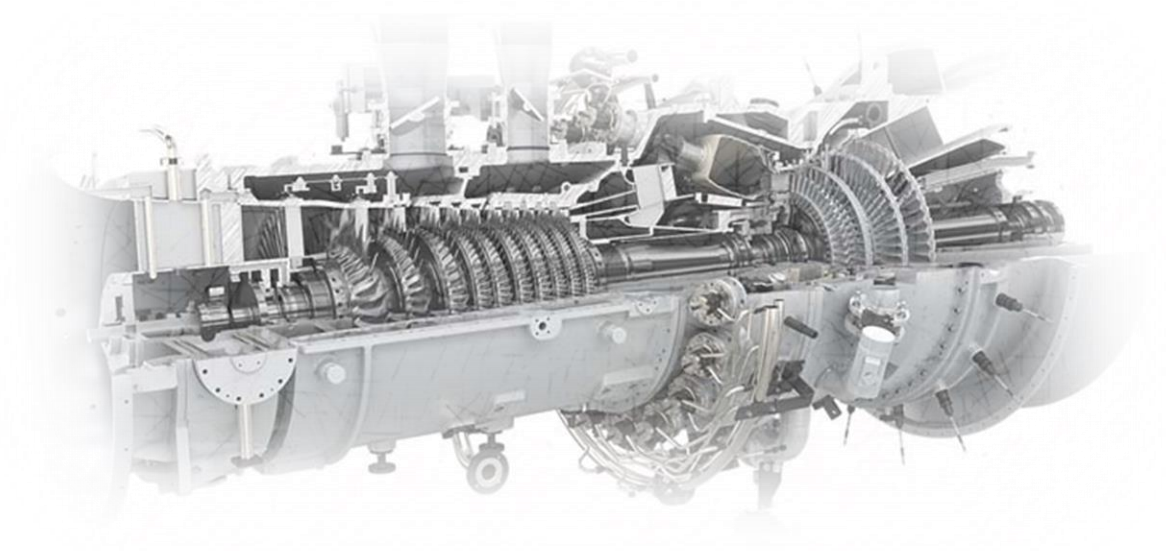
التوربين الغازي المُبسط

للتدريب فقط من سيمنز



GAS TURBINE PRIMER

SIEMENS

ONLY FOR TRAINING

إعداد وترجمة
المهندس عدنان بهجت جليل

جدول المحتويات Table of Content

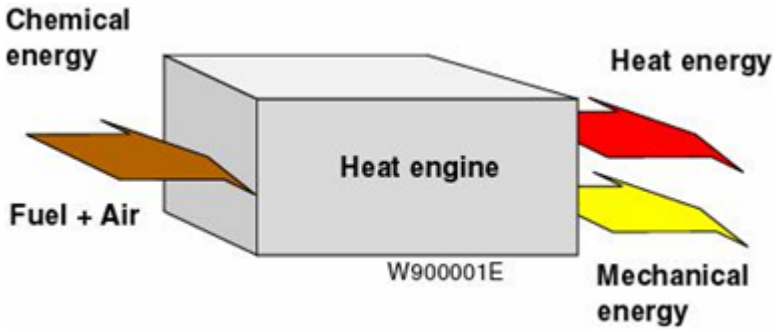
الموضوع	الصفحة
التوربين الغازي – تمهيد Gas Turbine primer فكرة عامة General الأجزاء الرئيسية في دورة التشغيل Operating Cycle Main Parts	٣
مبدأ العمل Function Principle	٤
تسخين تدفق الهواء Heating of the Air Flow	٥
سرعة الإستدامة الذاتية Self-Sustaining Speed	٦
قيادة أو إدارة مكون Driving an object	٧
المكونات الرئيسية Main Components الضاغط The Compressor تصميم ضاغط التدفق المحوري Axial Flow Compressor Design	٨
مبدأ العمل Function Principle التوقف والتغير المفاجيء للضاغط Compressor Stall and Surging التحكم في تدفق الهواء Airflow Control	٩
غرفة الإحتراق The Combustion Chamber التصميم Design	١٠
مبدأ العمل Function Principle	١١
التوربين The Turbine تصميم توربين التدفق المحوري Axial Flow Turbine Design	١٢
مبدأ العمل Function Principle	١٣
تكوينات أو أشكال التوربينات الغازية Gas Turbine Configurations	١٤
التوربين الغازي أحادي المحور أو عمود الدوران (نموذج SGT-800) Single shaft gas turbine مولد غاز أحادي المحور مع توربين قدرة (نماذج SGT600، SGT-700)	١٥
مولد غاز ثنائي المحور مع توربين قدرة (نموذج SGT-500) أداء التوربين الغازي Gas Turbine Performance العوامل الديناميكية الحرارية	١٦
الظروف المحيطة Ambient conditions ضغط الهواء المحيط (P) Ambient Air Pressure درجة حرارة الهواء المحيط (T) Ambient Air Temperature	١٧
الرطوبة النسبية للهواء المحيط (RH) Ambient Air Relative Humidity الظروف التشغيلية Operating Conditions	١٨ - ٢٠
المراجع References	٢١

التوربين الغازي – تمهيد Gas Turbine primer

الغرض من هذا الكتاب هو تعريف القارئ بالمبادئ العامة للتوربينات الغازية وكيف يتأثر أداء Performance التوربينات الغازية بالظروف المحيطة Ambient conditions .
تم إستخدام التوربينات الغازية سيمنز Siemens SGT-500 و SGT-600 و SGT-800 كنماذج للتوضيحات التفصيلية للتوربينات الغازية التجارية Commercial gas turbines .

فكرة عامة General

التوربين الغازي محرك حراري Heat engine ، أي أنه محرك يحول الطاقة الحرارية Heat energy إلى طاقة ميكانيكية Mechanical energy . عادة ما يتم إنتاج الطاقة الحرارية عن طريق حرق الوقود Fuel مع أوكسجين الهواء Oxygen of the air . هذه هي الطريقة التي يحول بها المحرك الطاقة الكيميائية Chemical energy للوقود ، أولا إلى طاقة حرارية ثم بعد ذلك إلى طاقة ميكانيكية . ومع ذلك ، في التوربينات الغازية ، وكذلك في الأنواع الأخرى من المحركات الحرارية ، يمكن تحويل جزء فقط من الطاقة الحرارية المنبعثة (المتحررة) إلى طاقة ميكانيكية . حيث سيتم إنتقال الطاقة الحرارية المتبقية إلى الغلاف الجوي Atmosphere .



الشكل ١: المبدأ العام للتوربين الغازي

تساوي كفاءة تحويل الطاقة Efficiency of the energy conversion جزءا من الطاقة الداخلة Input energy المتحولة إلى طاقة مفيدة Useful Output energy . في التوربين الغازي يتم تحويل (٢٥ - ٤٥ ٪) من الطاقة الداخلة إلى طاقة ميكانيكية . وسيتم إنتقال (٥٥ - ٧٥ ٪) المتبقية إلى الغلاف الجوي في شكل حرارة ضائعة (خسائر العادم) Waste heat (exhaust losses) . الكفاءة بالتالي تساوي ٢٥- ٤٥ ٪ .

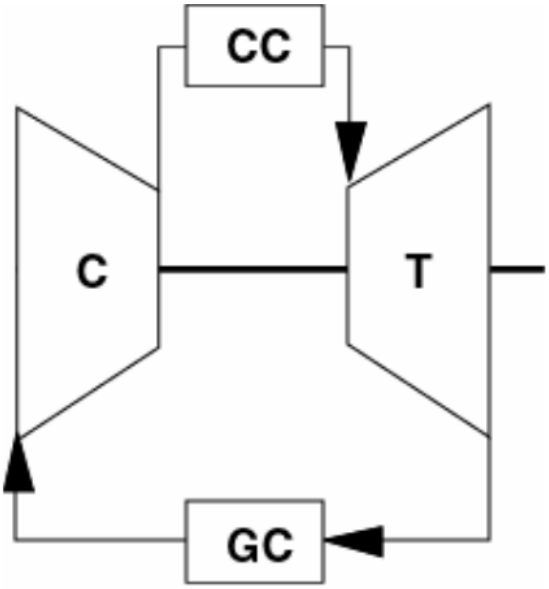
$$\text{Efficiency} = \eta = \frac{\text{Output energy}}{\text{Input energy}}$$

يمكن إسترداد جزء من الحرارة الضائعة (المفقودة) ، على سبيل المثال في مرجل إسترداد الحرارة المفقودة Waste heat recovery boiler ، مما يؤدي في المقابل إلى زيادة الكفاءة .

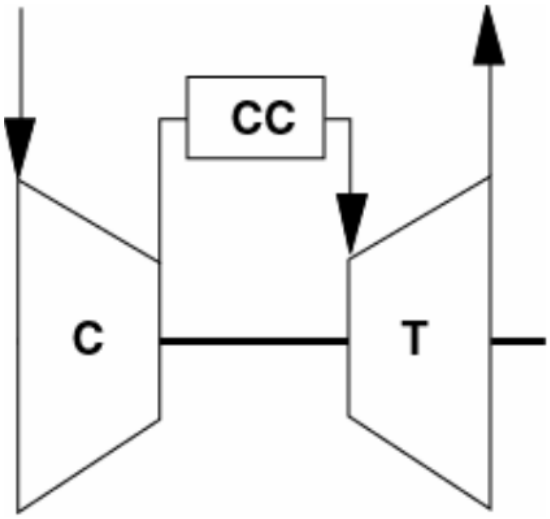
الأجزاء الرئيسية في دورة التشغيل Operating Cycle Main Parts

تعمل دورة عملية التوربين الغازي حسب القاعدة :
الإنضغاط Compression - التسخين Heating - التمدد Expansion

المائع الذي يمر عبر العملية هو الهواء و غازات الإحتراق Combustion gases . يمكن لكل من الوقود السائل Liquid fuel والوقود الغازي Gas fuel توليد غازات الإحتراق لهذه العملية .
في دورة التوربين الغازي المفتوحة Open Gas Turbine Cycle ، يتم إمتصاص الهواء المحيط Ambient air وضغطه في ضاغط Compressor ، ثم تسخينه في غرفة الإحتراق Combustion chamber عن طريق حقن وحرق الوقود ثم تمدده أخيرا عبر التوربين Turbine راجعا إلى الغلاف الجوي . وسط التشغيل Operating medium لدورة التوربين الغازي المفتوحة هو الهواء ومزيج من غازات الهواء والإحتراق .
في دورة التوربين الغازي المغلقة Closed Gas Turbine Cycle ، يمر الغاز (المحصور) Enclosed gas ، الذي لا يجب أن يكون الهواء ، عبر نفس المراحل كما في الدورة المفتوحة . تتم عملية التسخين في غرفة الإحتراق (المبادل الحراري Heat exchanger) قبل أن يتمدد الغاز عبر التوربين . بعد ذلك يجب تبريد الغازات الساخنة قبل إعادتها إلى الضاغط .



الشكل ٢ : دورة التوربين الغازي المغلقة



الشكل ٣ : دورة التوربين الغازي المفتوحة

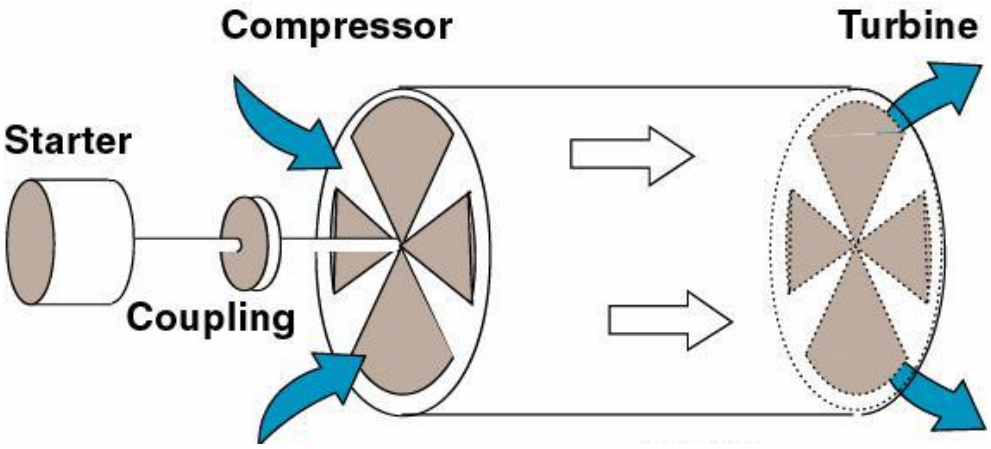
C = الضاغط ، T = التوربين ، CC = غرفة الإحتراق ، GC = مبرد الغاز .
في الواقع ، تهيمن دورة توربينات الغاز المفتوحة بالكامل على السوق ، وبالتالي ستكون خاضعة لمزيد من الوصف في هذا المستند .

مبدأ العمل Function Principle

يتكون التوربين الغازي من الأجزاء الثلاثة الرئيسية :

- الضاغط
- غرفة الإحتراق
- التوربين

يوضح النموذج البسيط التالي كيفية تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية . الأنبوب مجهز بمروحة Fan في كل طرف (نهاية). تسمى إحدى المروحتين الضاغط و الأخرى تسمى التوربين . يتم توصيل مصدر طاقة خارجي External power source مثل بادىء حركة أو تشغيل Starter إلى مروحة الضاغط عن طريق قارنة (وصلة ربط Coupling) .

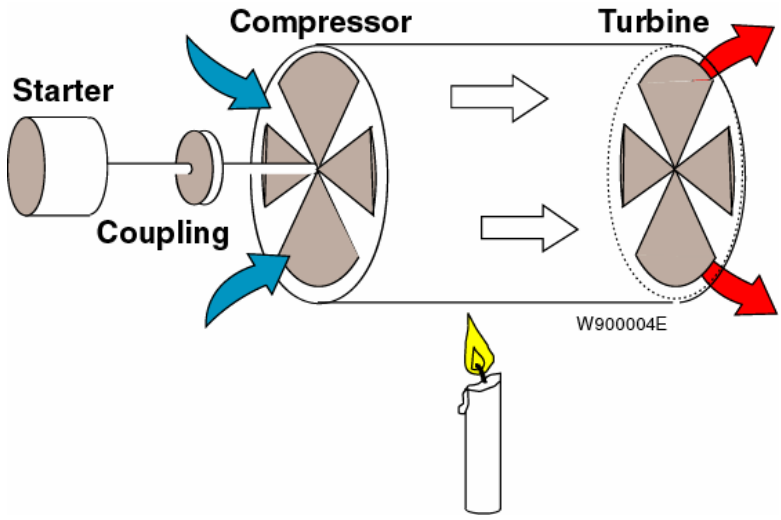


الشكل ٤ : نموذج مبسط لتوربين غازي

في البداية ، يتم وضع أو ضبط الضاغط في حالة الدوران من قبل بادىء الحركة . عند الدوران ، يقوم الضاغط بإحداث تدفق هواء Air-flow عبر الأنبوب ، مما يفرض على التوربين فعل الدوران وإخراج أو توليد ناتج ميكانيكي Mechanical output . تؤثر كمية الطاقة المجهزة على سرعة الضاغط وسرعة تدفق الهواء Airflow velocity والضغط وسرعة التوربين . إذا تم الحفاظ على العملية دون خسائر Losses (وهو أمر مستحيل في الواقع ، لكن تم قبوله مؤقتا لتبسيط الفهم) ، فإن الطاقة المنتجة من التوربين تساوي الطاقة التي يستهلكها بادىء الحركة الذي يدير الضاغط .

تسخين تدفق الهواء Heating of the Air Flow

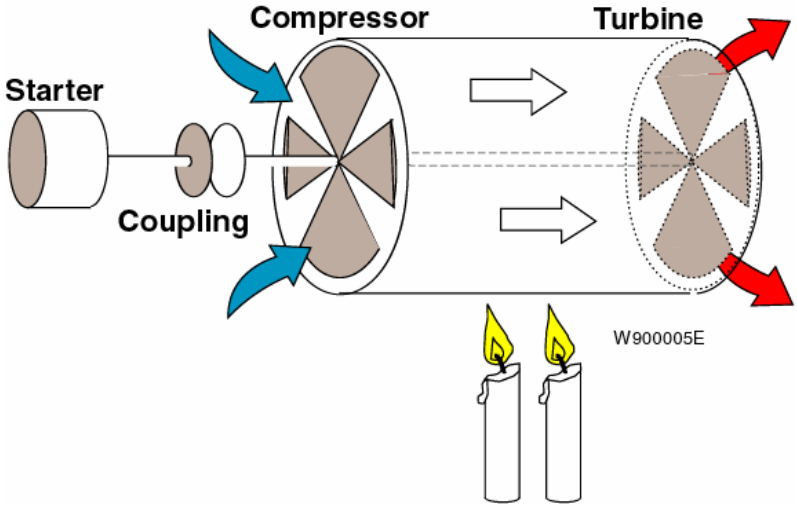
تسخين الهواء يزيد من درجة الحرارة Temperature ويؤدي إلى التمدد Expansion . ولأن ضغط الهواء Air pressure داخل الأنبوب يُنتج عن الضاغط ، فإن زيادة درجة حرارة الهواء لا تؤدي إلى زيادة ضغط الهواء . بدلا من ذلك ، يتسبب حجم الهواء Air volume المتمدد في زيادة سرعة الهواء عبر التوربين . يتم إنتقال كمية كبيرة من الطاقة من الهواء المتحرك إلى التوربين ، والتي تولد ناتج ميكانيكي كبير . إذا تم الحفاظ على العملية دون خسائر ، فإن الطاقة الميكانيكية المنتجة من التوربين تساوي مجموع الطاقة الميكانيكية المجهزة إلى الضاغط والطاقة الحرارية المجهزة إلى تدفق الهواء .



الشكل ٥: يؤدي تسخين تدفق الهواء إلى زيادة سرعة الهواء خلال التوربين الغازي والذي يعطي ناتج ميكانيكي كبير

سرعة الإستدامة الذاتية Self-Sustaining Speed

ستؤدي الزيادة في تجهيز أو تزويد الطاقة الحرارية إلى إنتاج طاقة ميكانيكية من التوربين كافية لقيادة أو تدوير الضاغط . إذا تم تركيب الضاغط والتوربين على عمود أو محور مشترك Common shaft ، فيمكن فصل بادىء الحركة عند الوصول إلى حالة الإكتفاء الذاتي Self-sustaining حيث كان مطلوبا فقط لإنشاء تدفق هواء أولي عبر الأنبوب . يفرض تدفق الهواء على العملية الإستمرار بحكم زخمها (كمية الحركة Momentum) . إن تسخين الهواء الثابت داخل الأنبوب كان يمكن أن يؤدي فقط إلى تمدد الهواء للخلف عبر الضاغط إضافة للأمام عبر التوربين .



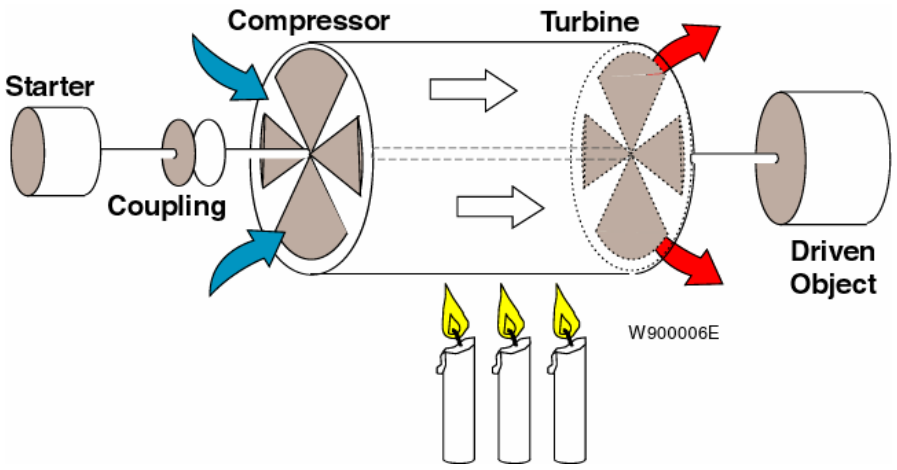
الشكل ٦ : زيادة تجهيز الطاقة الحرارية تعني أن التوربين ينتج طاقة ميكانيكية كافية لتدوير الضاغط والوصول إلى حالة الإكتفاء الذاتي .

عند الوصول إلى حالة الإكتفاء الذاتي ، تكون الطاقة الميكانيكية المُستخلصة من التوربين كافية تماما لتدوير الضاغط . إن الكمية الكلية للطاقة المجهزة عن طريق التسخين هي طاقة مهدورة (ضائعة) Waste energy . في الواقع هذه الخسائر ناتجة عن العادم Exhaust والإضطرابات الدوامية Turbulence والإشعاع

Radiation . توضح الأسباب الديناميكية الحرارية أن درجة حرارة غاز العادم Exhaust gas يجب أن تكون أعلى من درجة حرارة الهواء الداخل Inlet air ، (أي بمعنى حدوث خسائر) . ويجب أن يترك غاز العادم التوربين بسرعة معينة ، وهذا مما يسبب خسائر أيضا .

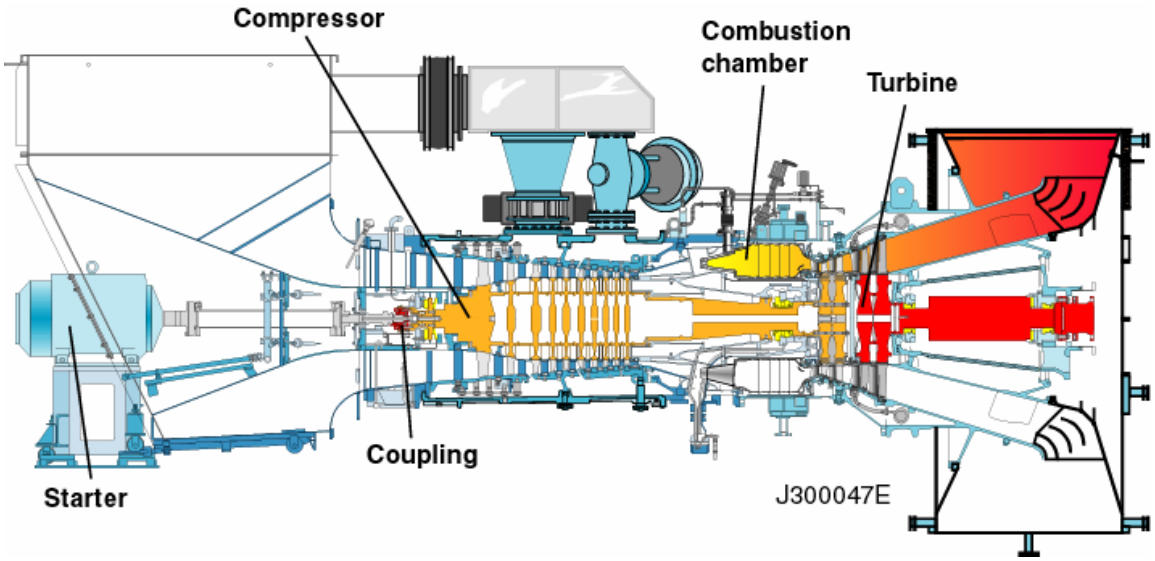
قيادة أو إدارة مكون Driving an object

للحصول على ناتج ميكانيكي مفيد من التوربين ، يجب زيادة تجهيز الحرارة أكثر لتسريع المحرك Engine فوق سرعة الإستدامة الذاتية .



الشكل ٧ : للحصول على ناتج ميكانيكي مفيد من التوربين ، يجب زيادة تجهيز الحرارة أكثر

لجعل عملية التوربين الغازي (أي تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية) فعالة وكفؤة قدر الإمكان ، يجب أن يكون التصميم أكثر تعقيدا مما هو موصوف في النموذج البسيط . ومع ذلك ، فإن الميزة الرئيسية للغلاف الاسطواني Cylindrical casing الذي يحتوي على الضاغط وغرفة الإحتراق والتوربين لا تزال قائمة ، مما يتسبب في تدفق الهواء \ الغاز Air/gas flow مباشرة عبر المحرك .



الشكل ٨ : هيكل التوربين الغازي النموذجي (SGT-600)

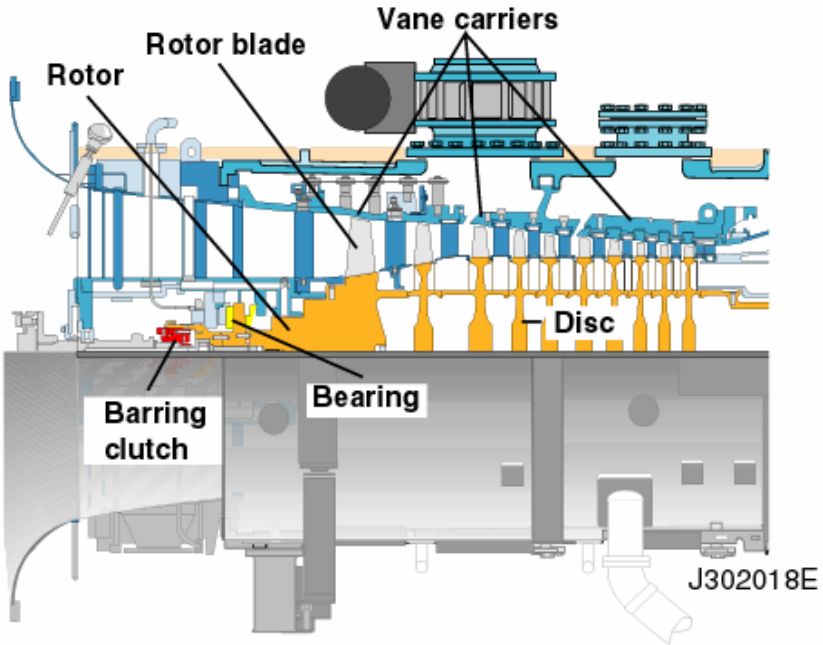
المكونات الرئيسية Main Components

الضاغط The Compressor

يتميز الضاغط بتصميم متطور للغاية بغرض الكبس المستمر على تدفق الهواء إلى الضغط المرغوب . يوجد نوعان أساسيان من الضواغط ، أحدهما يعطي تدفقا شعاعيا Radial flow والآخر تدفقا محوريا Axial flow. يمكن تصميم ضاغط التدفق المحوري Axial flow compressor بسهولة لإحداث نسب إنضغاط عالية ، وهو أكثر كفاءة وبالتالي فهو شائع الإستخدام في الوحدات عالية الأداء High performance units وبالتالي يستخدم عادة في تطبيقات التوربينات الغازية . يصف هذا الكتاب فقط ضاغط التدفق المحوري .

تصميم ضاغط التدفق المحوري Axial Flow Compressor Design

يتكون ضاغط التدفق المحوري من جزئين رئيسين ، واحد أو أكثر من الأقراص الدوارة Rotor discs التي تحمل ريش Blades على شكل مقطع جناح (سطح إنسيابي هوائي Airfoil) ومرحلة واحدة أو أكثر من الريش الثابتة Stator vanes مثبتة داخل غلاف التوربين Turbine casing ، مرحلة واحدة بين كل مرحلتين دوارة . يتم تثبيت المحور الدوار Rotor على محامل Bearings مثبتة إلى الغلاف .
الضاغط هو وحدة متعددة المراحل لأن زيادة الضغط في كل مرحلة قليلة نسبيا (نسبة الإنضغاط Pressure ratio من (1.15 - 1.30) . تتكون مرحلة الضاغط من قرص به ريش دوارة (متحركة) Rotating blades يتبعه حامل Carrier مع ريش ثابتة Stator vanes . يمكن تصميم الريش الثابتة للضاغط كريش مفردة أو كقطاعات دائرية Segments بها عدة ريش في وحدة واحدة . عادة ما يتم إستخدام صف Row إضافي من الريش الثابتة ، والمعروفة بأسم ريش توجيه المدخل Inlet guide vanes ، لتوجيه الهواء إلى الصف الأول من الريش الدوارة .
من نهاية الضغط المنخفض إلى نهاية الضغط العالي للضاغط ، هنالك نقصان تدريجي في المساحة الحلقية Annular area حيث يتدفق الهواء ، ويُعد ذلك ضروريا للمحافظة على سرعة محورية ثابتة Constant axial velocity للهواء حيث يقل الحجم Volume أثناء الإنضغاط .
لمنع تسرب الهواء Air leakage توجد موانع تسرب Seals بين مراحل الضاغط وكذلك عند طرفي مدخل ومخرج الضاغط .



الشكل ٩ : ضاغط التدفق المحوري

مبدأ العمل Function Principle

أثناء التشغيل ، يتم دوران الضاغط بسرعة عالية بواسطة التوربين .
يتم إمتصاص الهواء بشكل مستمر إلى داخل الضاغط حيث يتم تسريعه بواسطة الريش الدوارة والمرتدة للخلف . في الممرات اللاحقة للريشة الثابتة ، والتي تكون على شكل ناشرات Diffusers ، يتم تقليل سرعة الهواء وبالتالي زيادة ضغط الهواء . وتحدث عملية مماثلة في ممرات الريشة الدوارة .
تقوم الريش الثابتة بتصحيح الإنحراف Deflection الذي تسببه الريش الدوارة للهواء وتقديم الهواء بزاوية صحيحة إلى المرحلة التالية من الريش الدوارة . عادة ما يعمل صف الريشة الثابتة الأخير كمُقوم لإنسياب الهواء Air straightener بحيث يدخل الهواء إلى ناشرة المخرج وغرفة (غرف) الإحتراق بسرعة محورية منتظمة Uniform axial velocity إلى حد ما (أي لا يوجد دوران Rotation حول محور العمود الدوار) .

التوقف والتغير المفاجيء للضاغط Compressor Stall and Surging

تم تصميم مقاطع السطوح الإنسيابية ، وزوايا الريشة ، وتقليص المساحة الحلقية لغرض توفير أفضل أداء عند التحميل الكامل Full load (السرعة الكاملة Full speed) ، أي للحصول على علاقة معينة بين تدفق الهواء وسرعة الريشة Blade velocity ونسبة إنضغاط Compression ratio معينة . إذا كانت سرعة تدفق الهواء منخفضة للغاية بالنسبة لسرعة الريشة ، والتي تحدث إذا كان محور الضاغط يتسارع بسرعة كبيرة أو إذا كان مرشحة سحب أو دخول الهواء Air intake filter مسدودا ، فسوف ينفصل تدفق الهواء عن الريش ، وتُعرف هذه الظاهرة باسم التوقف المفاجيء (فقدان السرعة) Stall (فقط عندما يتعلق الأمر ببعض المراحل) وبالتغير المفاجيء أو الإضطراب Surging (عند إنهيار تدفق الهواء الكامل عبر الضاغط) . وهي ظاهرة تمثل مشكلة خطيرة لأن الريش تتعرض لقوى متذبذبة تؤدي إلى إجهادات Stresses غير مرغوب فيها . يتم تصميم الضاغط بحيث يعمل دون حد التغير المفاجيء (الزيادة المفاجئة) Surge limit ، ولكن إذا كانت مقاطع السطوح الإنسيابية للريش قد أُتلفت بسبب أوساخ مترسبة بشكل مفرط ، عندئذ يتم نزول حد التغير المفاجيء وبالتالي يمكن حدوث التوقف و التغير المفاجيء حتى في ظروف التشغيل العادية . وبالتالي ، فإنه من الضروري تنظيف الضاغط بإنتظام .

التحكم في تدفق الهواء Airflow Control

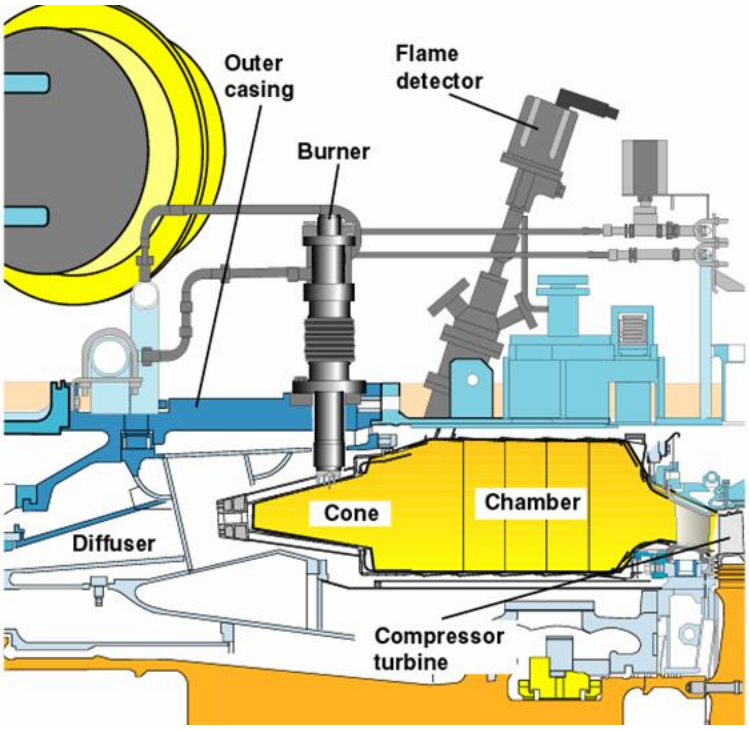
عند سرعات الضاغط المنخفضة ، أي أثناء بدء التشغيل وإيقافه ، يوفر الضاغط نسبة إنضغاط منخفضة ويحتاج إلى درجة أقل من التقارب بين القنوات أو الممرات الحلقية Annular duct . هذا يعني أنه في السرعات المنخفضة ، تميل المراحل الأمامية من الضاغط إلى التوقف Stalled وأن المراحل الخلفية تميل إلى الإختناق Choked . تزداد هذه المشكلة مع عدد المراحل ونسبة الإنضغاط ، ولكن يمكن إدارتها بإستخدام صمامات النزف Bleed-off valves و \ أو ريش التوجيه المتغيرة Variable guide vanes ، ويتم إستخدام كلا الوسيلتين عند الحاجة . بشكل مبسط ، تقطع صمامات النزف جزءا من المراحل الأمامية Front stages عن طريق نزف الهواء من المرحلة المتوسطة Intermediate stage ، وتعمل ريش التوجيه المتغيرة على تقليل تدفق الهواء إلى المراحل الخلفية Rear stages من خلال خنق Throttling المرحلة الأولى (أو المراحل الأولى) .
يسمح الضاغط مزدوج المحور Twin-spool compressor (كل من الضاغطين يتم تشغيلهما بواسطة التوربين الخاص به) بالعلاقة بين سعة Capacity (سرعة) الضاغطين بالتبديل (التغيير) دون الحاجة إلى ريش التوجيه المتغيرة أو صمامات النزف .

غرفة الإحتراق The Combustion Chamber

يتم حقن الوقود Fuel بشكل مستمر في غرفة الإحتراق من خلال المشاعل Burners ويتم الإحتراق بإستخدام الأوكسجين Oxygen في الهواء الذي يوفره الضاغط . يتم إطلاق الحرارة ويتم تمدد الغاز وتسريعه لتوفير تيار أو تدفق سلس من الغاز الساخن بشكل متجانس ومنتظم إلى التوربين في كل الظروف التشغيلية Operating conditions . يجب أن يتم الإحتراق مع الحد الأدنى من الخسارة في الضغط ومع أقصى قدر من إطلاق (تحرير) الحرارة داخل المساحة المادية المحدودة المتاحة . الإحتراق الفعال Efficient combustion ضروري للحصول على كفاءة حرارية عالية Thermal efficiency وتقليل إنبعاثات Emissions غازات أول أوكسيد الكربون Carbon monoxide (CO) و ثاني أوكسيد الكربون Carbon dioxide (CO_2) و أوكسيد النتروجين Nitrous oxide (NOx) في غاز العادم Exhaust gas .

التصميم Design

يمكن تصميم غرفة الإحتراق بعدة طرق مختلفة . يشير الوصف التالي إلى النوع الحلقي Annular type . يتم تثبيت عدد من المشاعل في الطرف الأمامي ، والمعروفة باسم اللوحة الأمامية Front panel للغلاف الحلقي Annular casing . يتم توصيل مخرج الضاغط باللوحة الأمامية ، وكل مشعل عبر ناشرة Diffuser . ثم يتم توصيل البطانات Liners الموجودة في الطرف الخلفي من الحارقة Combustor بمدخل التوربين . أثناء البدء ، يتم بدء الإحتراق بواسطة واحد أو أكثر من شمعات القدح الكهربائي Electrical spark plugs أو شُعلة مشعل (مشاعل) Torch igniter مثبتة بغرفة الإحتراق . ثم ينتشر اللهب Flame إلى المشاعل الأخرى .



الشكل ١٠ : غرفة الإحتراق الحلقي Annular combustion chamber

مبدأ العمل Function Principle

يترك الهواء مخرج الضاغط بسرعة (100 متر في الثانية Meter per second) ، لكن سرعة الوقود المحترق Burning fuel عند نسب الخليط العادية ليست سوى بضعة أمتار في الثانية . وبالتالي ، حتى لا ينطلق اللهب بعنف وفجأة ، يجب إبطاء سرعة تدفق الهواء . يجب تكوين منطقة تتميز بسرعة محورية منخفضة Low axial velocity وتدفق يعاد تداوره Re-circulating flow داخل غرفة الإحتراق ، مما يسمح للهب أن يظل محترقا طوال فترة التشغيل الأعتيادي للمحرك .

من أجل الحصول على إحتراق فعال ، يجب أن تكون درجة حرارة اللهب (1000- 2000 درجة مئوية °C) . ونظرا لعدم وجود مادة معروفة يمكنها تحمل درجة الحرارة هذه في مثل هذه البيئة ، يجب تبريد جدران البطانة Liner walls بالهواء الزائد أو الفائض Excess air . يتم إستخدام بعض الهواء أيضا لتخفيف تركيز الغازات الساخنة ، وخفض درجة الحرارة إلى مستوى يمكن أن تتحمله المواد الموجودة في أجزاء التوربين .

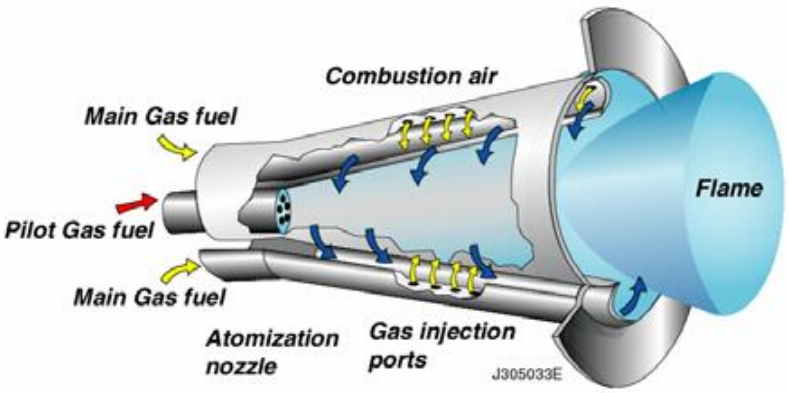
يحدث الإحتراق في منطقة الإحتراق Combustion zone بالقرب من اللوحة الأمامية . يتم إحداث خليط هواء\ وقود Fuel air mixture مناسب في المنطقة بالتدويم (حركة دوامية Swirl) في المشعل . يُحدث خليط الهواء الوقود المُجهز ، منطقة من الغاز المعاد تدويره والذي يأخذ شكل دوامة حلزونية (حلقية) Torodial vortex ، مشابه لحلقة الدخان ، والتي تحافظ على إستقرار وثبات الشُعلة في وسط منطقة الإحتراق . وتُعيد أيضا إعادة إشعال الغازات الساخنة المعاد تداورها والتي تساعد في تذرية Atomizing الوقود وخلطه مع خليط الهواء \ الوقود الوارد ، وبالتالي الحفاظ على الإحتراق .

عند التحميل الكامل Full load ، يتم توفير حوالي (25 %) فقط من إجمالي تدفق الهواء من الضاغط إلى منطقة الإحتراق (حسب نوع التوربين الغازي) . وهي نسبة تكفي للحصول على إحتراق كامل Complete combustion . و يتم إستخدام ما تبقى من تدفق الهواء ، والهواء الزائد ، لتبريد جدران الحارقة وتخفيف تركيز الغازات الساخنة .

يتم توفير هواء التبريد الغشائي Film cooling air بطريقة يتم إحداث تيار هواء بارد نسبيا بالقرب من جدار البطانة Liner wall . في حالة عدم توفر هواء زائد ، سيتم تبريد جدران الحارقة بواسطة هواء الضاغط ، بإستخدام التبريد الحراري (الحملي) أو الإصطدامي Convective or Impingement cooling قبل الدخول إلى المشعل . يتم توفير هواء التخفيف من خلال ثقوب كبيرة مع إتجاه اللهب أو الشُعلة .

من أجل تقليل إنبعاثات أكاسيد النيتروجين ، يمكن لتوربينات الغاز ، كخيار ، أن تكون مجهزة بحارقات ذات تقنية تقلل من إنبعاثات أكاسيد النيتروجين تُسمى Dry low emission (DLE) combustor . الفرق الرئيسي بين الإحتراق التقليدي Conventional combustion و DLE هو أن مشعل DLE يستخدم كل الهواء من أجل الإحتراق (يتم إستنزاف هواء التبريد للمناطق الساخنة من الضاغط بدلا من ذلك) . تعمل المشاعل وفقا لمبدأ الخلط المسبق الضعيف (بريمكس) Lean premix principle ، بإستخدام المخروط المزدوج Double cone (إنهيار الدوامة أو تغير مفاجئ في هيكل التدفق Vortex breakdown) وهي مشاعل نوع AEV-burners (Advanced Emission Vortex Burners) .

من أجل ضمان التشغيل المستقر Stable operation على نطاق تحميل واسع ، يتم تجهيز الوقود الرئيسي على طول فتحات الهواء عن طريق الحقن الأولي للوقود عند الطرف الرأسي للمخروط Cone tip .



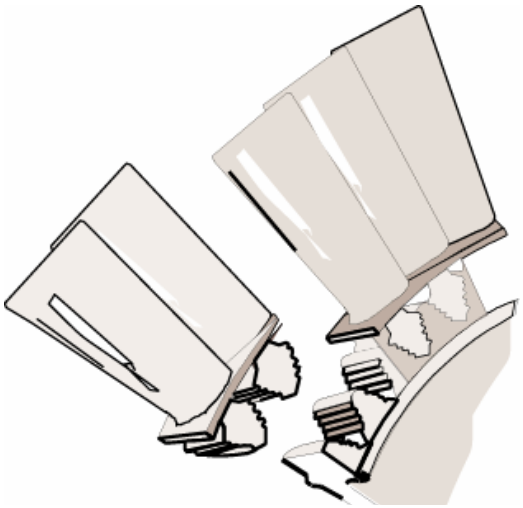
الشكل ١١ : مشعل مخروطي مزدوج
Double cone burner

التوربين The Turbine

يوفر التوربين القدرة Power للضاغط (الضواغط) والناتج الميكانيكي Mechanical output . يتم إنتاج القدرة عن طريق إستخراج الطاقة من الغازات الساخنة المنبعثة من غرف الاحتراق وتمددها إلى ضغط ودرجة حرارة أقل .
هذه العملية تتضمن إجهادات عالية High stresses . نظرا لأن التوربين يعمل بسرعة عالية ، فإنه يتعرض لقوى طرد مركزي Centrifugal forces كبيرة . يدخل الغاز إلى داخل التوربين في درجة حرارة عالية جدا مما يتسبب أيضا في حدوث الإجهاد .
يوجد نوعان أساسيان من التوربينات ، توربين التدفق الشعاعي (نصف قطري) Radial flow turbine وتوربين التدفق المحوري Axial flow turbine . في توربين التدفق الشعاعي ، يدخل الغاز التوربين في إتجاه شعاعي وفي توربين التدفق المحوري يمر تدفق الغاز عبر التوربين في الإتجاه المحوري .
بإستثناء الإستخدام في الوحدات الصغيرة جدا ، تهيمن التوربينات ذات التدفق المحوري تماما على السوق . وفي هذا الكتاب يتم التعامل فقط مع توربينات التدفق المحوري .

تصميم توربين التدفق المحوري Axial Flow Turbine Design

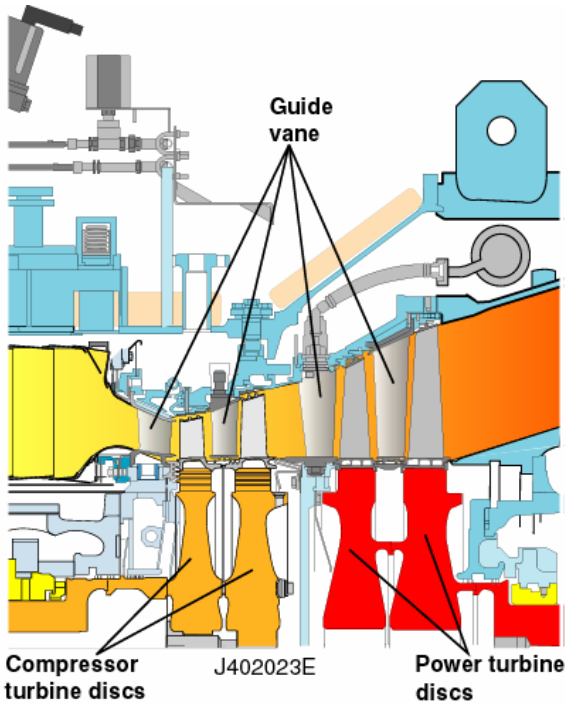
يتكون التوربين عادة من عدة مراحل . كل مرحلة تتكون من صف من ريش التوجيه الثابتة يتبعها صف من الريش الدوارة (المتحركة) . يتم تثبيت ريش التوجيه في غلاف التوربين Turbine casing ويتم تجهيز الريش الدوارة بأقراص التوربين Turbine discs بإستخدام تقنية خاصة تسمى جذور شجرة التنوب (شجرة السرو) Fir-tree roots .



الشكل ١٢ : يتم تثبيت ريش التوربين على أقراص التوربين ، ومعظمها بإستخدام تقنية خاصة تسمى جذور شجرة التنوب (شجرة السرو)

عادة ما تحتوي الريش الدوارة للتوربين على نوع من السدادات الداخلية المحكمة (مانع تسرب) Inner seal يقلل من تسرب الغازات الساخنة Hot gases تحت الريشة ويحمي أيضا المحور الدوار Rotor . وفي بعض الأحيان يكون لها مانع تسرب في الطرف رأسي Tip seal لتحسين السلوك الديناميكي (الحركي) Dynamic behavior ولتقليل تسرب الغازات (يستخدم عادة للريش الطويلة ولدرجة حرارة منخفضة للغاز) .
يتم تثبيت الأقراص على عمود دوار واحد أو أكثر ، اعتمادا على التكوين العام . ولمنع تسرب الغازات ، هناك موانع تسرب Seals لمنع تسرب الغازات الساخنة نحو أعمدة الدوران Shafts والمحامل Bearings إضافة إلى موانع التسرب الموجودة بين المراحل Stages . غالبا ما يتم تزويد موانع التسرب بهواء مستنزف

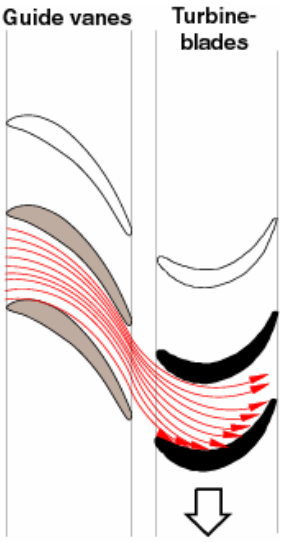
Air bleed off من مراحل الضاغط المناسبة . هواء منع التسرب Sealing air يتدفق على طول أقراص التوربين للتبريد Cooling ولمنع انتقال الحرارة Heat transfer إلى العمود الدوار والمحامل .



الشكل ١٣ : توربين التدفق المحوري

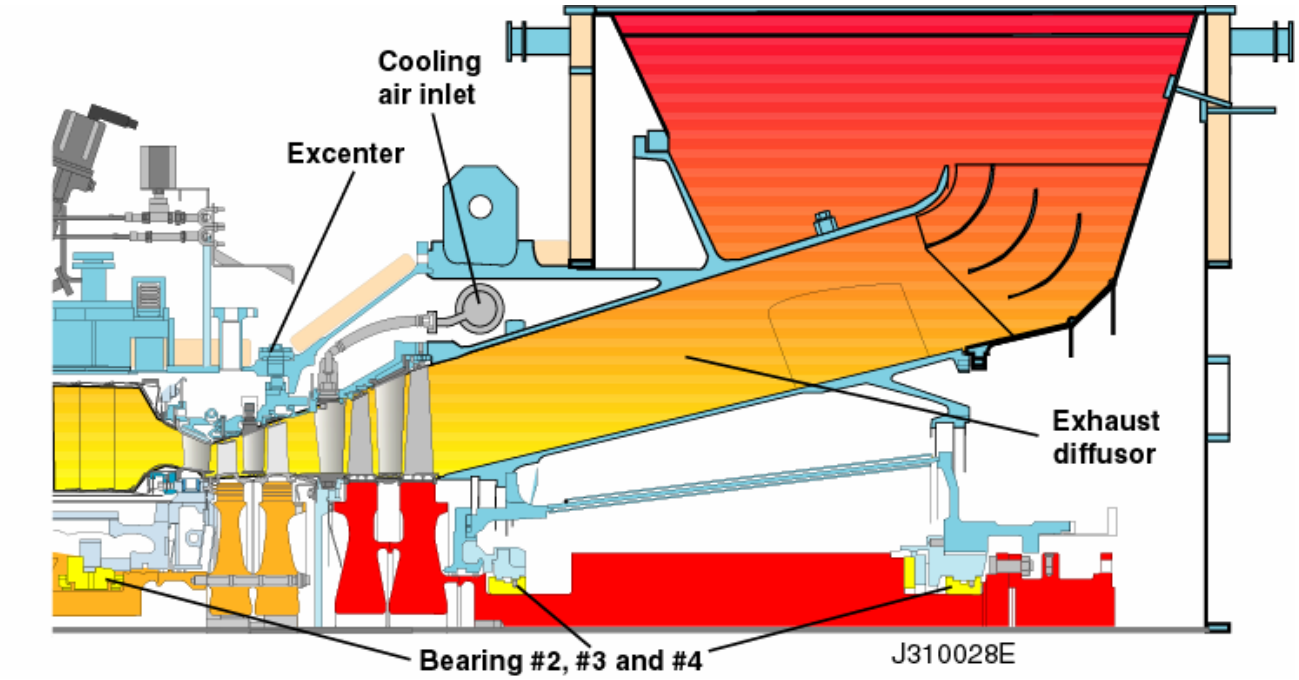
مبدأ العمل Function Principle

يتم تمدد الغازات الساخنة في الممرات المتقاربة بين ريش التوجيه Guide vanes وريش التوربين . يتم تحويل طاقة الضغط Pressure energy إلى طاقة حركية Kinetic energy وتتسارع الغازات . وفي الوقت نفسه ، يتدفق ويدور الغاز بشكل دوامة Spinning and Swirling في إتجاه ريش التوربين . تجبر ريش التوربين الغازات على الإنحراف وبما أن الممرات تتقارب ، فإن الغازات تتمدد أكثر . عند التأثير على ريش التوربين وخلال رد الفعل اللاحق عبر الممر ، يتم إمتصاص الطاقة التي تتسبب في تدوير التوربين وتوفير القدرة على تحريك و قيادة عمود التوربين Turbine shaft . تقوم ريش التوجيه في المرحلة التالية بتمدد أكثر للغازات وتوجيهها إلى الصف التالي Next row من الريش .



الشكل ١٤ : تدفق الغاز عبر التوربين

يعتمد عدد مراحل التوربين على عدد الأعمدة وعلى نسبة الإنضغاط . عملية ضغط الهواء تتطلب عدة مراحل للضاغط ، ولكن بما أن تمدد الغاز Gas expansion هو عملية طبيعية و تلقائية Spontaneous process (على عكس الإنضغاط القسري Forced compression) ، فإن هناك حاجة لمراحل أقل لتمدد الغاز مرة أخرى إلى الضغط الجوي Atmospheric pressure . إذا تم إمتصاص الطاقة بكفاءة في التوربين ، فستتم إزالة الحركة الدورانية Rotating motion من مجرى الغاز عند مغادرته مرحلة التوربين الأخيرة وسيكون التدفق الخارج من التوربين مستقيما سويّا بشكل كبير وملحوظ ، مما ينتج تدفقا محوريا في منظومة العادم Exhaust system . لغرض زيادة نسبة الإنضغاط المتاحة عبر التوربين ، يتم تشكيل قناة إو ممر العادم الحلقي Annular exhaust duct المتصل والمرتبط بالتوربين كناشر Diffuser .



الشكل ١٥ : يتم تشكيل قناة العادم الحلقي المتصلة بالتوربين كناشر

تكوينات أو أشكال التوربينات الغازية Gas Turbine Configurations

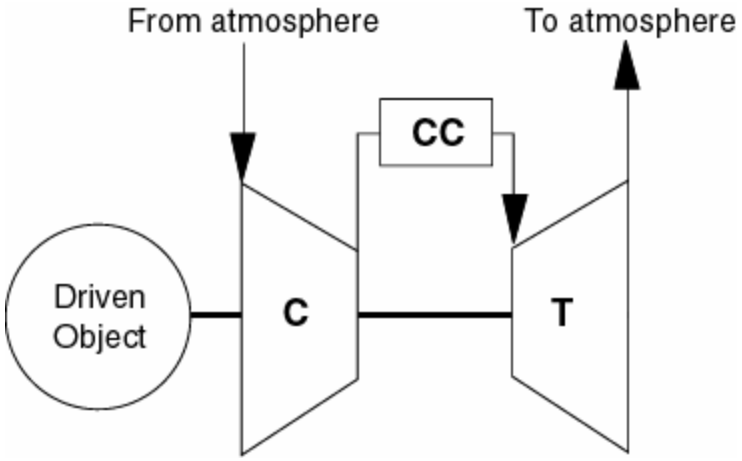
يمكن ترتيب الأجزاء الرئيسية للتوربينات الغازية في تكوينات مختلفة مع مكونات إضافية Additional components ومعدات مُنقادة Driven equipment . وفيما يلي بعض الأمثلة على ذلك :

Terminology المصطلحات	
Compressor الضاغط	C
Low Pressure Compressor ضاغط الضغط المنخفض	LPC
High Pressure Compressor ضاغط الضغط العالي	HPC
Combustion Chamber غرفة الإحتراق	CC
Turbine التوربين	T
Compressor turbine توربين الضاغط	CT
High Pressure Turbine توربين الضغط العالي	HPT

LPT	توربين الضغط المنخفض Low Pressure Turbine
PT	توربين القدرة Power Turbine
مكون مُنقاد Driven Object	ضاغط الغاز Gas compressor ، مولد Generator ، ضاغط الهواء Air compressor أو نفاث مائي Water jet ، (كل ذلك يتوقف على التطبيق)

التوربين الغازي أحادي المحور أو عمود الدوران (نموذج SGT-800) Single shaft gas turbine

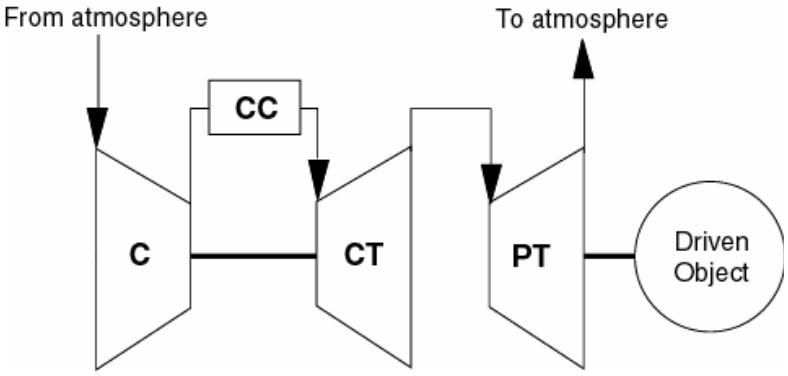
إن التوربينات الغازية أحادية العمود هي أبسط الأنواع ، ولكنها مناسبة فقط للمكونات المُنقادة في التطبيقات ذات السرعة الثابتة Fixed speed applications ، مثل توليد القدرة .



الشكل ١٦ : توربين غازي أحادي العمود

مولد غاز أحادي المحور مع توربين قدرة (نماذج SGT600 ، SGT-700) Single shaft gas generator with power turbine (SGT600, SGT-700)

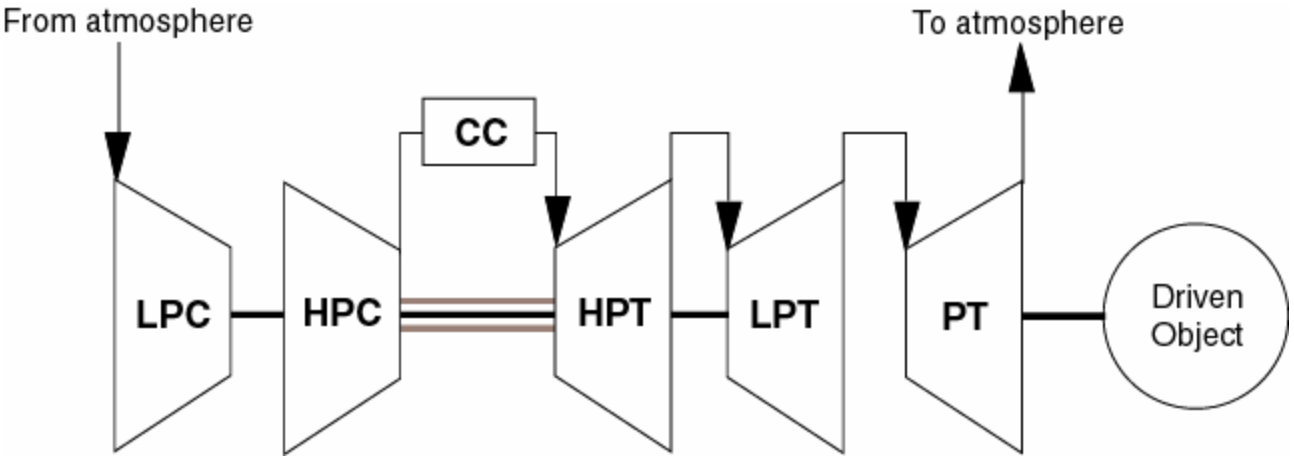
يسمح توربين القدرة الحُر المُركب مع مولد الغاز أحادي المحور بتباين (تغيير) سرعة المكون المُنقاد ضمن نطاق واسع مما يجعل هذا النموذج Model مناسبا جدا لتطبيقات نقل الحركة الميكانيكية (الضواغط) . كما أنه يُستخدم في تطبيقات توليد القدرة .



الشكل ١٧: مولد غاز أحادي المحور مع توربين القدرة

مولد غاز ثنائي المحور مع توربين قدرة (نموذج SGT-500)
Dual shaft gas generator with power turbine (SGT-500)

توربين القدرة الحر المُركب مع مولد غاز ثنائي المحور هو وحدة متعددة الإستخدامات للغاية . يوفر مولد الغاز ثنائي المحور أداءا معقولا Reasonable performance على مدى سرعة كبير للغاية لتوربين القدرة (PT) دون الحاجة إلى نزف الهواء عند تحميل الأجزاء .



الشكل ١٨ : مولد غاز ثنائي المحور مع توربين القدرة

أداء التوربين الغازي Gas Turbine Performance

يمكن تقسيم العوامل المؤثرة على الكفاءة الحرارية Thermal efficiency للتوربين الغازي والإنتاج النوعي Specific output (الإنتاج النوعي = الإنتاج لكل كيلوغرام \ ثانية (kg/s) من الغاز المتدفق عبر المحرك) ، إلى مجموعتين ، العوامل الديناميكية الحرارية (الثيرموديناميكية) Thermodynamic factors وتأثير الظروف المحيطة Ambient conditions .

العوامل الديناميكية الحرارية

يتم تقدير وتحديد هذه العوامل ، والتي هي (كفاءة المكون ، ونسبة إنضغاط الضاغط ودرجة حرارة مدخل التوربين Turbine inlet temperature) بشكل رئيسي عند تصميم المحرك .
تعتمد كفاءة المكون على نوع المكون المُستخدم وتصميمه . توفر تحسين كفاءة المكونات كفاءة حرارية أعلى للوحدة وإنتاجا أعلى .
البيانات النموذجية أو المثالية هي :

- كفاءة ضاغط التدفق المحوري $\eta c = 0.87 - 0.92$
- كفاءة غرفة الاحتراق $\eta cc = 0.98 - 0.997$
- كفاءة توربين التدفق المحوري $\eta t = 0.87 - 0.90$

لنسبة إنضغاط الضاغط ودرجة حرارة مدخل التوربين تأثير كبير على الكفاءة الحرارية للوحدة الإنتاج النوعي . علاوة على ذلك ، يتفاعل هذان العاملان بطريقة ، بحيث تكون نسبة إنضغاط معينة هي الأمثل لدرجة حرارة معينة لمدخل التوربين .

تعتمد درجة حرارة مدخل التوربين المسموح بها على المواد المستخدمة في القسم أو المسار الساخن من المحرك والعمر التشغيلي Lifetime المطلوب . في بعض الأحيان يتم ذكر أكثر من درجة حرارة واحدة ، مما يعطي أداءا مختلفا وعمرا مختلفا . زيادة درجة الحرارة تعطي عمرا أقصر ، وحتى زيادة قليلة في درجة الحرارة يمكن أن توفر عمرا أقصر إلى حد كبير .
إن مواد القسم الساخن والعمر المرغوب للقسم الساخن تحددان درجة حرارة الغاز المسموح بها والتي بدورها تتطلب نسبة إنضغاط معينة (بالنسبة لوحدة مثالية Optimized unit) . إن توافقية كل من درجة حرارة الغاز ونسبة الإنضغاط تعطي الإنتاج النوعي ، ودرجة حرارة العادم Exhaust temperature والكفاءة الحرارية ، والتي تتأثر أيضا بكفاءة المكونات .

الظروف المحيطة Ambient conditions

ضغط الهواء المحيط (P) Ambient Air Pressure :
إن الضغط الأسمي للهواء المحيط Nominal ambient air pressure ، الذي يرتبط به الناتج الأسمي Nominal output للتوربين الغازي يبلغ (1.013 بار bar) ويتراوح ضغط الهواء الفعلي Actual air pressure عادة في حدود (0.05 ± 1.013 بار) . نظرا لأن الضغط يؤثر على كثافة الهواء Air density وبالتالي التدفق الكتلي Massflow عبر المحرك ، فإنه يؤثر أيضا على الناتج الفعلي Actual output من المحرك وفقا للمعادلة التالية :

$$P_{e\ act} = P_{e\ nom} \times (P_{act} / P_{nom})$$

حيث أن :
$P_{e\ nom}$ = الناتج الأسمي .
$P_{e\ act}$ = الناتج الفعلي .
P_{nom} = ضغط الهواء الأسمي .
P_{act} = ضغط الهواء الفعلي .

عند معدل ثابت Fixed rating (درجة حرارة غاز ثابتة Constant gas temperature) ، يوفر زيادة ضغط الهواء المحيط ما يلي :
- زيادة الإنتاج .
- عدم تغير كفاءة الوحدة .

عند الإنتاج الثابت Fixed output ، تنتج زيادة ضغط الهواء ما يلي :
- إنخفاض درجة حرارة الغاز .
- إنخفاض كفاءة الوحدة .

درجة حرارة الهواء المحيط (T) Ambient Air Temperature :
إن أداء التوربين الغازي مرتبط بدرجة حرارة الهواء المحيط تبلغ (15+ درجة مئوية °C) وخاصة الإنتاج المتاح Available output يتأثر بشكل كبيرة بدرجة حرارة الهواء المحيط .
عند معدل ثابت (درجة حرارة ثابتة) ، تنتج زيادة درجة حرارة الهواء المحيط ما يلي :
- إنخفاض الإنتاج .
- إنخفاض كفاءة الوحدة .

عند الإنتاج الثابت ، تنتج زيادة درجة حرارة الهواء المحيط ما يلي :
- زيادة درجة حرارة الغاز .
- إنخفاض كفاءة الوحدة .

الرطوبة النسبية للهواء المحيط (RH) Ambient Air Relative Humidity :

إن الأداء الأسمي للتوربين الغازي Nominal performance مرتبط بالرطوبة النسبية للهواء المحيط البالغة (60%) . إن أداء التوربين الغازي يتأثر بالرطوبة وهذا التأثير يكون ذو أهمية فقط عند درجات الحرارة العالية للهواء المحيط .

عند معدل ثابت (درجة حرارة غاز ثابتة) ، تنتج زيادة الرطوبة النسبية ما يلي :

- زيادة الإنتاج .
- عدم تغير كفاءة الوحدة .

عند الإنتاج الثابت ، تنتج زيادة الرطوبة النسبية ما يلي :

- إنخفاض درجة حرارة الغاز .
- عدم تغير كفاءة الوحدة .

الظروف التشغيلية Operating Conditions

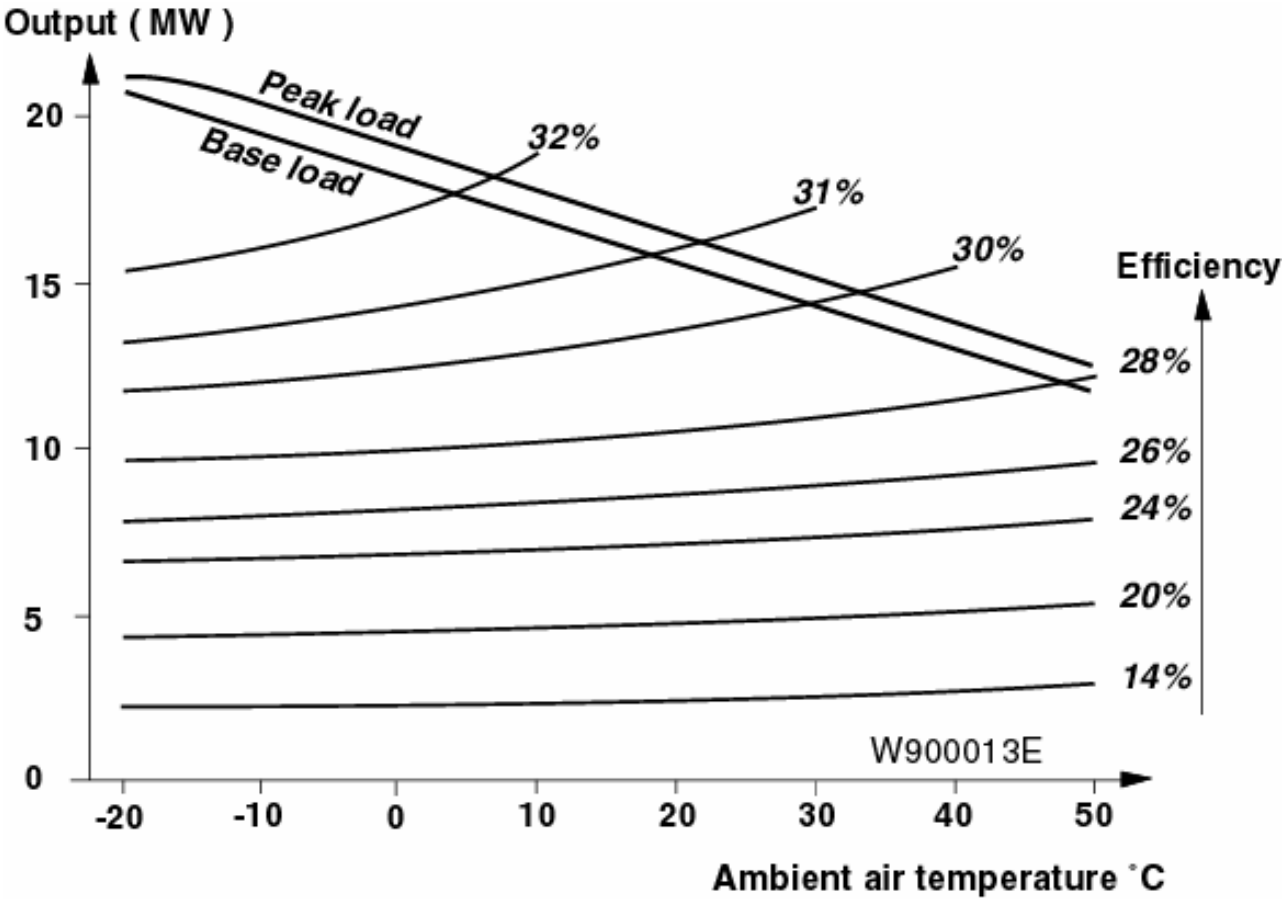
الشكل (١٩) يوضح مثال على مخطط أداء التوربين الغازي ثنائي المحور . يوضح الرسم البياني الناتج الكهربائي Electrical output للمولد مقابل درجة حرارة الهواء المحيط ، مع الكفاءة الحرارية كعامل متغير Parameter .

في درجة حرارة الهواء المحيط المنخفضة ، يكون الإنتاج محدودا بسبب سرعة مولد الغاز Gas generator speed ، وفي درجات الحرارة الأعلى يكون محدودا بدرجة حرارة مدخل التوربين وسرعة مولد الغاز . وبطبيعة الحال يتأثر الإنتاج والكفاءة بضغط الهواء المحيط والرطوبة كما تم توضيحه سابقا .

كما هو موضح في مخطط الأداء ، تتأثر كفاءة الوحدة بمعدل التحميل Loading rate . توفر زيادة الحمل عند درجة حرارة الهواء المحيط الثابتة كفاءة أعلى بفضل زيادة الضغط المُستلم من الضاغط وزيادة درجة حرارة مدخل التوربين . يتم تحديد أثنين من حدود الحمل ، الحمل الأساس Base load وحمل الذروة Peak load . التشغيل فوق الحمل الأساس يوفر فترات خدمة أقصر بسبب زيادة الإجهادات Stresses ووفقا للصيغ الموضحة في الصفحة التالية .

عادة ما يكون منحنى الأداء Performance curve منحنيا رمزيا (أسميا) Nominal curve ويمكن أن ينحرف المنحنى الحقيقي أكثر أو أقل وفقا لصفات المحرك الخاصة . أثناء تشغيل المحرك ، في حالة الانحراف عن الأداء الأسمي ، يمكن ضبطه (تحديده) إما على درجة حرارة مدخل التوربين الأسمي أو لإعطاء ناتج أسمي . للتحقق من حالة الوحدة ، على سبيل المثال إذا كان يجب تنظيف الضاغط ، فيمكن إجراء فحص الإنتاج أو الناتج (المردود) Output check . ويعني هذا الفحص أن الناتج الفعلي يتم قياسه وتصحيحه تبعا لإنحراف ظروف الهواء المحيط ، ثم مقارنته بالقياس إلى القيمة المرجعية Reference value . يتم ذكر خسارة الإنتاج المسموح Allowable output loss بها في تعليمات تنظيف الضاغط .

الأسباب الأخرى لخسارة الإنتاج هي مرشحات (فلاتر) سحب أو دخول الهواء Air intake filters المسدودة ، وتضرر وتلف ريش التوربين ، وتسرب الهواء \ الغاز Air/gas leakage ، إلخ .



الشكل ١٩ : الناتج الكهربائي للمولد مقابل درجة حرارة الهواء المحيط ، مع الكفاءة الحرارية كعامل متغير

ترتبط فترات الخدمة بوقت التشغيل وعدد مرات بدء التشغيل Number of starts .
نظرا لأن الإجهادات التي تتعرض لها التوربين الغازي تختلف بإختلاف معدل الحمل Load rating وإذا تم اختيار بدء التشغيل بشكل سريع أو عادي ، فإنه يتم إعطاء أو ذكر عدد ساعات التشغيل Operating hours و عدد مرات بدء التشغيل في صيغة ساعات تشغيل مكافئة Equivalent operating hours وعدد مرات بدء التشغيل المكافئة Equivalent starts وفقا لبرنامج الصيانة Maintenance program . وفيما يلي مثال على ذلك :

$$\mathbf{H_0 = C_f \times C_x \times H + 5S_0}$$
$$\mathbf{S_0 = C_y \times S}$$

حيث أن :
H_0 = ساعات التشغيل المكافئة Equivalent operating hours .
C_f = عامل الوقود Fuel factor .
= (1) لوقود الغاز Gas fuel (acc. to BA-241-6E)
= (1.2) لنوع وقود 1 Type 1 fuel (acc. to AA-243-9E)
= (1.5) لنوع وقود 2 Type 2 fuel (acc. to AA-243-9E)
= (2.0) للنفط الخام والغاز الحامضي Crude oil and sour gas .
C_x = عامل الإجهاد Stress factor .

العامل الأسي (0.9 - 4.0) حسب معدل التحميل . العامل يتم حسابه وتحديثه تلقائيا بواسطة معدات التحكم في الوحدة .

H = ساعات التشغيل Operating hours .

S_0 = عدد مرات بدء التشغيل المكافئة Equivalent starts .

C_y = عامل بدء التشغيل Start factor .

= (1) لبدء التشغيل العادي (الطبيعي) Normal start .

= (5) لبدء التشغيل السريع Fast start .

S = عدد مرات بدء التشغيل No. of starts .

References المراجع

1- Gas Turbine Primer – SIEMENS .
2- Wikipedia- the free encyclopedia ويكيبيديا ، الموسوعة الحرة
3- Dictionary of Engineering – Second Edition - McGraw-Hill .
4- translate.google.com
٥ - موقع المعاني www.almaany.com .
٦ - معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية - أحمد شفيق الخطيب - ٢٠٠٥ .