.3.4 Hazard Rate Function	22
2.3.5 Cumulative Hazard Function	27
2.4. Net Present Value (NPV).....	28
2.4.1 Discounted Cash Flow	28
2.4.2 Future Value VS present Value	29
2.5. ANN "Artificial Neural Network".	30
2.5.1 What is the ANN?	30

2.5.2 Justifications for the use of neural networks	30
2.5.3 Traditional Computers vs ANNs.....	31
2.5.4 Models of ANN.....	32
2.5.5 Feed-Forward Neural Network (FFNN)	33
2.5.6 Feedback Neural Network.....	35
2.5.7 The Back-Propagation Algorithm [56]	36
CHAPTER 3	38

POWER TRANSFORMER HAZARD RATE MODELLING

3.1. Introduction	38
3.2. Conventional Hazard Rate Modelling.....	38
3.2.1. Field Data Collection & Arrangement:.....	39
3.2.2. Convert the Arranged Data To Graph	44
3.2.3. Conventional Hazard Modelling	44
3.2.4. K-S Goodness of Fit Test	48
3.3. Proposed Modelling Hazard Function Methodology	50
3.3.1. Motivation	50
3.3.2. Proposed Methodology	50
3.3.3. Role of Artificial Neural Network	51
3.3.4. Role of the Mathematical Equation	52
3.4. Case study	53
3.4.1. System Description and Field Data	53
3.4.2. Data Preparation	55
3.5. Results	57
3.5.1. Developing ANN Hazard Model.....	57
3.5.2. Effect of ANN Training Algorithm	57
3.5.3. Emulation of the ANN Model by a Describing Equation	59
3.5.4. ANN Model Versus Polynomial Models.....	62

3.5.5. ANN-based Polynomial Model Versus Conventional Models	64
3.6. CONCLUSION	66
CHAPTER 4.....	68
LIFE CYCLE COST MODELLING AND CASE STUDY	
4.1 . Introduction	68
4.2 . LCC Proposed Modelling	68
4.3 . Developing Hazard and Probability Functions.....	72
4.4 . Case Study.....	74
4.4.1 General Data	74
4.4.2 Assumptions	75
4.4.3 Substation Configurations.....	76
4.4.4 Daily Load Curve.....	79
4.4.5 Expected Energy Not Supplied.....	81
4.4.6 The binomial probability distribution.....	82
4.4.7 Expectation of Energy Not Served (EENS)	89
4.5 RESULTS.....	91
4.5.1 LCC for Substation supplying Commercial Load.....	92
4.5.2 Sensitivity Analysis	95
4.5.3 LCC for Substation supplying Industrial Load.....	100
4.5.4 LCC for Substation supplying Residential Load.....	103
CHAPTER 5.....	107
CONCLUSIONS	
REFRANCES.....	110

LIST OF FIGURES

CHAPTER 2

Figure 2- 1 Transformer's failure factors, Netherlands ..	6
Figure 2- 2 Transformer's failure factors, Hartford US.....	7
Figure 2- 3 Transformer's operation stress and aging relationship ...	8
Figure 2- 4 Transformer's lifetime estimation	9
Figure 2- 5 A Substation's health criteria	14
Figure 2- 6 Basic structure of life cycle cost (LCC) calculations.....	15
Figure 2- 7 Life Cycle Cost for the transformer	17
Figure 2- 8 Cost composition scheme	19
Figure 2- 9 A single neuron.....	33
Figure 2- 10 An example of feedforward neural network	35
Figure 2- 11 An example of feedback neural network	36

CHAPTER 3

Figure 3- 1The conventional hazard function modelling steps	39
Figure 3- 2 (a) Singly Right-Time Censored Data, (b) Multiply Right-Time Censored Data	41
Figure 3- 3 Collected field data history categorization.....	42
Figure 3- 4 Steps of Developing Hazard Model Using Conventional Methods.....	44
Figure 3- 5 Proposed ANN-based Polynomial Hazard Modelling	51
Figure 3- 6 ANN fitting using MATLAB model	52
Figure 3- 7 The number of transformers installed in UK Grid during 1952 through 2008.....	54
Figure 3- 8 Power Transformer Number of Failures in UK Grid during 1952 to 2008.....	55
Figure 3- 9 Transformer Exposed Number (in-service) during 1952 through 2008.....	55
Figure 3- 10 The relation between transformer hazard $h(i)$ and transformer age	56
Figure 3- 11 Performance of the ANN Hazard Model under Levenber-Marquardt algorithm.....	58
Figure 3- 12 Performance of the ANN Hazard Model under Scaled conjugate gradient algorithm.....	59
Figure 3- 13Performance of the ANN Hazard Model under Bayesian Regularization algorithm.....	59
Figure 3- 14 ANN curve fitting under polynomial equation.....	61

Figure 3- 15 ANN Curve fitting under exponential equation.....	62
Figure 3- 16 Developing Three Hazard Models	63
Figure 3- 17 Hazard Functions developed from conventional methods and proposed method	65
Figure 3- 18 Hazard functions developed from conventional methods and proposed method	66

CHAPTER 4

Figure 4- 1 Proposed LCC composition scheme	69
Figure 4- 2 Developed probability density function (PDF)	73
Figure 4- 3 Cumulative Distribution Function (CDF)	74
Figure 4- 4 Configuration#1 - two standalone transformers	77
Figure 4- 5 Configuration#2 - Two transformers with a BC.....	78
Figure 4- 6 Configuration#3 - Three-transformers with two BCs.....	79
Figure 4- 7 Commercial load duration curve under.....	79
Figure 4- 8 Industrial Load duration curve	80
Figure 4- 9 Residential Load duration curve	80
Figure 4- 10 Daily load duration curve model	81
Figure 4- 11 The probability of 2 transformers UP	84
Figure 4- 12 The probability of 1 transformer UP and 1 Down	84
Figure 4- 13 The probability of 2 transformers Down.....	85
Figure 4- 14 The sum of three items of equation (4- 13).	85
Figure 4- 15 The probability of 3 transformers UP	87
Figure 4- 16 The probability of 2 transformer UP and 1 Down	87
Figure 4- 17 The probability of 1 transformer UP and 2 Down	88
Figure 4- 18 The probability of 3 transformer Down	88
Figure 4- 19 sum of the four items of equation (4- 13).....	89
Figure 4- 20 LCC for configuration #1 with commercial load	92
Figure 4- 21 LCC without action and with action for configuration #2 Commercial load.....	93
Figure 4- 22 LCC without action and with action for configuration #3 Commercial load.....	93
Figure 4- 23 LCC cost without action and with action versus the penalty cost LE. /kWh.....	96
Figure 4- 24 LCC cost without action and with action versus the Interest rate	97
Figure 4- 25 LCC cost with action versus mobile substation rent rate	98
Figure 4- 26 Optimum Renewing year versus penalty cost variation	99
Figure 4- 27 Optimum Renewing year versus interest rate variation	99

Figure 4- 28 Optimum Renewing year versus mobile substation rental cost variation	100
Figure 4- 29 LCC for configuration#1 with industrial Load.....	101
Figure 4- 30 LCC for configuration#2 with industrial Load.....	102
Figure 4- 31 LCC for configuration#3 with industrial Load.....	102
Figure 4- 32 LCC for configuration#1 with Residential Load	104
Figure 4- 33 LCC for configuration#3 with residential Loads.....	104
Figure 4- 34 LCC for configuration#3 with residential Loads.....	105