**Techno-Economical Investigation of Cogeneration Potential of**

**Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) Using a Double-Effect Absorption** **Chiller**

**By**

**Eng. Abdel-Rahman Ahmed Abdel-Wahid** **El-Sayed**

**A Thesis Submitted to the Faculty**

**of Engineering at Cairo University**

**in Partial Fulfillment of the**

**Requirements for the Degree of**

**MASTER OF SCIENCE**

**In**

**MECHANICAL POWER ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY**

**GIZA, EGYPT**

**2011Techno-Economical Investigation of Cogeneration Potential of**

**Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) Using a Double-Effect Absorption Chiller**

**By**

**Eng. Abdel-Rahman Ahmed Abdel-Wahid El-Sayed**

**A Thesis Submitted to the Faculty**

**of Engineering at Cairo University**

**in Partial Fulfillment of the**

**Requirements for the Degree of**

**MASTER OF SCIENCE**

**In**

**MECHANICAL POWER ENGINEERING**

**Under Supervision of**

 **Prof. Dr. Hany Ahmed Safy Eldin Khater Dr.** **Amr Aly M. Abdel-Rauof**

 **Mechanical Power Department Mechanical Power Department**

**Faculty of Engineering Faculty of Engineering**

 **Cairo University Cairo University**

**FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY**

**GIZA, EGYPT**

**2011**

**Techno-Economical Investigation of Cogeneration Potential of**

**Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) Using a Double-Effect Absorption Chiller**

**By**

**Eng. Abdel-Rahman Ahmed Abdel-Wahid El-Sayed**

**A Thesis Submitted to the Faculty**

**of Engineering at Cairo University in Partial**

**Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**MASTER OF SCIENCE**

**In**

**MECHANICAL POWER ENGINEERING**

**Approved by the**

**Examining Committee**

**Prof. Dr.** **Mahmoud Abdel Fattah El Kady Member**

**Prof. Dr.** **Abdel-Wahed El-Dib Member**

**Prof. Dr.** **Hany Ahmed Safy Eldin Khater Thesis Main Advisor**

**FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY**

**GIZA, EGYPT**

**2011**

**Engineer:** Abdel-Rahman Ahmed Abdel-Wahid El-Sayed



**Date of Birth:** 15 /08 /1981

**Nationality:** Egyptian

**E-mail:** eng\_abdelrahman\_ahmed@yahoo.com

**Phone:** 0100772005

**Address:** Kafr Quras, Ashmun, El-Menoufia

**Registration Date:** 01/10 /2005

**Awarding Date: / /**

**Degree:** Master Degree of Science

**Department:** Mechanical Power Engineering

**Supervisors:** Prof. Dr. Hany Ahmed Safy Eldin Khater

Dr. Amr Mohamed Ali Abdel-Raouf

**Examiners:** Prof. Dr. Mahmoud Abdel Fattah El Kady (Al-Azhar University)

Prof. Dr. Abdel-Wahed Foad El-Dib

Prof. Dr. Hany Ahmed Safy Eldin Khater

**Title of Thesis: Techno-Economical Investigation of Cogeneration Potential of**

 **Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) Using a Double-Effect**

 **Absorption Chiller**

**Key Words:** **PAFC;** **Absorption chiller; Cogeneration; Economic analysis**

**Summary:**

The objective of this study is to study a proposed model of cogeneration between phosphoric acid fuel cells (fuelled by CH4) and a double-effect absorption chiller, presenting a study of techno-economical analysis for some operating conditions of phosphoric acid fuel cell system such as; PAFC stack pressure, PAFC stack temperature, steam-to-carbon ratio used in fuel reforming processes, and PAFC current density considering four different fuel prices. This work is accomplished by using a computer program called Engineering Equation Solver (EES), this program was used to simulate a mathematical model of cogeneration system. The results of this study will be the optimum values of the last mentioned four operating conditions. Finally, these optimum values will give the minimum cost of electricity from the PAFC system and optimum values of outputs; electric power, refrigeration capacity, and useable high and low-grade heats based on one kmol/hr of CH4 feeds the PAFC system.

ACKNOWLEDGEMENT

*I hereby would like to express my deep and most grateful feelings towards my advisors. Special thanks to Prof. Dr. Hany A.S. Khater for his precious guidance and help. All the time he was there supporting and helping me with his experience and effort to complete this work in the best way.*

*Many thanks to Dr. Amr M.A. Abdel-Raouf for his great concern and his revision of this work. His great notes were of great impact on this work.*

*Finally, I cannot express; in words; my thanks and gratitude to my family for their great and continuous help and environment they provided to finish this work in a suitable form.*

ABSTRACT

More than 2500 fuel cell systems have been installed all over the world in hospitals, nursing homes, hotels, office buildings, schools, utility power plants - either connected to the electric grid to provide supplemental power and backup assurance for critical areas, or installed as a grid-independent generator for on-site service in areas that are inaccessible by power lines. Some fuel cell power generation systems in operation today achieve 40 percent fuel-to-electricity efficiency utilizing hydrocarbon fuels. Since fuel cells operate silently, they reduce noise pollution as well as air pollution and when the fuel cell is sited near the point of use, its waste heat can be captured for beneficial purposes (cogeneration) as in this work.  In large-scale building systems, these fuel cell cogeneration systems can reduce facility energy service costs by 20 % to 40 % over conventional energy service and increase efficiency to 85 percent or more.

In this study, Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) is analyzed and is mathematically modeled to investigate its potential of application in cogeneration to produce electric power, cooling, and heating at on-site application. Cogeneration of both electricity and heat using this type of fuel cells is studied and a comprehensive model is introduced to predict the required cost of electricity (COE) of the plant per kilowatt-hour (kWh). The overall system is composed of two subsequent systems; PAFC system and a double stage LiBr absorption chiller system. The components of the proposed PAFC system are steam ejector, steam reformer, high-temperature gas shift reactor, low-temperature gas shift reactor, PAFC stack, compressor, heat exchangers, and steam handling system. The absorption chiller is represented as a single component. Each component of the plant is separately modelled and then integrated with the rest of the plant. Fundamental concepts of thermodynamics, heat transfer and electrochemistry have been applied. Establishing a thermodynamic model using mass, energy, and species mass conservations develops the governing equations. The hydrogen (H2) that is produced by fuel processing can then be used to produce electricity via fuel cells. As well, activation, ohmic and concentration potential losses are considered in cell voltage calculations. The rejected heat from the PAFC stack is utilized in the absorption chiller to produce refrigeration capacity.

A computer program has been developed using the Engineering Equation Solver (EES) software supported with graphical user interface (GUI) to solve the set of simultaneous governing algebraic equations (Appendix A). Parametric studies are conducted over ranges of stack pressure, stack temperature, steam-to-carbon ratio, and current density. The proposed model can predict; with high accuracy; the performance of the proposed cogeneration system. It can predict the operating voltage, voltage losses, output electric power, output refrigeration capacity, net electric efficiency and cogeneration efficiency to investigate the optimum operating value of each parameter.

This cogeneration system improves the efficiency more than that of the PAFC system alone and it reaches about 95 %. The economic analysis can be evaluated by the cost of electricity (COE) in $/kWh and the annual money saving resulting from using an absorption chiller instead of an electrically driven chiller or using it separately. For the proposed system the COE is expected to be about 10.34, 12.46, 14.48, or 16.42 cent/kWh and the annual money saving is expected to be about 13800, 15700, 17300, or 19200 $/year depending on the fuel cost of 4, 6, 8, or 10 $/GJ, respectively.

**التقييم الفني الاقتصادي لنظام توليد مشترك بين**

**خلايا الوقود ذات الغشاء الفسفوري الحمضي و مبرد امتصاصي** **ذو مرحلتين**

**إعداد**

مهندس/ **عبدالرحمن أحمد عبدالواحد السيد**

**رساله مقدمه إلى كلية الهندسة، جامعة القاهرة**

**كجزء من متطلبات الحصول على درجة الماجستير**

**في هندسة القوى الميكانيكية**

**كلية الهندسة، جامعة القاهرة**

**الجيزة، جمهورية مصر العربية**

**2011**

**التقييم الفني الاقتصادي لنظام توليد مشترك بين**

**خلايا الوقود ذات الغشاء الفسفوري الحمضي و مبرد امتصاصي ذو مرحلتين**

**إعداد**

مهندس/ **عبدالرحمن أحمد عبدالواحد السيد**

**رساله مقدمة إلى كلية الهندسة، جامعة القاهرة**

**كجزء من متطلبات الحصول على درجة الماجستير**

**في هندسة القوى الميكانيكية**

**تحت إشراف**

|  |  |
| --- | --- |
| الدكتور/ **عمرو محمد على عبدالرؤف** | الأستاذ الدكتور/ **هاني أحمد صفى الدين خاطر** |
| قسم هندسه القوى الميكانيكية | قسم هندسه القوى الميكانيكية |
| كلية الهندسة، جامعة القاهرة | كلية الهندسة، جامعة القاهرة |

**كلية الهندسة، جامعة القاهرة**

**الجيزة، جمهورية مصر العربية**

**2011التقييم الفني الاقتصادي لنظام توليد مشترك بين**

**خلايا الوقود ذات الغشاء الفسفوري الحمضي و مبرد امتصاصي ذو مرحلتين**

**إعداد**

مهندس/ **عبدالرحمن أحمد عبدالواحد السيد**

**رساله مقدمه الى كلية الهندسة، جامعة القاهرة**

**كجزء من متطلبات الحصول على درجة الماجستير**

**في هندسه القوى الميكانيكية**

**يعتمد من لجنة الممتحنين**

|  |  |
| --- | --- |
| **عضو** | الأستاذ الدكتور/ **محمود عبدالفتاح القاضي** |
| **عضو** | الأستاذ الدكتور/ **عبدالواحد فؤاد عبده الديب** |
| **المشرف الرئيسي** | الأستاذ الدكتور/ **هاني أحمد صفى الدين خاطر** |

**كلية الهندسة، جامعة القاهرة**

**الجيزة، جمهورية مصر العربية**

**2011**

مهندس: عبدالرحمن أحمد عبدالواحد السيد



تاريخ الميلاد: 15/8/1981

الجنسية: مصري

تاريخ التسجيل: 1/10/2005

تاريخ المنح: / /

القسم: هندسة القوى الميكانيكية

الدرجة: ماجستير

المشرفون: أ.د هاني أحمد صفى الدين خاطر

 د عمرو محمد على عبدالرؤف

الممتحنون: أ.د محمود عبدالفتاح القاضي ( أستاذ متفرغ بهندسة الازهر)

 أ.د عبدالواحد فؤاد عبده الديب

 أ.د هاني أحمد صفى الدين خاطر

عنوان الرسالة: التقييم الفني الاقتصادي لنظام توليد مشترك بين خلايا الوقود ذات الغشاء الفسفوري الحمضي

 و مبرد امتصاصي ذو مرحلتين

**(الكلمات الدالة: خلايا وقود** **الحامض الفسفوري؛ مبرد امتصاصي؛ توليد مشترك؛ تحليل اقتصادي)**

ملخص البحث:

**الهدف من هذا البحث هو دراسة نموذج مقترح لمحطة توليد مشترك بين خلايا الوقود التي تعمل بحامض الفوسفوريك التي تستخدم غاز الميثان كوقود و مبرد امتصاصي ذو مرحلتين، مقدماً دراسة تحليل فنى اقتصادي لبعض ظروف تشغيل نظام خلايا الوقود مثل؛ ضغط ودرجة حرارة ونسبة بخار الماء المستخدم في تحويل الوقود وكثافة التيار الكهربائي لخلايا الوقود، معتبراً اربعة قيم مختلفة لسعر الوقود. وقد تم استخدام برنامج حل المعادلات الهندسية في انجاز نموذج رياضي يحاكى فيزيائيا ظروف عمل الخلية منفردة أو مدمجة في نظام التوليد مشترك بين خلايا الوقود و المبرد. وكانت نتائج هذه الدراسة هي أنسب القيم لهذه العناصر الأربعة المذكورة سابقاً. وفى النهاية، هذه القيم سوف تؤدى الى إنتاج الكهرباء بأقل تكلفة واعطاء أمثل المخرجات من النظام؛ الكهرباء والتبريد والحرارتين العالية والمنخفضة في درجات الحرارة الذى يمكن الاستفادة بهما بناءً على تغذية نظام خلايا الوقود بمقدار 1 كيلو مول/ساعه بغاز الميثان.**

ملخص البحث

تعتبر خلايا الوقود من المصادر الواعدة في مجال انتاج الطاقة لما تتميز به من ارتفاع في الكفاءة الحرارية مع انخفاض الانبعاثات الحرارية و الصوتية الضارة بالبيئة و الناجمة عن التفاعلات الداخلية بين الوقود و الهواء. كما أنها تتميز بسهولة التشغيل و يمكن توفيرها بقدرات متنوعة تلائم مختلف التطبيقات كتسيير السيارات و توليد الكهرباء خاصة في المناطق النائية الغير مرتبطة بالشبكة الكهربية. كما يمكن تشغيلها باستخدام انواع مختلفة من الوقود مما يساهم في سهولة انتشارها كتقنية جديدة في مختلف مواقع الانتاج.

ويقوم هذا البحث على دراسة نموذج مقترح لمحطة طاقة يمكن أن تولد كهرباء بواسطة خلايا الوقود التي تعمل بحامض الفوسفوريك (PAFC) التي تستخدم الغاز الطبيعي كوقود و تولد سعة تبريد بدمجها مع مبرد يعمل بنظرية الامتصاص- ذو مرحلتين وأيضا تولد حرارة. حيث يأخذ هذا النموذج في اعتباره دراسة المتغيرات المختلفة التي تؤثر على كفاءة النظام . وقد تم استخدام برنامج (EES) في انجاز نموذج رياضي يحاكى فيزيائيا ظروف عمل الخلية منفردة أو مدمجة في نظام التوليد مشترك بين خلايا الوقود و المبرد.

 هذا وقد قام الحل العددي بإلقاء الضوء على التأثيرات المتداخلة و المعقدة بين الكيمياء الكهربية و ميكانيكا الموائع وانتقال الحرارة على كل وحدة من وحدات المحطة . وقد تم استخدامه في دراسة تأثير عوامل التشغيل المختلفة على أداء هذا النوع من محطات الطاقة مثل الضغط، درجة الحرارة، نسبة بخار الماء المستخدم في خلط الوقود .... الخ. وتم عمل نموذج رياضي لحساب تكلفة توليد الطاقة الكهربية و ايجاد أنسب ظروف للتشغيل للحصول على أقل تكلفة ممكنة.