ACKNOWLEGMENT

I wish to express my profound gratitude and thanks to Assoc. Prof. Dr. Worawit TAYATI, my advisor, and chairperson of the thesis examination committee for his invaluable guidance, constructive suggestions and constant encouragement throughout this piece of work. His generous support, enthusiasm and understanding made this study a success and rewarding experience to me. I also wish to express my deep sense of gratitude and profound thank to Mr. Warit RATTANACHUEN, my co-advisor for his constant support, guidance and suggestions to the present work.

Sincere thanks are due to Dr. Suthep LERTSRIMONGKOL, who guide me in the capacity of academic advisor throughout the study period at Chiang Mai University (CMU), and also to Assoc. Prof. Yongyoot JAIBOON, who kindly agreed to serve as a logging, registrations and others with their staffs and colleagues. Their great help and suggestions were invaluable.

My heartfelt sincere thanks go to Mr. Khamphone SAIYASANE, the general manager of Electricité du Laos who encouraged me to go for postgraduate studies. Also to all executive board directors of Electricité du Laos, who helped me in numerous ways to make this study a success.

I am deeply indebted to Electricité du Laos (EDL), Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), CMU, for granting me an invaluable opportunity by way of a full scholarship, which paved the way to achieve my academic goal and completed this piece of work.

And also, Thanks are due to Mr Akrapong BUNNAG programmer and his colleague for their great support in the field of software and program. Thanks to all parties that contributed to this piece of work completion.

No words can ever express my deepest gratitude to my wife, my children and all my friends and colleagues for their support. To them I humbly dedicate this piece of work.

Phoummy NETIBANEDITH

Thesis Title Generator Maintenance Scheduling for Hydro Power System

Author Mr. Phoummy Netibanedith

Degree Master of Engineering (Electrical Engineering)

Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr. Worawit Tayati

ABSTRACT

Hydro power stations are installed in almost all power system. In the power system with hydro power station the operation planners are concerned with the hydro station characteristics. Practically, some are neglected in maintenance scheduling problem because they are not the major constraints in most systems. However, the pure or dominant hydro system, the problem is different. Neglecting some hydro characteristics may result in an inappropriate plan. This paper proposes an integrated maintenance scheduling and production planning algorithm for generator maintenance scheduling of a hydropower system. All hydropower characteristics and constraints are taken into account in maintenance scheduling problem. The studied power system is connected with its neighboring systems for power exchanges. The objective of this method is to optimize water value or revenue of the hydro power system with standard reliability constraints. The maximum and minimum reservoir operating curves are first determined from hydrological statistics. Then the limited energy of each sub-period is calculated. After that a three step search is used to find the maximum revenue maintenance schedule. The water value is evaluated according to import and export tariffs. The maximum and minimum reservoir operating curves, the general maintenance constraints and the minimum reliability level are taken into consideration. Based on the proposed method, a computer program is developed and tested with a case study, an existing Electricité du Laos (EDL) Region I hydro power system. The results confirm the proposed method gives a better maintenance schedule compared with the maintenance schedule employed by EDL. The system revenue increase of up to 20 % is achieved while the reliability is still within EDL standard.

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การกำหนดแผนบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าพลังน้ำ

ผู้เขียน Mr. Phoummy Netibanedith

ปริญญา วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. วรวิทย์ ทายะติ

บทคัดย่อ

ในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่มีโรงไฟฟ้าพลังน้ำติดตั้งอยู่ ซึ่งผู้วางแผนปฏิบัติการของระบบไฟฟ้าเหล่านั้นต้องคำนึงถึงคุณลักษณะเฉพาะของโรงไฟฟ้าพลังน้ำที่ติดตั้งอยู่ อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติแล้วการคำนึงถึงคุณลักษณะทั้งหมดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำจะเป็นการขยายขนาดของปัญหา ดังนั้นคุณลักษณะบางประการของโรงไฟฟ้าพลังน้ำจึงถูกละเลย เนื่องจากผลของการละเลยคุณลักษณะเหล่านั้นส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการวางแผนปฏิบัติการเพียงเล็กน้อยเมื่อโรงไฟฟ้าพลังน้ำไม่ใช่แหล่งผลิตพลังงานส่วนใหญ่ในระบบไฟฟ้า แต่ในระบบไฟฟ้าที่มีแต่โรงไฟฟ้าพลังน้ำหรือโรงไฟฟ้าพลังน้ำเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่แล้ว การละเลยคุณลักษณะบางประการจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของแผนปฏิบัติการผลิตไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการผสมผสานการกำหนดแผนบำรุงรักษาและการวางแผนปฏิบัติการผลิตไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่มีแต่โรงไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งคุณลักษณะและข้อจำกัดของโรงไฟฟ้าพลังน้ำจะถูกนำมาพิจารณาโดยสมมติฐานให้กำลังไฟฟ้าส่วนเกินจะส่งไปยังระบบไฟฟ้าข้างเคียง และกำลังไฟฟ้าส่วนขาดจะนำเข้าจากระบบข้างเคียงเช่นกัน เป้าหมายของการกำหนดแผนบำรุงรักษาและวางแผนการผลิตที่นำเสนอคือให้มีคุณค่าของน้ำสูงสุดหรือให้ระบบไฟฟ้าพลังน้ำมีรายได้สุทธิสูงสุดภายใต้มาตรฐานความเชื่อถือได้ที่กำหนด ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุดและต่ำสุดที่ควรเป็นในแต่ละเวลาจะถูกคำนวณเป็นลำดับแรก จากนั้นจะทำการแบ่งการบริหารอ่างเก็บน้ำออกเป็นช่วงเวลาย่อยเพื่อให้สอดคล้องกับช่วงเวลาเก็บกักน้ำและช่วงเวลาระบายน้ำ ซึ่งจะสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าจำกัดในแต่ละช่วงเวลาย่อยนั้นๆได้ หลังจากนั้นจึงค้นหาแผนบำรุงรักษาที่ให้รายได้สุทธิสูงสุดโดยมีขั้นตอนย่อยสามขั้นตอนเพื่อลดเวลาในการคำนวณ คุณค่าของน้ำจะถูกอ้างอิงจากอัตราค่าไฟฟ้าซื้อและขายกับระบบไฟฟ้าข้างเคียง ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุดและต่ำสุดที่ควรเป็น ข้อจำกัดด้านการบำรุงรักษา และความเชื่อถือได้ขั้นต่ำจะถูกพิจารณาเป็นข้อจำกัดในกระบวนการค้นหาแผนบำรุงรักษา

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งถูกพัฒนาด้วยวิธีการที่นำเสนอถูกนำไปทดสอบกับระบบไฟฟ้าเขตภาคกลางที่ 1 ของรัฐวิสาหกิจไฟฟ้าลาว ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับแผนบำรุงรักษาของรัฐวิสาหกิจไฟฟ้าลาว ให้รายได้สุทธิสูงขึ้นทุกกรณีและเพิ่มขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 20 และมีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดทุกกรณี

Table of Contents

Chapter	Title	Page
	Title page	I
	Acknowledgment	iii
	English Abstract	iv
	Thai Abstract	v
	Table of Contents	vi
	List of Tables	viii
	List of Figures	ix
	List of Abbreviation	xi
1	**Introduction**	
	1.1 Statement and significant of the problem	1
	1.2 Literature review	5
	1.3 Objective	7
	1.4 Scope of work	7
2	**Generator Maintenance Scheduling**	
	2.1. Objective of the Maintenance Scheduling	8
	2.1.1 Economic Objective	8
	2.1.2 Reliability Objective	10
	2.2 Generator Maintenance Scheduling Method	10
	2.2.1 Maintenance Scheduling by Levelized Reserve Method	11
	2.2.2 Maintenance Scheduling by Levelized LOLP	12
	2.2.3 Maintenance Scheduling by Levelized EUE	13
	2.2.4 Maintenance Scheduling with economical objective	14
	2.3 Constraint	16
	2.3.1 Maintenance Stage Constraints	16
	2.3.2 Continuity of Maintenance Activity	16
	2.3.3 Crew Constraints	16
	2.3.4 Multiple Times of Maintenance	17
	2.3.5 Minimum Reserve Capacity	17
	2.3.6 Reliability Index Criteria	18
	2.4 Searching Techniques	18
	2.4.1 Complete Enumeration Method	19
	2.4.2 Dynamic Programming	21
	2.5 Reservoir Operation	26
	2.6 Hydro system Production Planning	27
	2.7 Peak shaving method	28
	2.8 Hydro-thermal Coordination	28
3	**Proposed Method**	
	3.1 Reservoir Operation Planning	34
	3.2 Generation Planning Methodology	36
	3..2.1 First Step: Generate for must-run	38

3..2.2 Second Step: Generate to meet Minimum Release of each month 39
3..2.3 Third Step: Generation to meet water release in sub-period 40
3.3 Search Method for Maintenance Scheduling 43

4 Maintenance Scheduling Analysis of EDL Central-I Area Case Study

4.1 Generator data 46
5.1 Reservoir data 46
4.2.1 Reservoir Storage Data 46
4.2.2 Reservoir Operation Data 47
4.2.3 Head Function Data 47
4.2.4 Water Inflow Data 47
4.3 System Data 49
4.3.1 Hourly Load Forecast 49
4.3.2 Load profile twenty four hours 50
4.3.3 Power Exchange Data 56
4.4 Maintenance Data 56
4.4.1 EDL Maintenance Schedule 56
4.4.2 Allowable windows for maintenance 58
4.4.3 Maintenance Crew Constraints 59

5 Result and Discussion

5.1 Reduce Computation time 60
5.2 Case study results 63
5.2.1 Reserve capacity 63
5.2.2 Power Exchange 64
5.3 Analysis of Year 2002 Power System Performance 66
5.4 Analysis of the 12 Study Cases 69
5.4.1 Influence of Water Inflow 69
5.4.2 Influence of Load 70

6 Conclusions and Recommendations

6.1 Generator Maintenance Scheduling of EDL Region I Power System 72
6.1.1 Revenue 72
6.1.2 Reserve Capacity 72
6.2 Recommendations 72
6.2.1 Maintenance crew management 72
6.2.2 Generation Planning and Dispatching 72
6.2.3 Increasing Minimum Reserve 72

7 References 73

8 Appendices
Appendix A Software Algorithm 75
Appendix B Inflow Probability and Daily Load Profile 119
Curriculum Vitae 128

List of Tables

Table No.	Description	Page
1.1	Technical specification of hydropower station in region-I	3
1.2	Power System Development Plan	4
2.1	solving process of the example 2.1	21
4.1	Generator data	46
4.2	Reservoir storage Data	46
4.3	Reservoir Operation Data	47
4.4	Constant value for calculate the head	47
4.5	The probability inflow prediction of region-I system	49
4.6	Monthly peak load of Laos region-I system	49
4.7	Power Exchange Data	56
4.8	EDL Maintenance schedule	57
4.9	Allowable windows for maintenance	58
4.10	Maintenance crew constraints	59
5.1	Nam Ngum Dam 2002	66
5.2	Num Leuk Dam 2002	67
5.3	Comparison of the power exchanges and revenues	69
B 1.1	Inflow Probability of Nam Ngum Reservoir	120
B 1.2	Inflow Probability of Nam Leuk Reservoir	122
B 1.3	Inflow Probability of Nam Dong Reservoir	123
B 2.1	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for January	124
B 2.2	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for February	124
B 2.3	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for March	124
B 2.4	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for April	125
B 2.5	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for May	125
B 2.6	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for June	125
B 2.7	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for July	126
B 2.8	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for August	126
B 2.9	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for September	126
B 2.10	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for October	127
B 2.11	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for November	127
B 2.12	Daily Load Profile of EDL Central-I Area for December	127

List of Figures

Figure No.	Description	Page
1.1	Hydro Power System in Lao PDR	2
2.1	Maintenance scheduling by Levelized EUE	13
2.2	Algorithm of maintenance scheduling with economical objective	15
2.3	Problem case of the example 2.1	19
2.4	Complete Enumeration Method	20
2.5	Input-output characteristic for variable-head hydraulic plant	23
2.6	Interconnection system with hydraulically coupled hydroelectric plant	23
2.7	Trajectory combinations for coupled plants	24
2.8	successive approximation solutions	25
2.9	Upper rule curves	26
2.10	Lower rule curves	27
2.11	Hydroelectric plant component	29
2.12	Hydrothermal systems with hydraulic constraints	30
2.13	$\lambda - \gamma$ Iteration for Hydro thermal Scheduling	33
3.1	Initial operating rule curve	36
3.2	Generation planning flow chart for each reservoir	38
3.3	Flow chart of Generation to meet Minimum Release of each month	40
3.3	Flow chart of Generation to meet Minimum Release of each month (continue)	41
3.4	Generation to meet water Release in sub-period flow chart	42
3.4	Generation to meet water Release in sub-period flow chart(continue)	43
3.5	Search method of maintenance scheduling	45
4.1	Inflow probability of Num Ngum Reservoir	48
4.2	Inflow probability of Num Leuk Reservoir	48
4.3	Daily load profile of EDL Central-I Area for January	50
4.4	Daily load profile of EDL Central-I Area for February	50
4.5	Daily load profile of EDL Central-I Area for March	51
4.6	Daily load profile of EDL Central-I Area for April	51
4.7	Daily load profile of EDL Central-I Area for May	52
4.8	Daily load profile of EDL Central-I Area for June	52
4.9	Daily load profile of EDL Central-I Area for July	53
4.10	Daily load profile of EDL Central-I Area for August	53
4.11	Daily load profile of EDL Central-I Area for September	54
4.12	Daily load profile of EDL Central-I Area for October	54
4.13	Daily load profile of EDL Central-I Area for November	55
4.14	Daily load profile of EDL Central-I Area for December	55
5.1	Search algorithms from Figure 3.6	62
5.2	Three search steps	63
5.3	Daily minimum reserves	64
5.4	Daily power Exchange for the year 2002	65
5.5	Daily power Exchange for Jan -8,2002	65

5.6	The comparison of reservoir operation	67
5.7	The comparison of reservoir operation	68
5.8	Comparison of maintenance schedule	68
5.9	Effect of water inflow on revenue	70
5.10	Effect of water inflow on minimum reserve capacity	70
5.11	Effect of demand on revenue	71
5.12	Effect of demand on minimum reserve capacity	71
A.1	Program Flowchart	75
A.2	Calculate Water and Energy Limit	81
A.3	Head Function	85
A.4	Calculate Reservoir Limit	86
A.5	Search	89
A.6	Calculate Cost	101

List of Abbreviation

EDL	Electricité du Laos
PDR	People Democratic Republic

EGAT	Electricity Generating Authority of Thailand
CMU	Chiang Mai University
MW	Megawatt
GWh	Giga watt hours
URC	Upper rule curve
LRC	Lower rule curve
LOLP	Loss of load probability
EUE	Expected unserved energy