

حساب خسائر الأكسيري لمحطة قوى مشتركة

حميد حيدر هاشم ، د. أبو بكر أعويدات سالم *

1. المقدمة

بسبب الاستهلاك السريع للطاقة، أصبح الحفاظ على الطاقة (ترشيد الطاقة) من الأمور البالغة الأهمية. وللبدء في أي برنامج لترشيد الطاقة من الضروري تحديد نوعية الطاقة المفقودة بالإضافة إلى كميتها، لأن الطاقة لا تقيم على أساس كميتها فقط وإنما على نوعيتها أيضاً. وتقاس نوعية الطاقة بواسطة كمية الشغل الممكن استخراجها منها. وهو ما يعرف بالطاقة المتاحة أو الإكسيري Exergy

تتجه البحوث الحديثة في مجال محطات القوى الحرارية إلى اعتماد الإكسيري كأساس لإجراء الدراسات التحليلية، وذلك بتتبع الإكسيري عبر المكونات المختلفة للمحطة [1,2,3]. وبتقليص مدى للانعكاسية في أي من مكونات محطة القوى يمكن تحقيق زيادة في الكفاءة الإجمالية للمحطة. يُمكن تحليل الإكسيري (المبني على أساس القانون الثاني للديناميكا الحرارية) من حساب أقصى شغل ممكن توقعه من محطات القوى الحرارية، ويقاس بدقة الخسائر الحقيقية والموقع الصحيح لهذه الخسائر.

$$E_X = [(W_{CV})_X]^Y + E^Q + I^{CR} + E_Y \dots\dots(1)$$

حيث E_X إكسيري

السيريان الداخل (القدرة على إنتاج الشغل)، W_{CR} الشغل

الناتج الفعلي، E^Q الشغل الممكن إنتاجية Work

Potential من الحرارة المنقولة والذي يسمى أحياناً

الإكسيري الحراري Thermal Exergy ويساوي

$$E^Q = \int_X^Y ((T - T_o) / T) dQ \dots\dots(2)$$

حيث I^Q الشغل الضائع بسبب الانعكاسية الداخلية

يتضمن هذا البحث حساب خسائر الإكسيري (الشغل الضائع) بسبب الانعكاسية الداخلية و الشغل الضائع بسبب انتقال الحرارة إلى الجو في مختلف الإجراءات الحرارية عبر محطة القوى المشتركة.

تحليل الإكسيري EXERGY ANALYSIS

من دراسة السريان المستقر عبر حيز مراقبة

(Control Volume) ممتد بين نقطتين مستقرتي الحالة Y,X

ومحاط بيئية درجة حرارتها T_o ، كما مبينة في الشكل(1)،

فإن معادلة تدفق الإكسيري تكتب بالصيغة التالية [4]-:

الاسمية 125MW [5]. تتكون الخطة من دائرة ترينينية غازية مفتوحة و دورة ترينينية بخارية مغلقة بدون حرق إضافي بيانات الخطة موضحة على المخطط.

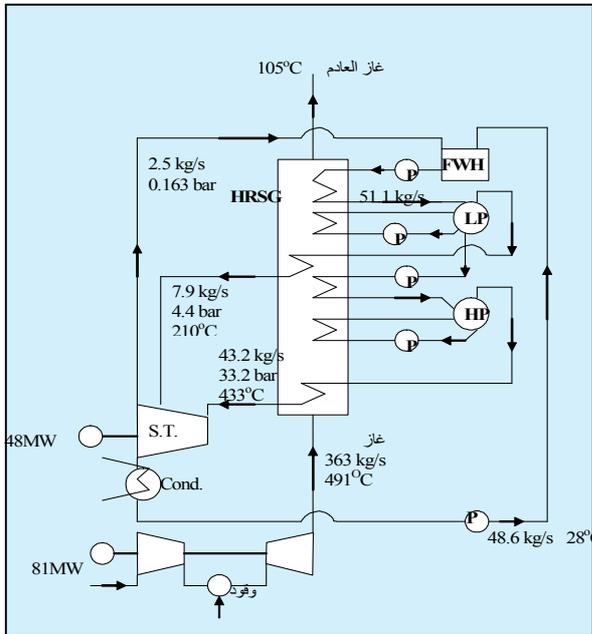
خسائر الإكسبرجي بسبب الانعكاسية في مكونات المحطة [4,1]

تتضمن خسائر الإكسبرجي حساب كل من I^{CR} ، I^Q لمكونات الخطة المشتركة كما يأتي:-

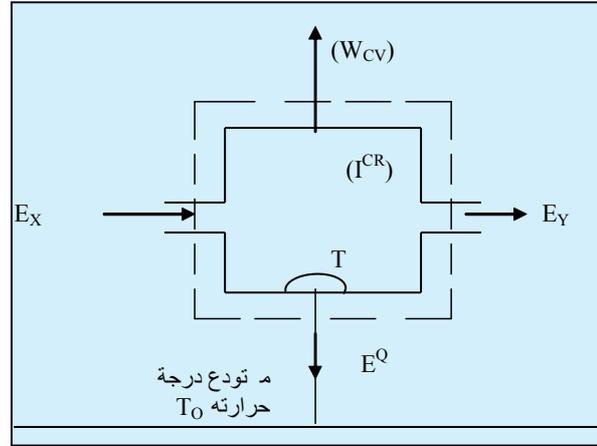
1- في الضاغط COMPRESSOR

الإجراء في الضاغط أدياتي، فتكون $I^Q=0$ أما I^{CR} فتحسب اعتماداً على المعادلة (3) و الأشكال (1,2).

$$I^{CR} = T_o (\Delta S^{CR}) = m_a T_o (S_2 - S_1) \quad \dots\dots\dots(5)$$



الشكل (2) مخطط محطة التوليد المشتركة



الشكل (1)

وتساوي:-

$$I^{CR} = T_o \Delta S_{CR} \dots\dots\dots(3)$$

حيث ΔS_{CR} كمية الانتروبي المتولدة Created Entropy داخل حيز المراقبة، E_Y إكسبرجي السريان الخارج.

إذا لم تستغل الحرارة المنقولة من حيز المراقبة إلى الخارج لإنتاج الشغل، بل ذهبت إلى الجو المحيط (لتوليد المزيد من الإنتروبي)، فعندئذ تصبح E^Q مساوية عددياً للكمية I^Q وهو الشغل الضائع (خسائر الإكسبرجي) بسبب اللانعكاسية الخارجية. و في هذه الحالة تصبح المعادلة (1) كما يأتي:-

$$E_X = [(W_{CV})]_X^Y + I^Q + I^{CR} + E_Y \quad \dots\dots\dots(4)$$

محطة القوى المشتركة COMBINED POWER PLANT

يمثل الشكل (2) مخططاً مبسطاً لخطة براون بوفيري بالقدرة

و بافتراض عدم وجود فقد حراري إلى الجو المحيط و $I^Q=0$ فإن خسائر الأكسিজني بسبب اللانعكاسية تساوي

$$I^{CR} = T_o [\Delta S_{st} + \Delta S_g] \quad \dots\dots(10)$$

يحسب ΔS_{st} في مولد البخار الاستردادي الثنائي الضغوط ، من العلاقة التالية:-

$$\Delta S_{st} = m_{sHP}(S_7 - S_{13}) + m_{sLP}(S_8 - S_{13}) \quad \dots\dots(11)$$

أما ΔS_g فتحسب من العلاقة التالية:-

$$\Delta S_g = m_g [Cp_g \ln(T_5/T_4) - R_g \ln(P_5/P_4)] \quad \dots\dots(12)$$

5- غازات العادم EXHAUST GASES

خسائر الأكسিজني بسبب انتقال الحرارة إلى الجو تساوي

$$I^Q = \int_{T_5}^{T_o} ((T - T_o) / T) dQ \quad \dots\dots(13)$$

$$I^Q = m_g Cp_g [(T_5 - T_o) - \ln(T_5 / T_o)] \quad \dots\dots(14)$$

6- التوربين البخاري مع استنزاف لتسخين مياه التغذية الأسترجاجي

STEAM TURBINE WITH BLEED FOR REGENERATIVE

إن خسائر الأكسিজني أو الشغل الضائع في التوربين البخاري ثنائي الضغط مع استنزاف ، يمكن صياغتها بالعلاقة التالية انظر الشكل(2) :-

$$I^{CR} = T_o \left[m_7(S_8 - S_7) + (m_7 + m_8)(S_8 - S_9) + (m_7 + m_8 - m_9)(S_{10} - S_9) \right] \quad \dots\dots(15)$$

و بافتراض أن الهواء غاز مثالي ذو حرارة نوعية عند ضغط ثابت CP_a فإن :-

$$I^{CR} = m_a * T_o [Cp_a \ln(T_2/T_1) - R_a \ln(P_2/P_1)] \quad \dots\dots(6)$$

2-التوربين الغازي GAS TURBINE

بافتراض أن التوربين أديبائي، تكون $I^Q=0$ أما I^{CR} فتحسب من العلاقة التالية:-

$$I^{CR} = mg * T_o [R \ln(P_3/P_1) - Cp_g \ln(T_3/T_1)] \quad \dots\dots(7)$$

3-غرفة الاحتراق COMBUSTION CHAMBER

اعتمادا على المصدر [1]، يمكن التعبير عن خسائر الأكسিজني في غرفة الاحتراق بالمعادلة التقريبية التالية:-

$$I^{CR} = [T_o / T_{LM}] m_f * L.C.V \quad \dots\dots(8)$$

حيث T_{LM} المتوسط اللوغاريتمي لفرق درجات الحرارة و يحسب من:-

$$T_{LM} = (T_3 / T_2) / \ln(T_3 / T_2) \quad \dots\dots(9)$$

4- مولد البخار الاستردادي HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR

في المرجل أو مولد البخار الاستردادي، هناك مرحلة أولى يتم فيها احتراق أديبائي، ثم تنتقل الحرارة في مرحلة ثانية من الغازات الساخنة إلى المائع البارد (الماء أو البخار).

7- مسخن مياه التغذية

FEED WATER HEATER

بافتراض أن الخلط في مسخن مياه التغذية المباشر التلامس أديباتي، فتكون $I^Q=0$ أما I^{CR} فتحسب من العلاقة التالية:-

$$I^{CR} = T_o [m_{13} S_{13} - m_{12} S_{12} - m_9 S_9] \dots (16)$$

8-المكثف CONDENSER

في المكثف نفترض أن الحرارة تنتقل من البخار عند درجة حرارة المكثف T_{con} إلى ماء التبريد بدرجة حرارة الجو T_o أن خسائر الإكسيري في سبب انتقال الحرارة إلى الجو تساوي :-

$$I^Q = Q_{con} [(T_{con} - T_o) / T_{con}] \dots (17)$$

حيث Q_{con} الحرارة المطرودة من المكثف و تساوي

$$Q_{con} = m_{10} (h_{10} - h_{11}) \dots (18)$$

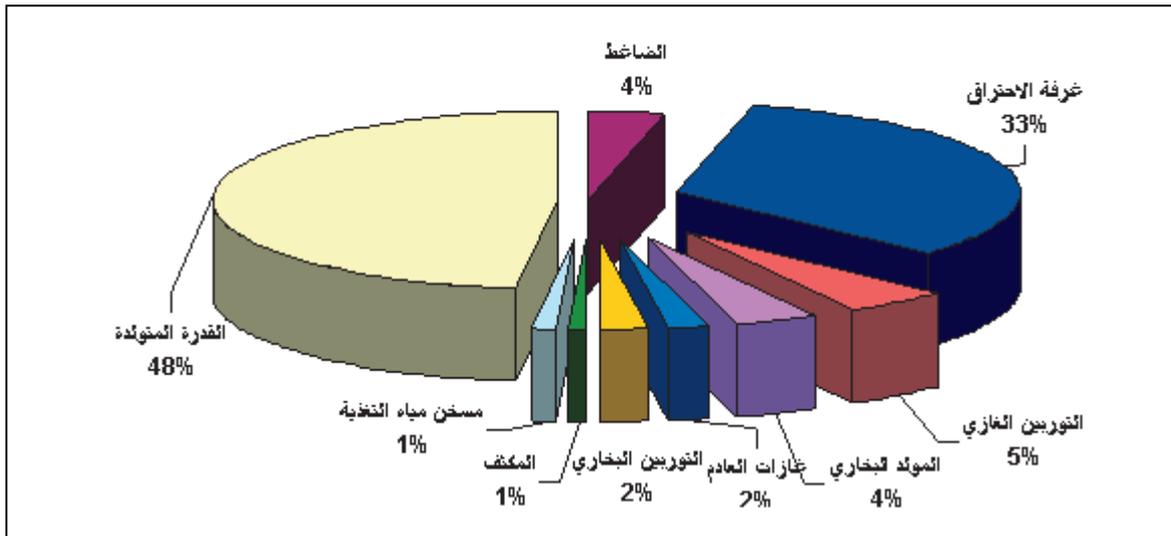
النتائج و المناقشة

1 - خسائر الإكسيري

إن خسائر الإكسيري في مكونات المحطة اشتملت على أولاً الشغل الضائع بسبب الانعكاسية الداخلية في كل من الضاغط،التوربين الغازي،غرفة الاحتراق،المولد البخاري ، والتوربين البخاري.

وثانياً الشغل الضائع بسبب الانعكاسية الخارجية الناجمة عن انتقال الحرارة إلى الخارج في كل من المكثف و غازات العادم. و باستخدام المعادلات (5-18) أمكن حساب خسائر الإكسيري في كل مكونات المحطة المشتركة و كما موضح في الشكل (3) .

من الشكل يمكن ملاحظة أن أغلب خسائر الإكسيري تحدث في غرفة الاحتراق، حيث تمثل 33% من إكسيري الوقود الداخل. بينما بقية خسائر الإكسيري بسبب الانعكاسية الداخلية 17% من إكسيري الوقود. إما



الشكل (3) تحليل الإكسيري لمحطة التوليد المشتركة

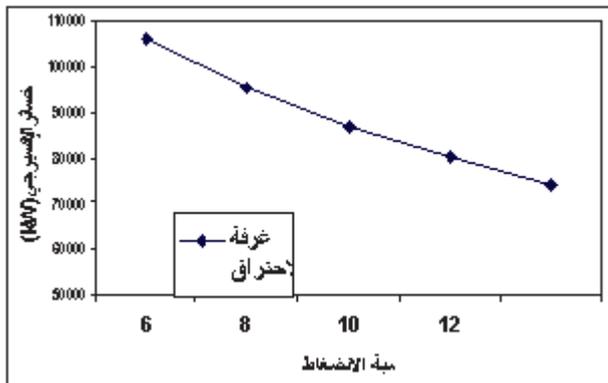
2-تأثير بعض المتغيرات على خسائر الإكسيري

يمكن تقدير خسائر الإكسيري في مختلف أجزاء المحطة ، وذلك بدراسة كيفية تأثيرها بتغير بعض البرامترات التصميمية مثل نسبة الانضغاط

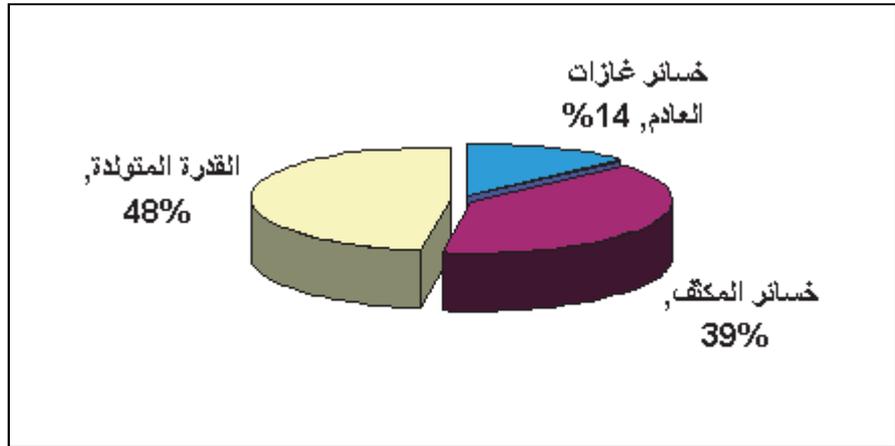
، أقصى درجة حرارة في التوربين الغازي، وضغط المرجل ، بالإضافة إلى دراسة تأثير درجة حرارة المحيط على خسائر الإكسيري.

• نسبة الانضغاط

عند إبقاء درجة الحرارة العظمى في التوربين الغازي ثابتة، يمكن بيان تأثير نسبة الانضغاط على خسائر الإكسيري في مختلف مكونات المحطة، وكما موضح في الشكل (5). من الشكل يلاحظ أن خسائر الإكسيري في غرفة الاحتراق تقل مع زيادة نسبة الانضغاط، وذلك لان درجة الحرارة عند مدخل غرفة الاحتراق T_2 تقترب أكثر

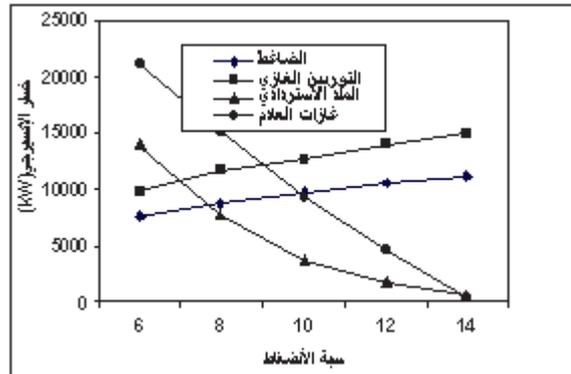


الشكل (5) تأثير الانضغاط على خسائر الإكسيري

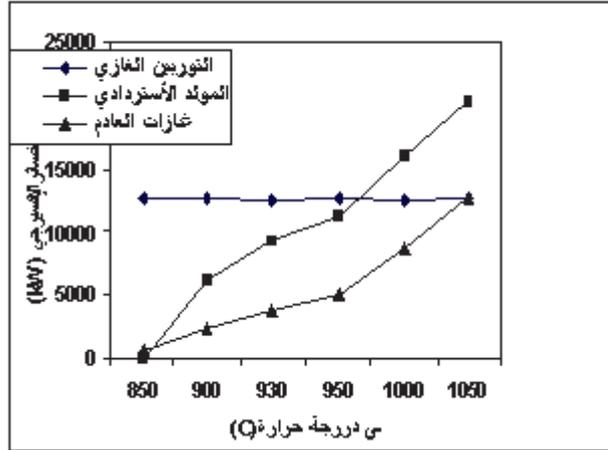
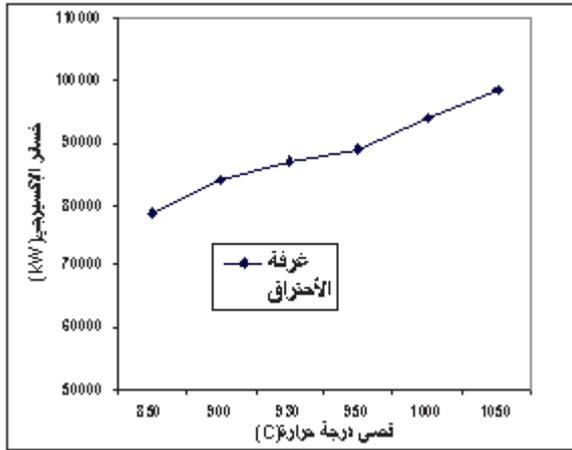


الشكل (4) تحليل الطاقة لمحطة التوليد المشتركة

خسائر الإكسيري بسبب الانعكاسية الخارجية فتمثل فقط 2% من إكسيري الوقود. إن مصادر الانعكاسية الداخلية ناتجة من اللزوجة، انتقال الحرارة عبر تدرج لدرجات الحرارة، الدوامات، الاحتراق [6]. و يعتبر الاحتراق المصدر الرئيسي للانعكاسية الداخلية بسبب الانعكاسية في إجراء التفاعل. أما الشكل (4) فيعطي تحليل الطاقة (المبني على أساس القانون الأول للديناميكا الحرارية)، حيث يلاحظ أن معظم خسائر الطاقة تحدث في المكثف 39% من طاقة الوقود الداخلة، و في غازات العادم 14%.



إدارة الطاقة



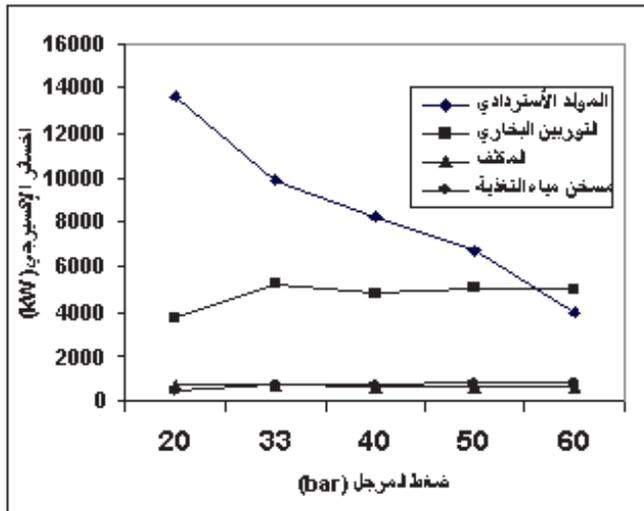
الشكل (6) تأثير أقصى درجة حرارة على خسائر الإكسيري جي

فتبقى ثابتة تقريباً، لأن زيادة أقصى درجة حرارة يرافقه ارتفاع بدرجة حرارة غازات العادم عند مخرج التوربين.

• ضغط المرجل

الشكل (7) يوضح كيفية تغير خسائر الإكسيري جي في مولد البخار الاستردادي، حيث يلاحظ انخفاض الخسائر مع

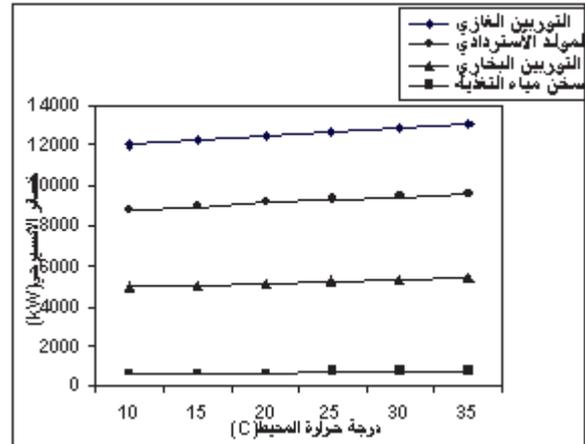
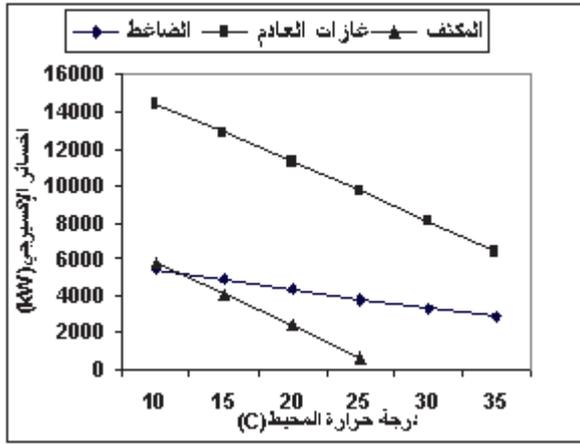
فأكثر من درجة الحرارة العظمى. و كذلك تقل الخسائر في كل من المولد البخاري و غازات العادم بسبب هبوط درجتي الحرارة عند مدخل و مخرج المولد البخاري. و كذلك يظهر في الشكل (5) أن خسائر الإكسيري جي في كل من الضاغط و التوربين الغازي تزداد مع زيادة نسبة الانضغاط.



الشكل (7) تأثير ضغط المرجل على خسائر الإكسيري جي

• أقصى درجة حرارة

عند نسبة الانضغاط التصميمية (10) يمكن ملاحظة تأثير أقصى درجة حرارة عند مدخل التوربين الغازي على خسائر الإكسيري جي من الشكل (6). حيث يلاحظ أن الخسائر تزداد في غرفة الاحتراق وذلك لزيادة كمية الوقود المحترق و بالتالي زيادة اللإنعكاسية بسبب التفاعل الكيميائي. و كذلك تزداد الخسائر في كل من المولد البخاري و غازات العادم لارتفاع درجتي الحرارة عند مدخل و مخرج المولد البخاري. أما خسائر الإكسيري جي في التوربين الغازي



الشكل (8) تغير خسائر الإكسيرجي مع تغير درجة حرارة المحيط

الاستنتاجات

- إن تحليل الإكسيرجي يعطي صورة حقيقية عن الخسائر التي تحدث في مختلف مكونات المحطة.
- تحدث معظم خسائر الإكسيرجي في غرفة الاحتراق في وحدة التوربين الغازي بسبب اللانعكاسية في إجراء الاحتراق، و لا يمكن تقليل هذه الخسائر بالتكنولوجيا المتاحة طالما يستخدم إجراء الاحتراق.
- أن لكل من نسبة الانضغاط، أقصى درجة حرارة، و ضغط المرجل تأثيراً واضحاً على خسائر الإكسيرجي في مختلف مكونات المحطة.
- الشكل (8) يعطي فكرة مفيدة عن خسائر المحطة لمهندس التشغيل عند معرفة درجة حرارة المحيط.

المصادر

- 1- El-Masri, M.A. "Exergy Analysis of Combined Cycles: Part I- Air-Cooled Brayton Cycle Gas Turbine" Trans. ASME J. OF Engineering for G.T. & Power, Vol.109, No.2, PP228-236, 1987.

زيادة ضغط المرجل. وذلك لانخفاض الزيادة في الأنتروبي للبخر المتولد. في حين تتغير الخسائر تغيراً طفيفاً في كل من التوربين البخاري، مسخن مياه التغذية، و المكثف.

• درجة حرارة المحيط

لدرجة حرارة المحيط تأثير واضح على خسائر الإكسيرجي في مختلف مكونات المحطة و كما موضح في المعادلات (5-18).

أن هذا التأثير يختلف باختلاف مكونات المحطة، حيث تزداد الخسائر و بشكل طفيف في كل من التوربين الغازي، المولد البخاري، التوربين البخاري، و مسخن مياه التغذية مع زيادة درجة حرارة المحيط و كما موضح في الشكل (8-a).

بينما تقل هذه الخسائر و بشكل واضح في كل من الضاغطة، غازات العادم، و المكثف. وذلك لأن قيم الإكسيرجي في مائع الشغل في كل من الضاغطة، غازات العادم، و المكثف منخفضة.

إدارة الطاقة

E_V الإكسبرجي الخارج من حيز المراقبة (MW)
E^Q الإكسبرجي الحراري (معادلة 2)
I^Q خسائر الإكسبرجي بسبب الانعكاسية الخارجية
I^{CR} خسائر الإكسبرجي بسبب الانعكاسية الداخلية
m معدل التدفق الكتلي (s/kg)
T_i (درجة حرارة) عند نقاط مختلفة
T_{LM} المتوسط اللوغاريتمي لفرق درجات الحرارة
P_i الضغط (عند نقاط مختلفة) bar
R ثابت الغازات (K.kg/kJ)
ΔS_{CR} كمية الأنتروبي المتولدة (kJ/kg)
W_{CR} الشغل الناتج الفعلي في حيز المراقبة (kg/kJ)

المختصرات

a	الهواء
cond	المكثف
ex	غازات العادم
f	الوقود
g	الغازات

- 2- Manfrida,G., Bosia,A.& Bindini,G."Second Law Analysis of Combined Gas-Steam Cycles", Proc. 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, PP391-397, 1988.
- 3- Cerri ,G." Parametric Analysis Of Combined Gas-Steam Cycle" Trans.ASME J.OF Engineering forG.T.& Power, Vol.109,No.4, PP46-55,1987.
- 4-جون هورلوك" محطات القوى المولفة" ترجمة د. خليل محمود ،جامعة الملك سعود، المملكة العربية السعودية، 1998.
- 5-Czermak, H.&Wansch,A."The 125 MW Combined Cycle plant Korneuburg B; Design Features,Plant Performance and Operation Experience", ASME Paper 82GT-323,1982.
- 6- Alkidas,A.C."The Application of Availability and Energy Balance of a Diesel Engine" Trans.ASME J.OF Engineering for G.T.& Power, Vol.110, PP462-469,1988.

الرموز المستعملة

C_p الحرارة النوعية بثبوت الضغط (K.kg/kJ)
E_X الإكسبرجي الداخل لحيز المراقبة (MW)

الخلاصة

يتضمن البحث حساب خسائر الإكسبرجي في مختلف مكونات محطة توليد كهربائية مشتركة، مؤلفة من وحدة توربين غازي تنتج 81 MW من القدرة الكهربائية، مرجل بخاري لاسترداد الحرارة بدون حرق إضافي لإنتاج بخار ثنائي الضغط، و وحدة توربين بخاري تنتج 48 MW من القدرة الكهربائية.

نتائج البحث بينت أن معظم خسائر الإكسبرجي تتركز في غرفة الاحتراق في وحدة التوربين الغازي حيث تصل نسبتها إلى 33% من إكسبرجي الوقود الداخل. أما بقية مكونات المحطة فإن خسائر الإكسبرجي فيها تتراوح ما بين 1%-5% من إكسبرجي الوقود.

تضمن البحث أيضاً بيان تأثير بعض البرامترات على خسائر الإكسبرجي في مختلف مكونات المحطة. فقد بين البحث أن لكل من نسبة الأضغاط، أقصى درجة حرارة، و ضغط المرجل تأثيراً واضحاً على خسائر الإكسبرجي. و دُرِس أيضاً تأثير درجة حرارة المحيط على خسائر الإكسبرجي.