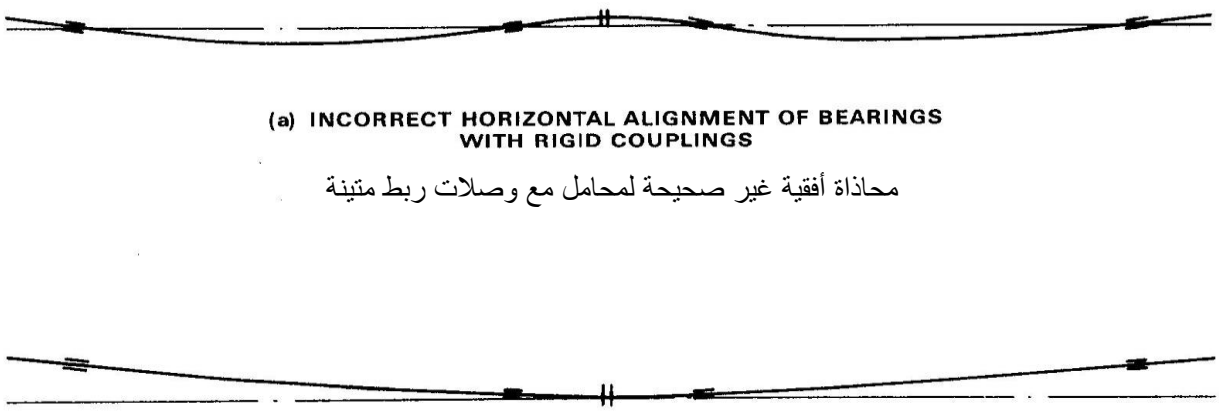
معلومات عامة عن أساسيات تصميم العمود الدوار للتوربين
General notes on turbine - shaft design

محاذاة محامل العمود الدوار Alignment of shaft bearings

يتم تثبيت محاور Rotors التوربينات الحديثة بوصلات ربط صلبة ومتينة Solid couplings ، بحيث تشكل عمودا واحدا طويلا ، ويتم إسناد ذلك بعدد من المحامل أو المساند Bearings . ومع ذلك ، يجب علينا ألا نفكر في هذا المحور على أنه صلب Rigid ، لأنه سينحني Bend تحت ثقله أو وزنه Weight .
إذا وضعنا جميع المحامل في نفس الارتفاع ، فسيتم إجبار المحور إلى أن يكون على شكل منحرف Deflected shape كما هو موضح في الشكل أدناه الجزء (a) ، وهذه المحاذاة Alignment غير صحيحة لأنه في هذه الحالة لن تكون وجها وصلة الربط الصلبة (الغير مربوطة (Unbolted متوازية Parallel مع بعضها البعض .
يجب ضبط المحامل كما هو موضح في الجزء (b) ، يكون المحملين المركزيين Centre bearings أدنى من المحملين الخارجيين Outer bearings ، حتى يكون العمود الدوار (المحور) قادرا على البقاء في منحنى مستمر Continuous curve . يسمح هذا الضبط بأن يكون وجها وصلة الربط الصلبة متوازين مع بعضهما البعض . الهدف الأساسي من هذا الترتيب هو الحصول على قوة قص Shear force صفري وعزم إنحناء أو إلتواء Bending moment صفري عند براغي أومسامير وصلة الربط Coupling bolts .



(a) INCORRECT HORIZONTAL ALIGNMENT OF BEARINGS WITH RIGID COUPLINGS

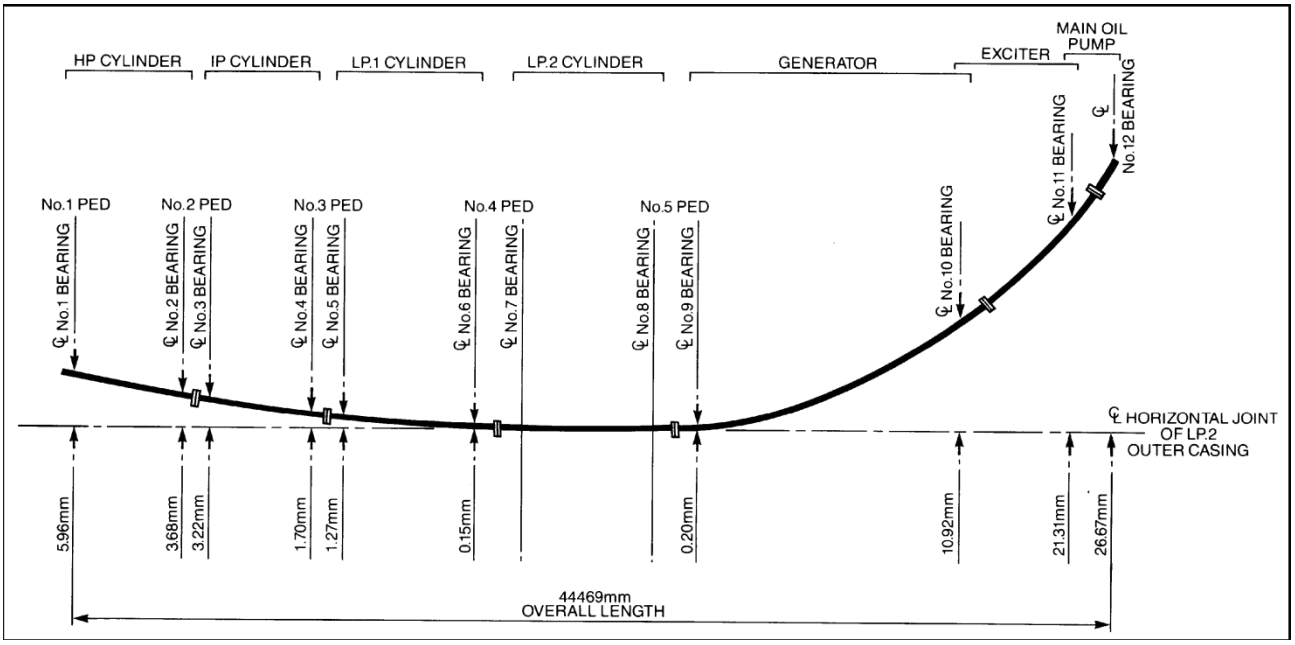
محاذاة أفقية غير صحيحة لمحامل مع وصلات ربط متينة

(b) CORRECT ALIGNMENT OF BEARINGS TO NATURAL DEFLECTION OF SHAFTS

محاذاة صحيحة لمحامل أعمدة بإنحراف طبيعي

الشكل (١٢٨) محاذاة العمود الدوار Shaft Alignment

في التوربينات الكبيرة قد يتطلب أن تكون المحامل المركزية أدنى بـ (١٢ ملم mm) من المحامل الخارجية لكي يتمكن عمود الدوران من الانحراف وتشكيل هذا المنحنى المتواصل و المستمر.



الشكل (١٢٩) محاذاة نموذجية لعمود مولد توربيني كبير Large turbo generator

ملاحظات توضيحية :

Shear force : قوى القص هي القوى المؤثرة علي أجزاء من الجسم لتدفع كل منها جزء من الجسم في اتجاه واحد والجزء الآخر من الجسم يتم دفعه في الاتجاه المعاكس .

Bending moment : عزم الإلتواء أو الإنحناء هو رد الفعل الناتج في عنصر إنشائي عندما تؤثر قوة خارجية أو عزم دوران على العنصر الإنشائي مسببة إنحناء للعنصر . تعتبر جسور البناء من أبسط وأشهر العناصر التي يؤثر عليها عزم الإنحناء . كمثال عمود الدوران بسيط الإرتكاز من كلا النهايتين. تعني كلمة بسيط الإرتكاز أن عمود الدوران يمكنه الدوران ولذلك ليس له عزم إلتواء . تتعرض النهايات إلى أجهاد القص فقط .

Turbo Generator : مولد توربيني هو تركيب متكون من توربين متصل مباشرة بمولد كهربائي لتوليد الطاقة الكهربائية Electric power .

تُستخدم على نطاق واسع المحامل البسيطة (المقعدية أو الإنزلاقية) ذات المعدن الأبيض Plain white metal Journal bearings بسبب قدرة أو سعة تحميلها العالية High loading capacity ، وعمرها التشغيلي الطويل Long life ومعدل إستهلاكها (معدل البلي) المنخفض Low rate of wear .

إن العمر الطويل لهذه المحامل يرجع إلى حقيقة أنه ، عندما يدور عمود الدوران بسرعة ، يتم تلقائيا تشكيل غشاء Film طبقة رقيقة من زيت الضغط العالي بشكل مستمر بين المعدن الأبيض والعمود .

ملاحظة : White metal المعدن الأبيض ويسمى أيضا معدن بابت Babbitt metal هي سبائك أساسها الرصاص Lead أو القصدير Tin ، أو معدن صب الزنك Zinc die-casting metal . تستعمل في سطوح المحامل البسيطة لمنع الاحتكاك . سميت السبيكة على اسم مكتشفها إسحق بابت Isaac Babbitt .

يضمن الغشاء الزيتي عدم حدوث أي تلامس معدني Metallic contact وبالتالي لا يحدث أي تآكل Wear .

يتم تزويد المحامل بالزيت من منظومة التزييت Lubrication system .

ملاحظة توضيحية : التوربين الذي يدور بسرعة عالية سيولد قوة دفع محورية Axial thrust . يمنع المحمل الدفعي Thrust bearing هذا الدفع المحوري من التطور إلى الحركة المحورية Axial motion . انه يحمل ويمسك أساسا تركيب التوربين في مكانه .

يتم تصميم المحامل المقعدية لتحمل القوى الشعاعية للمحور الدوار Rotor radial forces ولكن هناك أيضا القوى المحورية Axial forces التي تتولد من الدفع Thrust . و لغرض الحفاظ على الوضع المحوري الصحيح للمحور ، يتم استخدام محمل محوري Axial bearing .
يُستخدم زيت الرفع Lifting oil لرفع العمود (المحور) أثناء بدء التشغيل Start up لتقليل التآكل في معدن المحامل حيث أن طبقة الزيت لم يتم تكوينها بعد ، ويستخدم هذا النظام لتقليل تكلفة إستخدام مواد تحمّل قوية والتي تقاوم البلي (التآكل) أثناء السرعة المنخفضة عن طريق إستبدال هذه المحامل مع مواد محامل أقل تكلفة .
نظرا لأن أعمدة التوربينات متصلة مع بعضها بواسطة وصلات ربط بالبراغي (إقتران صلب و متين) Bolted joints (rigid coupling) وبالتالي فإن قوة الدفع المحورية Axial thrust لعمود واحد سيدفع كل عمود التوربين ، ولكن إذا كان هناك مسنن تخفيض سرعة Reduction gear بين الأعمدة ، فسيكون لكل عمود حركته المحورية الخاصة به وبالتالي يجب أن يكون لكل واحد محمل محوري .

الإختلافات الرئيسية بين محور التوربين الغازي ومحور التوربين البخاري
The main deference between gas turbine shaft & steam turbine shaft

ت	محور التوربين البخاري Steam turbine shaft	محور التوربين الغازي Gas turbine shaft
١	معظم أعمدة التوربينات البخارية متينة Solid	نظرا لإرتفاع درجة حرارة التشغيل Operating temperature ، يجب أن يكون العمود مجوف Hollow من الداخل لتوفير ممرات لهواء التبريد
٢	يتطلب مراقبة تمدد الهيكل والتمدد التفاضلي لكبر وثقل هيكل التوربين وكذلك العمود ، وفوق ذلك فهي تتمدد وتتقلص أكثر بالنسبة لبعضها البعض	بما أن حجم العمود صغير وقصير ، فإنه يتمدد ويتقلص بدرجة أقل ، لذلك لا توجد هناك مراقبة لتمدد الهيكل Shell expansion ولا التمدد التفاضلي differential expansion
٣	مطلوب فشل قدرة التآكل نتيجة الدفع المحوري Axial thrust wear power في بعض التصاميم بسبب تباطؤ معدل التسخين (تمدد حراري بطيء Slow thermal expansion في التوربينات البخارية بالمقارنة)	تعتمد معظم التوربينات الغازية على أجهزة تحسس درجة الحرارة Temperature sensors المثبتة في معدن المحامل للكشف عن التآكل بدلا من كاشف التآكل لمحمل الدفع Thrust wear detector
٤	يتم تصنيعها بشكل رئيسي من الفولاذ أو الصلب Steel (سبيكة أساس فولاذية Steel base alloy) مع (١١-١٣٪) من الكروم Chromium للوحدات الكبيرة	مصنوع من مواد مركبة Complex materials وسبائك Alloys ويتطلب طلاء السطح Surface coating في بعض الأجزاء
٥	يتم تصنيع ريشها بواسطة الآلات (تشغيل آلي ، تشغيل بالماكينات) Machining	يتم تصنيع الريشة من خلال التشكيل والصب Forming & Casting (مكلفة جدا)
٦	التوربينات البخارية محاكاة لطاحونة الرياح Wind mill	عمليات التوربين الغازي تحاكي محرك الإحتراق الداخلي Internal combustion engine
٧	درجة الحرارة أعلى في بداية المحور الدوار	درجة الحرارة هي الأقل في بداية المحور الدوار
٨	إنخفاض درجة حرارة التشغيل	درجة حرارة تشغيل أعلى بكثير

بسبب إستخراج أو إستخلاص ضاغط التوربين الغازي للطاقة الميكانيكية Mechanical power من التوربين فإن نسبة هذه الطاقة الميكانيكية حوالي (٥٠٪ إلى ٦٧٪) .

لاحظ أن التوربينات البخارية تتطلب (٢٪) من تدفق البخار المقدر Rated steam flow عندما تكون في وضعية اللاحمل Idling (سرعة كاملة بدون حالة حمل) وهذا التدفق هو فقط لمقاومة إحتكاك المحمل Bearing friction وخسائر الإحتكاك السطحي لأقراص المحور مع البخار Windage losses ، في حين أن التوربينات الغازية تحتاج إلى (٦٠ ٪ - ٦٧ ٪) من تدفق الحمل الكامل Full load flow عندما تكون في وضعية اللاحمل ، وهذا التدفق هو لمقاومة إحتكاك المحمل ، وخسائر الإحتكاك السطحي لأقراص المحور والشغل المنجز على الضاغط Compressor work .

ملاحظة : Windage losses خسائر تحدث بسبب الإحتكاك السطحي لأقراص التوربين الدفعي Impulse turbine عند دورانها في الوسط البخاري والنتيجة هي فقدان قدرة المحور لزيادة الطاقة الحركية Kinetic energy والطاقة الحرارية Heat energy للبخار .

السرعات الحرجة لمحور التوربين Critical speeds for turbine rotor

لغرض فهم السرعات الحرجة لمحور التوربين ، يجب معرفة التعريفات التالية :

أ - أنواع الإهتزاز Types of vibration
الإهتزاز ، بشكل عام ، يقلل من عمر المعدات Equipment ، وفي الحالات القصوى ، يمكن أن يؤدي إلى تلف المعدات أو حتى حالات الفشل الكارثية Catastrophic failures . لذا يجب ملاحظة ومراقبة الإهتزاز لتجنب تلف التوربين . هناك ثلاثة أنواع من الإهتزازات من حيث إتجاه الحركة والتشوهات Deformations التي يتعرض لها الكائن المهتز وهي :
١ - الجانبي Lateral
الإهتزاز الجانبي Lateral vibration هو الأكثر شيوعا . يحدث عندما ينحرف الجسم \ ينحني deflect/bend بشكل جانبي إلى محوره الطولي Longitudinal axis . معظم أجهزة تحسس إهتزاز التوربينات Turbines vibration sensors تتحسس الإهتزاز الجانبي .
٢- محوري Axial
يحدث الإهتزاز المحوري Axial vibration عندما يتعرض الجسم لقوى محورية نبضية Pulsating axial forces . من الصعب ملاحظة هذا النوع من الإهتزاز ويجب إشراك متحسسات خاصة Special sensors لمراقبة هذا النوع من الإهتزازات .
٣ - الإلتوائي Torsional
يحدث الإهتزاز الإلتوائي Torsional vibration عندما يمر الجسم من خلال حركة زاوية نبضية Pulsating angular motion حول محور مرجعي Axis of reference ، وعادة ما يكون محوره الطولي الخاص .

ب - السرعة الحرجة Critical Speed

السرعة الحرجة هي سرعة العمود الدوار الذي يكون فيه أحدى الترددات الطبيعية Natural frequencies لمنظومة دعم أو إسناد البنية الفوقية للمحور والمحامل Rotor-bearing-foundation system يساوي التردد القسري Forced frequency الذي يتوافق مع السرعة الدورانية . يعكس مصطلح (منظومة دعم أو إسناد البنية الفوقية للمحور والمحامل) حقيقة أن الترددات الطبيعية للمحور الدوار تتأثر بتصلب ومتانة دعامتها Stiffness of its support . السرعة الحرجة هي السرعة التي يحدث بها الرنين Resonance .

ج – التردد الطبيعي Natural frequency

التردد الطبيعي عبارة عن تردد يتم عنده إهتزاز الكائن أو الجسم Object بعد إزالة قوة البدء Initiating force وترك الكائن بمفرده . يشار إلى هذا النوع من الإهتزاز على أنه إهتزاز حر أو طبيعي Natural vibration . عمليا ، بسبب الإحتكاك Friction ونقل الطاقة Energy transmission إلى الأجسام المحيطة ، فإن سعة أو مدى الإهتزاز الحر ينخفض حتى يصبح الجسم ساكنا .

السبب الذي يؤدي إلى إستمرار الإهتزاز الطبيعي بعد إزالة الاضطراب الأولي هو مزيج من القصور الذاتي Inertia للجسم (الجسم ذو القصور الذاتي العالي سوف يكون له تردد طبيعي أقل) و الصلابة Stiffness or Rigidity (كلما كان الجسم أشد وأصلب سيكون له تردد طبيعي أعلى) .

مفهوم الترددات الطبيعية مهم لمنع حدوث الاهتزاز المفرط Excessive vibration . لتجنب الرنين ، ينبغي أن نتجنب الحالات التي يكون فيها التردد القسري (سرعة المحور) مساويا للتردد الطبيعي . لذلك يجب أن نعرف العوامل Factors المؤثرة على قيم الترددات الطبيعية .

ملاحظة توضيحية : Inertia القصور الذاتي هو مقاومة أي جسم مادي لأي تغيير في موقعه Position وحالة حركته State of motion ويتضمن ذلك تغييرات في سرعة الكائن أو إتجاهه Direction أو حالة سكونه .

يتم تعريف القصور الذاتي أيضا على أنه ميل الأجسام لمواصلة الحركة في خط مستقيم Straight line بسرعة ثابتة Constant velocity . مبدأ القصور الذاتي هو أحد المبادئ الأساسية في الفيزياء الكلاسيكية Classical physics التي لا تزال تُستخدم لوصف حركة الأجسام وكيفية تأثرها بالقوى المطبقة عليها . وكان العالم البريطاني السير إسحاق نيوتن Isaac Newton أول من وصف القصور الذاتي وقدم هذه الفكرة في أول قانون خاص بالحركة First Law of Motion .

د - التضاؤل أو التخميد Damping

تخميد الإهتزاز هو تبديد الطاقة الميكانيكية Mechanical energy لجسم يهتز . والتخميد في الإهتزازات الحرة ، يقلل من سعة الإهتزاز إلى الصفر .

المصادر الرئيسية Main sources للتخميد هي :

١- الإحتكاك الداخلي في مادة الجسم المهتز .

٢- الإحتكاك بين الأسطح المنزلقة Sliding surfaces للجسم المهتز وبعض الأجسام الأخرى .

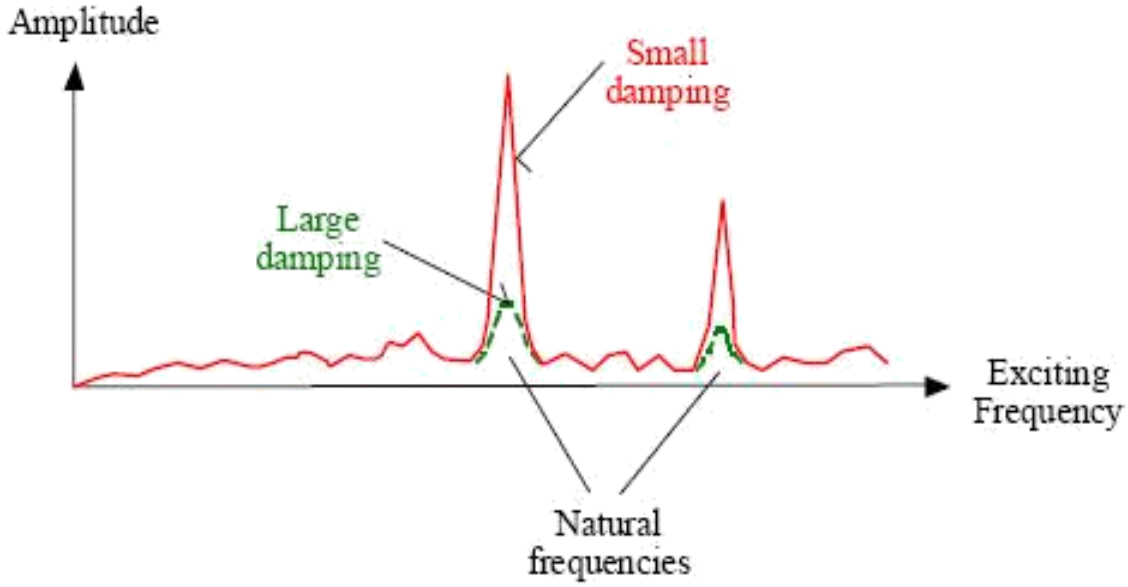
٣- الإحتكاك بين سطح الجسم والمائع المحيط به Surrounding fluid (تخميد الموائع) .

على الرغم من أن الموائع ، بشكل عام ، توفر بعض التثبيط أو التخميد ، فإنها في بعض الأحيان تسبب الإهتزاز

هـ - الرنين Resonance

تحدث إهتزازات عالية جدا عندما تكون سرعة المحور الدوار متزامنة مع التردد الطبيعي للمحور . قد يكون الرنين خطيرا لأنه قد ينتج إهتزازا مفرطا (زائدا) .

عندما تعمل الآلة بسرعة حرجة ، سيزيد الرنين من الإهتزاز ، خاصة إذا كان التخميد ضعيفا . في الشكل التالي ، يمكنك أن ترى أن الإهتزاز سيزداد ليس فقط عند القيمة الفردية لسرعة حرجة ولكن أيضا في نطاق سرعة Speed range حولها .



الشكل (١٣٠) يمكن للرنين أن يزيد من سعة الإهتزاز Vibration Amplitude بشكل كبير عندما يكون التخميد ضعيفا .

ينبغي تجنب التشغيل عند أو بالقرب من السرعة الحرجة لأن الاهتزاز سيزداد وقد يصبح غير مقبول . هذا الشرط يعني أن سرعة التشغيل العادية Normal operating speed يجب أن تكون بعيدة بما فيه الكفاية عن أقرب السرعات الحرجة (أقل من ± ٢٠٪) .

في بعض الآلات أو المعدات مثل المولدات التوربينية Turbine generators والمضخات والضواغط ذات السرعة العالية High-speed pumps and compressors ، تكون سرعة التشغيل العادية أعلى من أدنى السرعات الحرجة . تمر هذه الآلات خلال السرعات الحرجة أثناء فترة الإعداد (الصعود التدريجي للسرعة) Run-up والنزول التدريجي للسرعة Rundown ، ويتم هذا المرور بشكل آمن تماما طالما يوجد هنالك تخميد كافي (في الماكينة الدوارة ، يتم توفير التخميد عادة بواسطة طبقة الزيت Oil film في المحامل ، وبواسطة الغلاف الحديدي المصبوب Cast iron casing وبواسطة الأساس الخرساني Concrete foundation) .

عادة يكون لأي محور دوار سرعة حرجة واحدة أو أكثر والتي قد تكون دون أو فوق سرعة التشغيل .

أثناء دوران محور التوربين يجب الحذر عند الأقتراب من سرعة الدوران الحرجة للمحور وفي العديد من أنظمة التحكم والسيطرة Control systems فإن معدل السرعة يزداد أكثر من المعدل الطبيعي عند المرور بالقرب من السرعة الحرجة وذلك لتقليل الرنين وحماية المحور الدوار من الإهتزاز المفرط (الزائد) .

كل محور توربين له سرعات حرجة خاصة بها ، وهي بشكل أساسي سرعات حرجة جانبية Lateral critical speeds وسرعات حرجة توترية Tensional critical speeds .

تقل السرعة الحرجة مع زيادة طول العمود الدوار أو تقليل قطر المحور الدوار .

العوامل التي تؤثر على السرعة الحرجة :

١- طول العمود الدوار Length of the shaft .

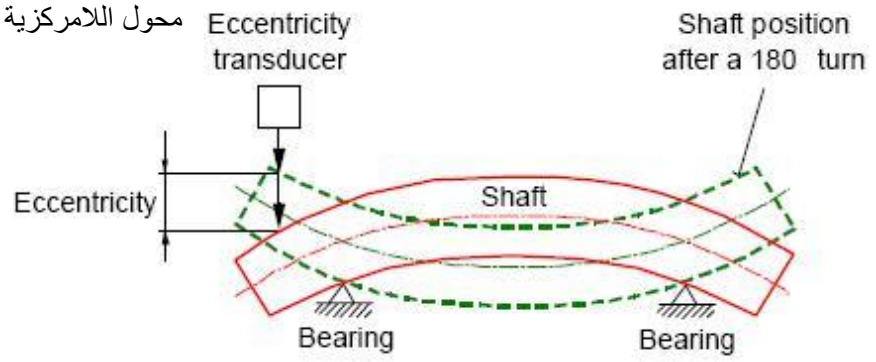
٢- قطر المحور الدوار Diameter of the rotor .

٣- المسافة بين محامل المحور الدوار Distance between rotor bearings .

٤- صلابة دعامة المحور الدوار Rigidity of the rotor support .

و - تقوس العمود الدوار Shaft Hogging
التقوس هو إنحناء تصاعدي Upward bending للمحور الدوار ويحدث عندما يكون الجزء العلوي للعمود الدوار أكثر سخونة من الجزء السفلي .
يحدث هذا التفاوت في درجة الحرارة Temperature differential بسبب المائع Fluid الموجود حول المحور الدوار الذي يكون أبرد وبالتالي فإن المائع الأكثف أو الأثقل Heavier fluid يتجمع في الجزء السفلي ، في حين يتم دفع المائع الأدفأ وبالتالي المائع الأخف Warmer and lighter fluid إلى الجزء العلوي . تحدث هذه العملية عندما يترك محور التوربين في حالة سكون Stationary (مع عدم وضعه تحت عملية التدوير البطيء Turning gear operation) لغرض التبريد أو عند بدء تشغيل التوربين بدون إحماء Warmed up إن التقوس عملية سريعة . قد تستغرق بضع دقائق فقط بما يكفي لإغلاق بعض الخلوصات (السماحات) الشعاعية أو النصف قطرية Radial clearances في الماكينة . وقد تؤدي محاولة تدوير المحور في هذه الحالة إلى تلف الأجزاء الداخلية للماكينة (مثل ريش التوربين Turbine blades) والمحامل Bearings من خلال الإحتكاك .
لاحظ أن التقوس يؤثر أيضا على غلاف التوربين . ومع ذلك ، فإن المحور الدوار هو مصدر القلق الأساسي ، لأن إنحنائه أو تقوسه يُحدث إختلال في التوازن الكتلي Mass unbalance ، والذي لا يؤثر على الغلاف ، وثانيا ، بسب أن تقوس المحور يكون أسرع وأكبر من تقوس الغلاف . والسبب في ذلك هو أن المحور يُغير درجة حرارته بشكل أسرع من الغلاف الأثقل الذي يحتاج إلى مزيد من إنتقال الحرارة Heat transfer لتغيير درجة حرارته . (أيضا لأن المحور أصغر كفاية لكي يتوسع ويتقلص بشكل أسرع) .

ي – إرتخاء (ترهل) العمود الدوار Shaft Sagging
هو إنحناء العمود الدوار نحو الأسفل تحت تأثير وزنه Weight .
لاحظ وجود إرتخاء قليل جدا ، أثناء عملية الدوران العادي للعمود ، لأن المحور الدوار ليس صلبا بشكل غير محدود Infinitely rigid ، ولكن عندما يكون المحور في حالة سكون ، يزداد الإرتخاء لأن نفس الجزء من المحور يتعرض لإجهاد ثابت Constant stress لفترة طويلة ، يكون النصف العلوي في حالة ضغط Compression ، بينما يكون النصف السفلي في حالة توتر أو شد Tension .
على النقيض من التقوس ، فإن الإرتخاء عملية بطيئة Slow process ويستغرق الأمر أياما بدلا من دقائق لتتطور إلى مستوى مقلق Troublesome level . مصطلح آخر مرتبط ارتباطا وثيقا بالتقوس .
لاحظ أن إرتخاء العمود عملية بطيئة (عدة أيام للتأثير على العمود ويمكن إزالتها عن طريق وضع العمود تحت عملية التدوير البطيء لضبط الإنحراف (اللامركزية) Eccentricity في عمود المحور.



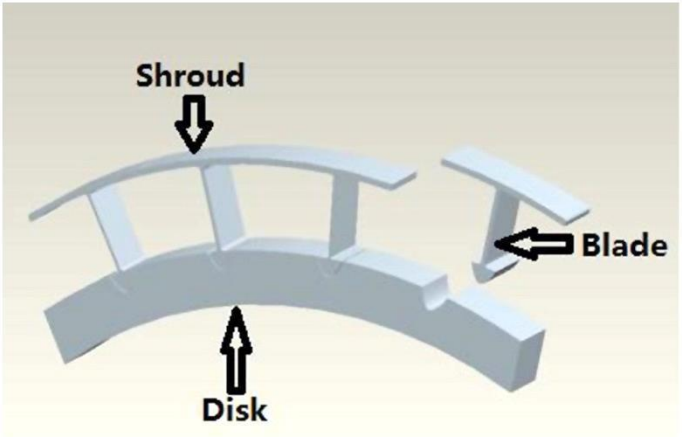
الشكل (١٣١) تقوس وإرتخاء العمود الدوار Shaft hogging & sagging

ز - لا مركزية العمود الدوار Shaft Eccentricity
اللامركزية هي مقياس لإنحراف deflection المحور الدوار عن الخط المستقيم تماما ، هذا القياس غير متاح عندما يكون المحور في حالة سكون . وأسباب لا مركزية العمود الدوار هي :
١- تقوس العمود
٢- إرتخاء أو ترهل العمود .
٣- إحتكاك الأجزاء الدوارة مع الأجزاء الثابتة Rubbing of rotating parts with stationary parts في المحور .
٤- التسخين أوالتبريد السريع Rapid heating or cooling للمحور .

الأسباب الرئيسية لإهتزاز العمود الدوار في التوربين Main reasons of shaft vibration in turbine

١- أجزاء غير متوازنة Unbalanced parts .
٢- محاذاة رديئة للأجزاء Poor alignment of parts .
٣ - أجزاء حرة الحركة (مفككة ، غير محكمة ، رخوة) Loose parts .
٤ - إحتكاك الأجزاء Rubbing parts .
٥ - مشاكل التزييت Lubrication troubles .
٦ – عدم إستقرار التدفق Flow instability .
٧ - مشاكل الأساس Foundation troubles .
٨ - أجزاء متشققة أو مستعملة ومستهلكة إلى حد بعيد Cracked or excessively worn parts .
٩- الإهتزاز الناتج عن الريش Vibration result from blades .
١٠- تدوير المحور بالقرب من سرعته الحرجة Running the rotor near its critical speed .
لاحظ أنه فيما يتعلق بالحالة رقم ١٠ ، يجب التأكد من أن إهتزاز المحور ناجم عن السرعة الحرجة وليس عن طريق بعض المشاكل الأخرى .

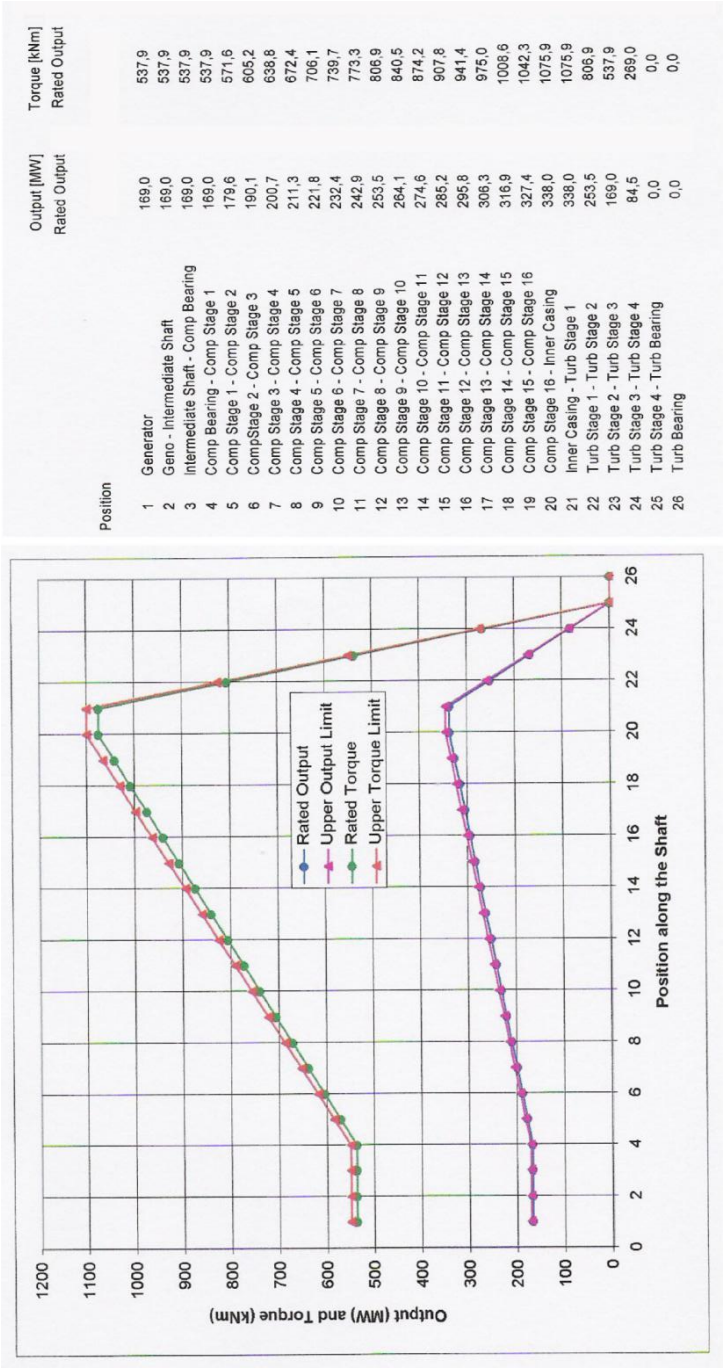
إحدى الطرق المستخدمة للحد من الإهتزازات في المرحلة الأخيرة Last stage من التوربين ، هي التحوير المتمثل بربط (ضم) أجزاء الريشة Blade segments معا في نطاق الغطاء (الدرع ، طوق تقوية) Shroud band



الشكل (١٣٢) طوق التقوية (Shroud band)

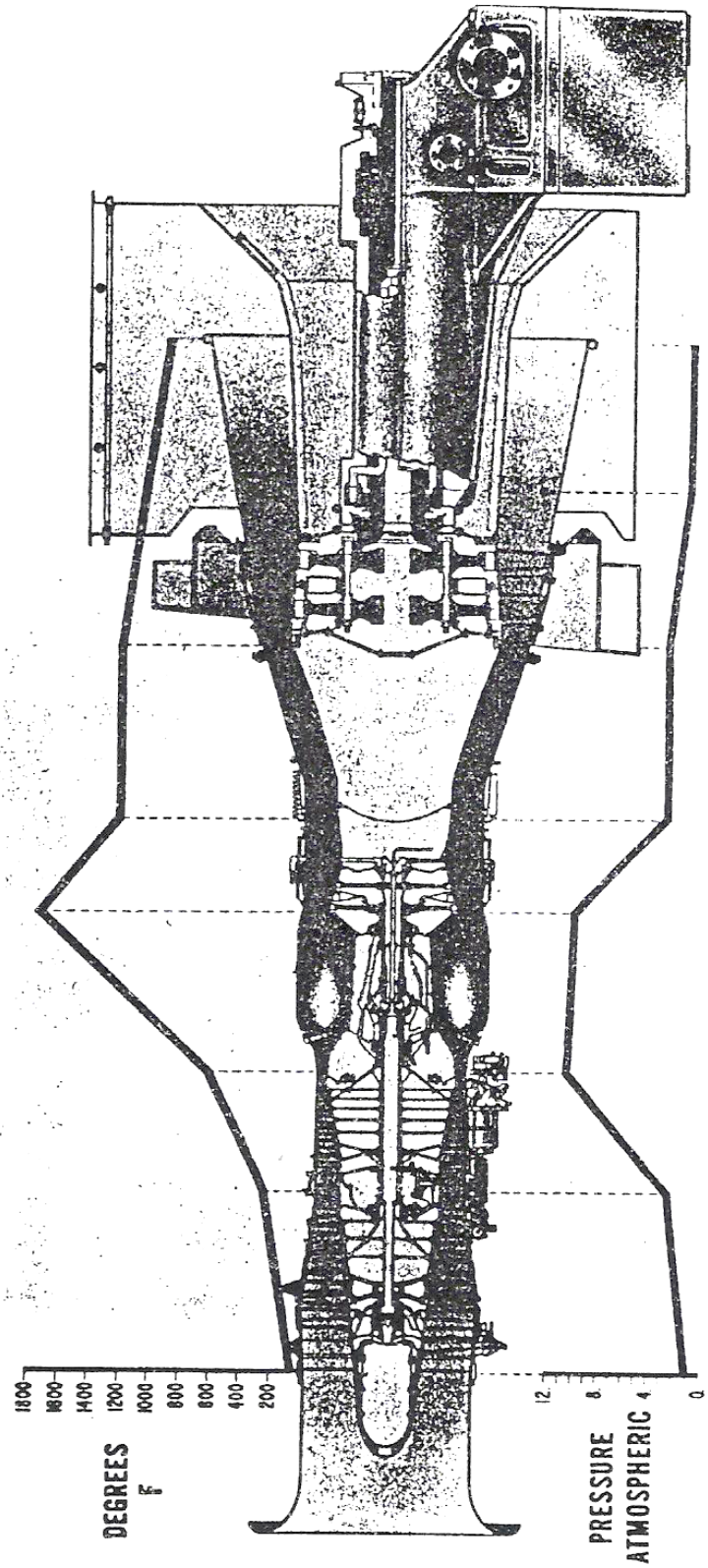
منحنى عزم الدوران والضغط و درجة الحرارة في التوربين
Torque, pressure & temperature distribution on gas turbine

إن أعلى عزم دوران يحدث بين المرحلة الأخيرة للضاغط و المرحلة الأولى First stage من التوربين .



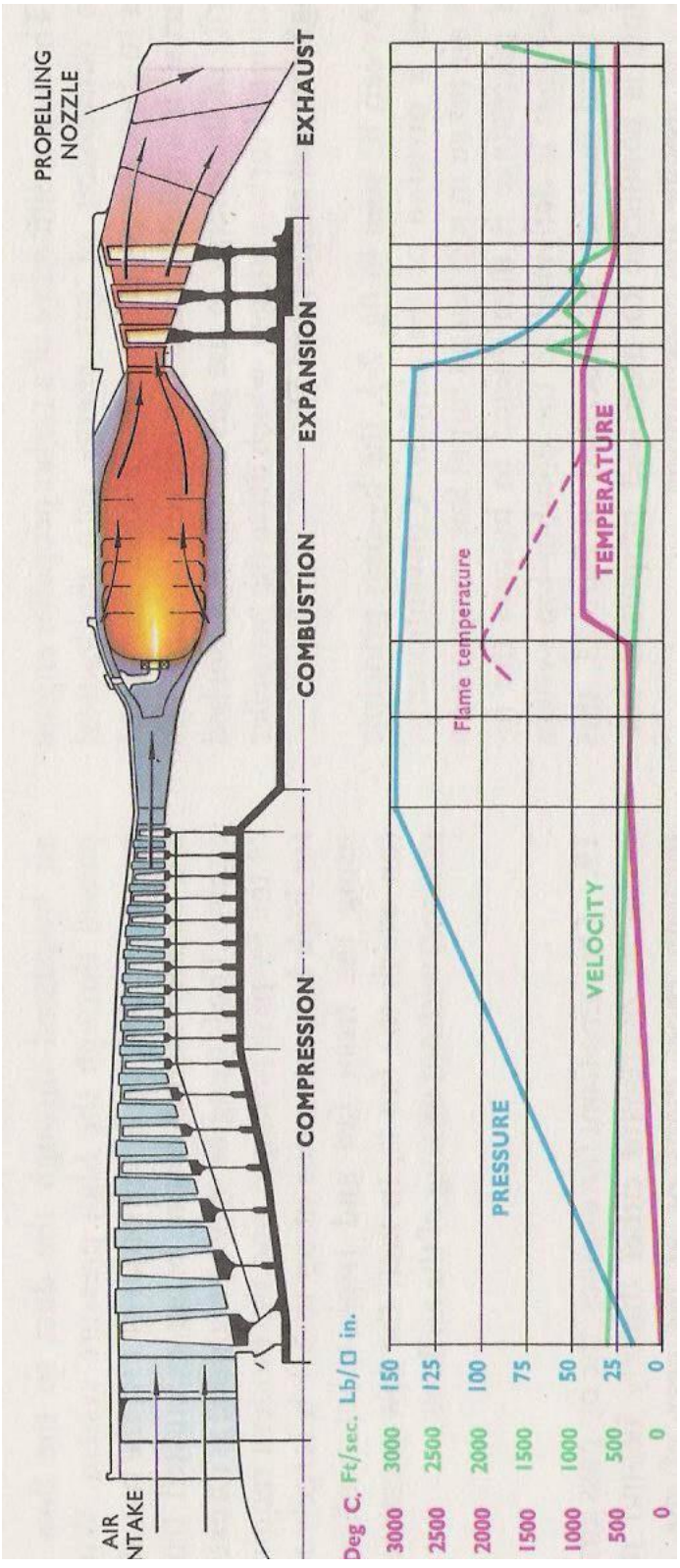
Position		Output [MW] Rated Output	Torque [kNm] Rated Output
1	Generator	169,0	537,9
2	Geno - Intermediate Shaft	169,0	537,9
3	Intermediate Shaft - Comp Bearing	169,0	537,9
4	Comp Bearing - Comp Stage 1	169,0	537,9
5	Comp Stage 1 - Comp Stage 2	179,6	571,6
6	CompStage 2 - Comp Stage 3	190,1	605,2
7	Comp Stage 3 - Comp Stage 4	200,7	638,8
8	Comp Stage 4 - Comp Stage 5	211,3	672,4
9	Comp Stage 5 - Comp Stage 6	221,8	706,1
10	Comp Stage 6 - Comp Stage 7	232,4	739,7
11	Comp Stage 7 - Comp Stage 8	242,9	773,3
12	Comp Stage 8 - Comp Stage 9	253,5	806,9
13	Comp Stage 9 - Comp Stage 10	264,1	840,5
14	Comp Stage 10 - Comp Stage 11	274,6	874,2
15	Comp Stage 11 - Comp Stage 12	285,2	907,8
16	Comp Stage 12 - Comp Stage 13	295,8	941,4
17	Comp Stage 13 - Comp Stage 14	306,3	975,0
18	Comp Stage 14 - Comp Stage 15	316,9	1008,6
19	Comp Stage 15 - Comp Stage 16	327,4	1042,3
20	Comp Stage 16 - Inner Casing	338,0	1075,9
21	Inner Casing - Turb Stage 1	338,0	1075,9
22	Turb Stage 1 - Turb Stage 2	253,5	806,9
23	Turb Stage 2 - Turb Stage 3	169,0	537,9
24	Turb Stage 3 - Turb Stage 4	84,5	269,0
25	Turb Stage 4 - Turb Bearing	0,0	0,0
26	Turb Bearing	0,0	0,0

الشكل (١٣٣) توزيع عزم الدوران والقدرة الناتجة في التوربين الغازي نوع سيمنز - V94.2
Torque distribution & output power in V94.2-SIEMENS gas turbine



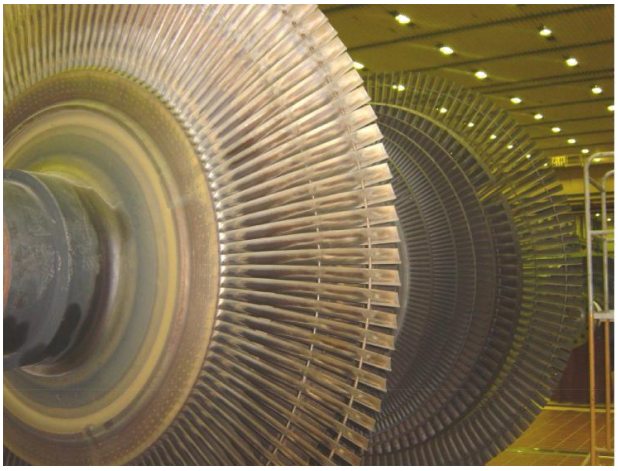
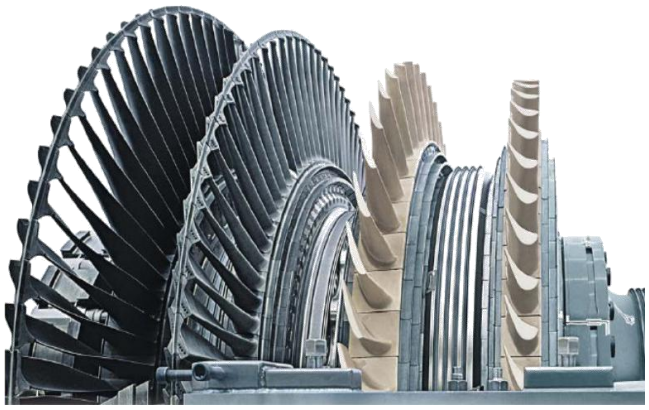
الشكل (١٣٤) توزيع درجة الحرارة والضغط في توربين غازي ثنائي المحور في محطة توليد كهرباء نوع (Rolls Royce & Curtiss wright)

Temperature & pressure distribution on twin spool gas turbine in power station ((Rolls Royce& Curtiss wright)



الشكل (١٣٥) محرك طائرة نوع نفاث توربيني محوري التدفق أحادي المحور
Single spool axial flow turbo jet aircraft engine

الشكل (١٣٦) المرحلة الأخيرة لتوربين غازي نوع سيمنز SIEMENS (الجانب الأيسر توربين بخاري والجانب الأيمن توربين غازي)

الشكل (١٣٧) المرحلة الأخيرة لكل من توربين بخاري نوع توشيبا Toshiba في الجانب الأيسر ، وتوربين غازي نوع جي إي GE في الجانب الأيمن

يحتوي التوربين البخاري على مراحل أكثر من التوربين الغازي لأن ضغط مدخل Inlet pressure التوربين البخاري أعلى بكثير من ضغط مدخل التوربين الغازي ، وبالتالي هناك حاجة إلى المزيد من المراحل في التوربين البخاري لغرض التمدد الإضافي (الزائد) للتدفق Added flow expansion .

إن عملية التدوير البطيء لمحور التوربين مهمة جدا بعد أن يتم إيقاف التوربين لمنع التوزيع غير المتكافىء لدرجة الحرارة Uneven temperature distribution للعمود الدوار والتي قد تسبب تقوس العمود الدوار Shaft hogging ، ويكون محرك مسنن أو جهاز التدوير البطيء Motor-driven turning gear مرتبط (معشق) مع التوربين لغرض تدوير المحور والسماح لتبريد متجانس و منتظم Uniform cooling . إذا أستمر تقوس العمود الدوار لفترة زمنية طويلة ، فإن ذلك قد يؤدي إلى فشل كارثي Catastrophic failure للعمود الدوار وعندئذ لا يمكن إسترداده Recovered وبالتالي يجب إستبداله Replaced .

ملاحظة توضيحة حول الشكل (١٢٩) :

Exciter المحثة : يتكون المولد الكهربائي أو المحرك الكهربائي Electric generator or electric motor من محور Rotor يدور في مجال مغناطيسي Magnetic field . قد يتم إنتاج المجال المغناطيسي بواسطة مغناطيس دائم أو ملفات المجال Field coils . في حالة وجود آلة أو ماكينة بملفات ، يجب أن يتدفق التيار Current في الملفات لتوليد المجال ، وإلا لن يتم نقل أي قدرة إلى أو من المحور الدوار . يطلق على عملية توليد مجال مغناطيسي عن طريق تيار كهربائي أسم إثارة أو حث Excitation . يتم إستخدام الإثارة المرنة Flexible excitation للآلة الكهربائية الدوارة إما عن طريق تقنيات الإثارة بدون فرش Brushless exciation techniques أو عن طريق حقن التيار بواسطة فرش الكربون (فحمات) Carbon brushes (الإثارة الاستاتيكية Static excitation) .

التوربين الغازي – وحدة بدء التشغيل Gas turbine – Start up unit

معظم محركات الإحتراق الداخلي Internal combustion engines بحاجة إلى منظومات بدء التشغيل ، في المحرك الترددي Reciprocating engine هناك بادىء حركة أو تشغيل Starter يكون مُعشق مع دولاب الموازنة (دولاب تنظيم السرعة) Fly wheel المتصل بعمود المرفق (الكرنك) Crank shaft ، كما أن التوربين الغازي يحتاج إلى وحدة بدء التشغيل ، ولكن النقطة هنا هي أن التوربين الغازي يحتاج إلى وقت أطول قبل الوصول إلى سرعته التشغيلية المستقرة Stable operating speed .

يجب الحذر عند تصميم منظومة بدء التشغيل ، على سبيل المثال ، يبدأ التوربين الغازي الأرضي (المستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية) Land base gas turbine نوع سيمنز (SIEMENS V94.2) بالإشعال Ignition عند سرعة (٦٠٠ دورة في الدقيقة rpm) ، وسيتوقف جهاز بدء التشغيل Start up device عند سرعة (٢٢٠٠ دورة في الدقيقة) ، وسيقوم التوربين الغازي بواسطة قدرته بالتسارع (التعجيل) إلى السرعة الأسمية Nominal speed (٣٠٠٠ دورة في الدقيقة) ، هذه العملية تستغرق على الأقل ٤ دقائق إذا لم تكن هناك مشاكل تشغيلية أثناء تسارع العمود الدوار Shaft acceleration .

إن طريقة بدء تشغيل التوربين الغازي ، و إختيار نظام بدء التشغيل يعتمد على حالة المحرك ، على سبيل المثال تتطلب طائرة حربية عسكرية Military air craft أن يتم تشغيل المحرك في أقل وقت ممكن وحيث يكون ذلك ممكنا لتكون مستقلة تماما عن المعدات الخارجية . لكن الطائرات التجارية Commercial aircraft تتطلب تشغيل المحرك بأقل قدر من الإضطراب Disturbance للركاب وبأكثر الوسائل الاقتصادية Economical means .

إن أغلب الطرق الشائعة المستخدمة لبدء تشغيل محرك الطائرة هي :

١- بادىء تشغيل كهربائي (محرك تيار مستمر) Electric started (DC-motor)

تستخدم في بعض المحركات المروحية التوربينية والتوربينية النفاثة Turbo-prop & Turbojet engine ، ويتم تزويد الطاقة الكهربائية Electric power لمحرك التيار المستمر من لوحة الدائرة الرئيسية في الطائرة Aircraft onboard .

٢- المُفجر Cartridge starter

يستخدم في بعض الأحيان في المحركات العسكرية ويوفر طريقة مستقلة سريعة لبدء التشغيل ، ويتكون من توربين دفعي Impulse turbine الذي يتم تشغيله من الغازات الساخنة Hot gases المتولدة من مفجر كهربائي (كبسولة تفجير أو صاعق كهربائي) Electrically fired detonator يسمى كورداىت Cordite وهي مادة متفجرة لا دخان لها .

٣- بادىء التشغيل الهوائي المضغوط Compressed air starter

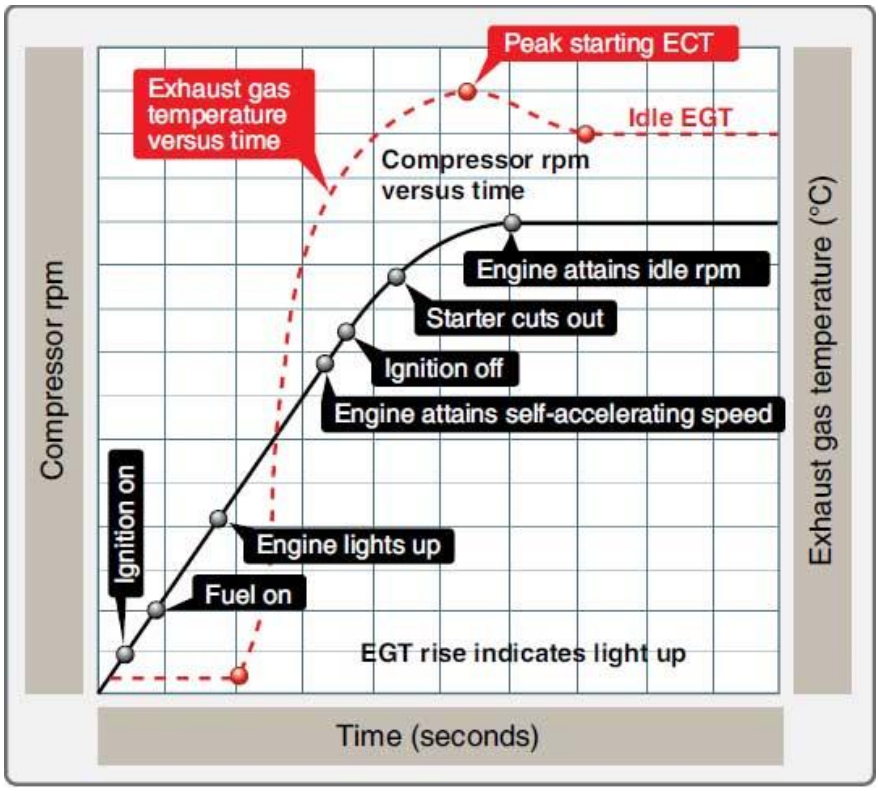
يستخدم في معظم المحركات التجارية الحديثة وبعض المحركات النفاثة للطائرات العسكرية Military jet engines . لديه العديد من المزايا عن أنظمة بدء التشغيل الأخرى كما ان وزنه خفيف وبسيط وإقتصادي للعمل . ويتم توفير الهواء من إمدادات أرضية خارجية لغرض تدوير التوربين الهوائي Air turbine .

٤- توربين غازي صغير كبادىء تشغيل Small Gas Turbine as starter

في هذه الطريقة يتم إستخدام توربين غازي صغير كبادىء تشغيل للمحرك الرئيسي Main engine . لديه نظام الوقود والإشعال الخاص به ، (يكون نظام بدء التشغيل ، عادة عبارة عن محرك كهربائي Electric motor أو مضخة هيدروليكية Hydraulic pump مع توربين هيدروليكي Hydraulic turbine) .

٥- بادىء تشغيل هيدروليكي Hydraulic starter

يتلقى التوربين الهيدروليكي زيت الضغط العالي High pressure oil من مضخة كهربائية لغرض تدوير المحرك الرئيسي .



الشكل (١٣٨) تسلسل عملية بدء التشغيل لمحرك توربين غازي نموذجي
start up sequence of typical gas turbine engine

الشكل (١٣٩) تسلسل عملية بدء التشغيل لمحرك توربيني نفاث نموذجي
start up sequence of typical turbojet engine

أنواع أجهزة بدء الإدارة للتوربينات الغازية المستخدمة لإنتاج الطاقة الكهربائية
The most common starters which are used land base gas turbines

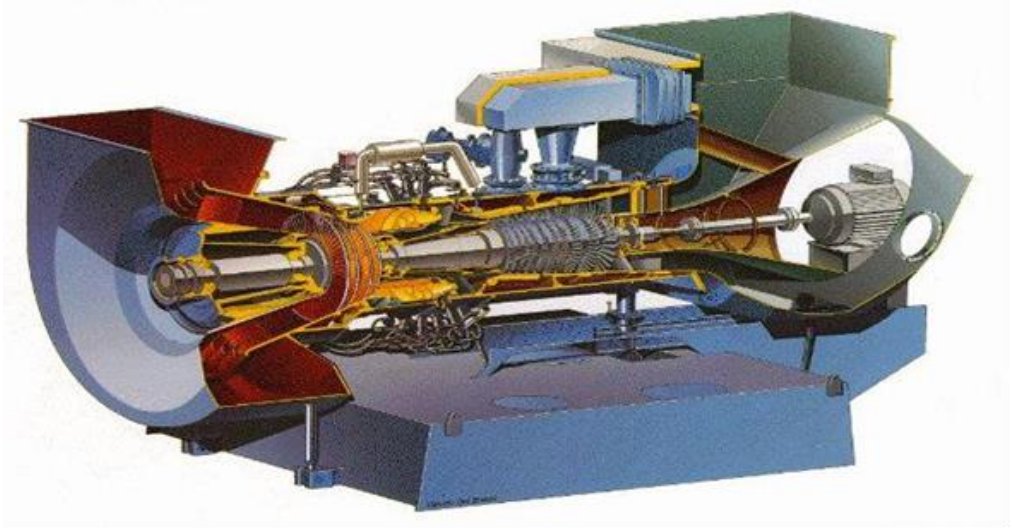
١- محرك ترددي Reciprocating engine :
العديد من التوربينات الغازية القديمة تستخدم محرك ترددي لتوفير عزم دوران أولي Starting torque لتسريع التوربين الغازي حتى الوصول إلى سرعة فك الارتباط (حل التعشيق) Disengage speed ، ويجب تركيب ترس أو مسنن خافض للسرعة Reduction gear بين العمود الخارج من المحرك الترددي وعمود التوربين الغازي الذي يسمى عادة (الترس الإضافي أو المساعد Accessory gear) .

٢- بادىء التشغيل الهوائي المضغوط Compressed air starter :
في هذه الطريقة ، يتم إستخدام الهواء المضغوط لتدوير توربين هوائي ويتم إستخدام عزم الدوران الناتج لتشغيل المحرك الرئيسي . يتم تزويد الهواء المضغوط إلى التوربين الهوائي بواسطة ضاغط مساعد عند (من ٣٤ بار bar إلى ٦٨ بار) .

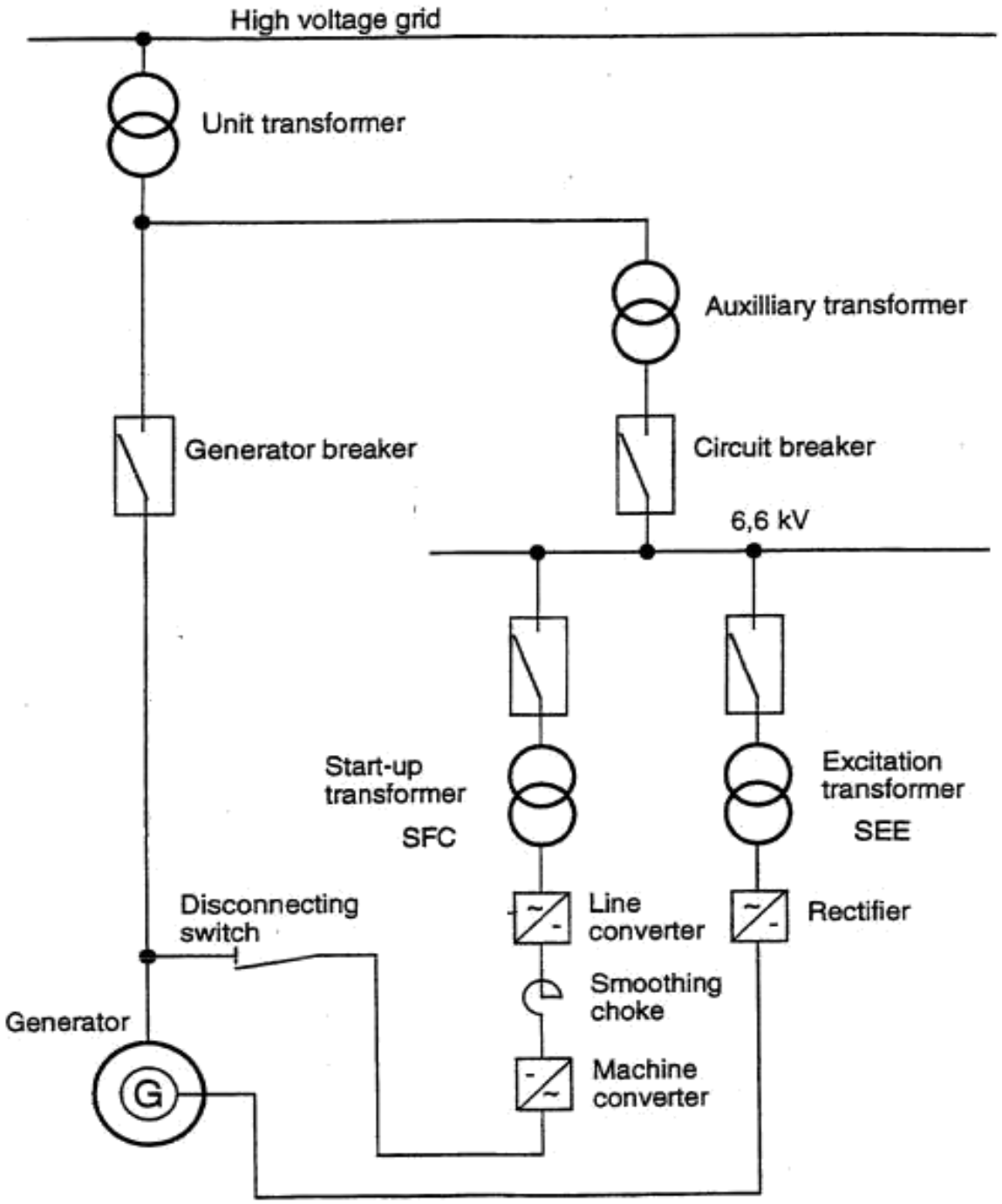
٣- بادىء تشغيل هيدروليكي Hydraulic starter :
في هذه الطريقة يتم حقن زيت الضغط العالي لتشغيل توربين بدء التشغيل Start up turbine لتدوير المحرك الرئيسي .

٤- بادىء تشغيل كهربائي :
في هذه الطريقة يتم إستخدام محرك كهربائي Electric motor لتزويد عزم بدء التشغيل (الدوران) Start up torque المطلوب للمحرك الرئيسي .

٥ – بادىء محول التردد Start-up Frequency Converter (S.F.C.)
في هذه الطريقة يتم إستخدام مولد التوربين الغازي كمحرك بدء تشغيل ، لاحظ أن المولد المتزامن Synchronous generator له نفس مبدأ التشغيل للمحرك المتزامن Synchronous motor ، بعد وصول التوربين الغازي إلى سرعة التشغيل المستقرة ، سيتوقف ال (S.F.C.) وسوف يتسارع التوربين الغازي حتى الوصول إلى السرعة الاسمية .



الشكل (١٤٠) توربين غازي نوع (ABB) يستخدم محرك كهربائي كبادىء تشغيل



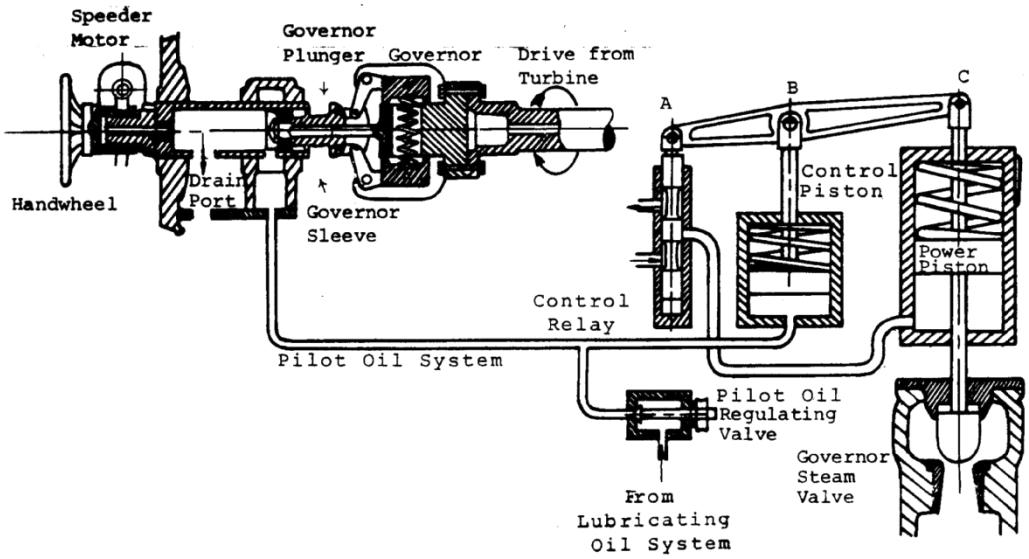
الشكل (١٤١) بادىء محول التردد Start up Frequency Converter

أنظمة التحكم والحماية والتشغيل في التوربين الغازي
Gas turbine operation, control & protections

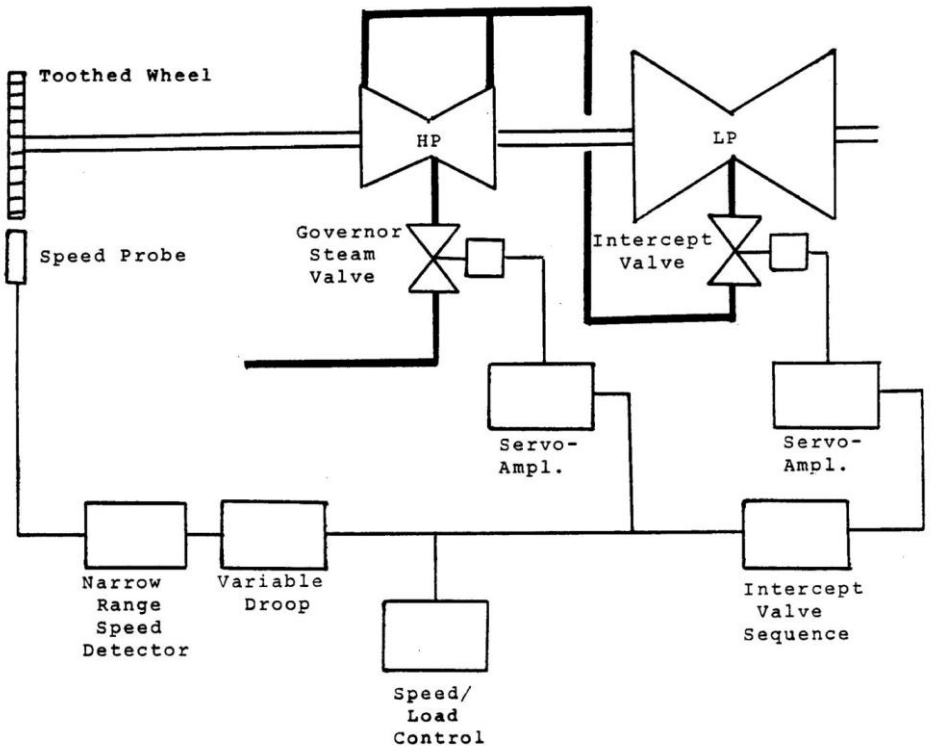
الوظيفة الرئيسية لنظام التحكم Control system هي :
١- الحد من رفع السرعة Speed raise إلى حد مقبول أثناء رفض الحمل Load rejection .
٢- التحكم في القدرة الناتجة Output power .
٣- التحكم في السرعة أثناء بدء التشغيل Start up والمزامنة Synchronizing والتحميل Loading .
٤- مطابقة القدرة المتولدة مع القدرة التي يتطلبها الحمل .

ملاحظة : رفض الحمل Load rejection هو الحالة التي يحدث فيها فقدان مفاجيء للحمل في النظام والذي يؤدي إلى التردد المفرط Over-frequency لمعدات التوليد . ويعتبراختبار رفض الحمل Load Rejection Test (LRT) هو جزء من تكاليف إنشاء منظومات الطاقة Power systems للتأكد من قدرة المنظومة على تحمل الخسارة المفاجئة للحمل والعودة إلى ظروف التشغيل العادية بإستخدام نظام تحكمها . ببساطة هو إختبار أداء المحرك Engine performance في حالة اللاحمل No load بعد التشغيل مع الحمل الكامل Full load ويتم إجرائه للتحقق من أداء المحرك والمولدة في حالة إشتغال قاطع دورة المولد Circuit breaker فجأة بسبب خطأ في الشبكة .

الأنواع الرئيسية لأجهزة التحكم بالسرعة \ الحمل Speed/Load controller المستخدمة في التوربينات البخارية هي :
١- منظم هيدروليكي ميكانيكي Mechanical Hydraulic governor (راجع الملحق A) .
٢- منظم هيدروليكي كهربائي Electrical Hydraulic governor (راجع الملحق A) .



الشكل (١٤٢) منظم هيدروليكي ميكانيكي



الشكل (١٤٣) منظم هيدروليكي كهربائي

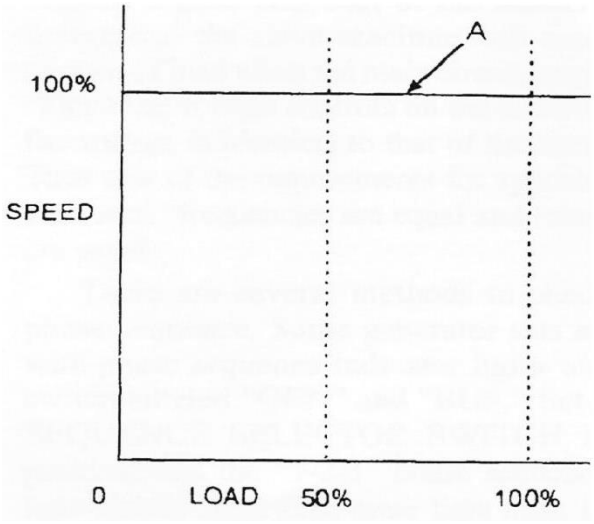
نلاحظ أن التوربين الغازي يحتاج إلى التحكم في تدفق الوقود Fuel flow ووضعية ريش توجيه مدخل الضاغط Compressor inlet guide vanes من أجل زيادة أو تقليل حمله ، بينما تحتاج التوربينات البخارية إلى التحكم في وضعية صمامات التحكم بالبخار Steam control valves فقط .

الأنواع الرئيسية لأجهزة التحكم بالسرعة \ الحمل Main types of speed/load controllers

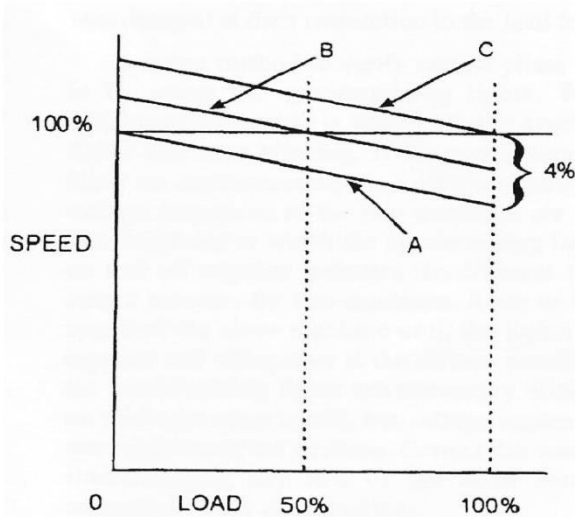
هناك نوعان من منظمات (حواكم) سرعة المحرك الرئيسي Prime mover speed governor :
١- منظم التزامن أو تساوي الزمن Isochronous Governor (منظم السرعة الثابتة Constant speed governor) .
٢- منظم (حاكم) إنخفاض التردد أو السرعة Droop Governor .

أولا علينا تحديد إنخفاض أو تباطؤ السرعة Speed droop بينما تتجه المولدة من حالة اللاحمل No Load إلى حالة التحميل الكامل Full Load :

Speed droop = Total drop in speed (No Load to Full Load) / Rated Speed] x 100%
Speed droop = [(No Load Speed - Full Load Speed) / Rated Speed] x 100%



الشكل (١٤٤) منحنى منظم التزامن



الشكل (١٤٥) منحنى منظم خفض التردد أو السرعة

١- منظم التزامن (منظم السرعة الثابتة) :

يمكن توضيح عملية منظم السرعة الثابتة (إنخفاض السرعة Speed droop = ٠٪) عن طريق مقارنة السرعة مقابل الحمل . كما هو موضح في الشكل (١٤٤) . إذا تم ضبط المنظم للحفاظ على السرعة المتمثلة بالخط A و المرتبطة بحمل منعزل متزايد Increasing isolated load ، ستبقى السرعة ثابتة . سيحافظ منظم السرعة الثابتة على التردد الناتج Output frequency المطلوب ، بغض النظر عن تغييرات الحمل إذا لم يتم تجاوز سعة المحرك Engine capacity .
إن تماثل أو موازاة التوربين مع منظم السرعة الثابتة على ناقل أو موصل ثابت الفولتية والتردد (موصل تبقى فولتيته وتردده ثابتا حتى بعد التغير في الحمل) Infinite bus سيكون غير عملي لأن أي إختلاف في تحديد أو ضبط السرعة قد يتسبب في تغيير حمل المولدة بإستمرار . إن ضبط السرعة أعلى قليلا من تردد الناقل Bus frequency قد يتسبب في إنتقال المحرك إلى وضع التحميل الكامل . وبالمثل ، إذا كان إعداد السرعة أقل بقليل من السرعة المتزامنة Synchronous speed ، فسينتقل المحرك إلى وضع اللا تحميل .
إذا كان هناك أكثر من مولدة واحدة متصلة على نفس الشبكة Network ، فلا يمكن أن يكون لها تباطؤات ذات منحدرات صفرية Droops with zero slopes . لأن النظام سيكون غير مستقر Unstable . إن إضطراب صغير جدا بالتردد سيتسبب في أن تقوم إحدى الماكينات بالإستيلاء على كل الحمل . وستؤدي النتيجة إلى تأرجح أو تذبذب وعدم إستقرار المنظمات Governors وتقلبات التحميل السريعة بين المولدات .
لاحظ أن المحركات الرئيسية التي تشتمل على منظم السرعة الثابتة غير مرغوب فيها نظرا لأنها لن تقوم تلقائيا بزيادة أحمالها عند تردد المنظومة والعكس بالعكس .
مع منظم السرعة الثابتة ، من أجل توفير الحمل إستجابة أو ردا لهبوط التردد ، يجب على المشغل زيادة نقطة ضبط الحمل يدويا إلى الحمل المطلوب .

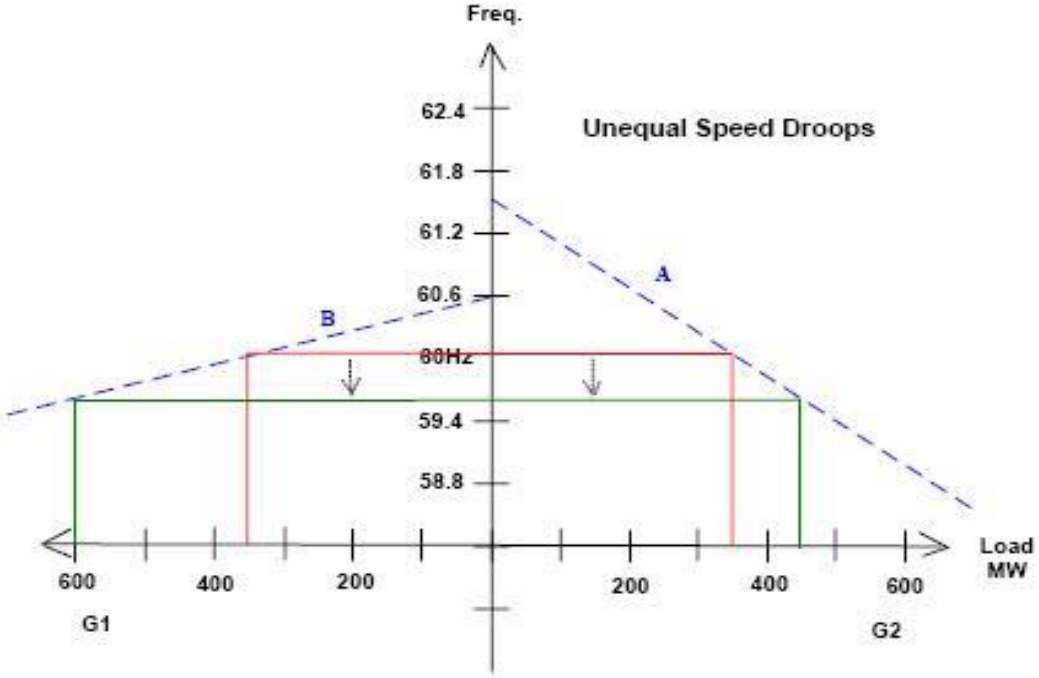
٢- منظم إنخفاض التردد أو السرعة :

لمنظم إنخفاض السرعة مجموعة مماثلة من المنحنيات ، ولكنها مائلة كما هو موضح في الشكل (١٤٥) . إذا كان منظم إنخفاض السرعة مرتبطا بحمل منعزل متزايد ، فإن السرعة ستنخفض (حتى يتم الوصول إلى الحد الأقصى لسعة المحرك) .
دعونا نتخيل الآن أننا نربط منظم إنخفاض السرعة (آلة تابعة Slave machine) بناقل خدمي Utility bus كبير لدرجة أن محركنا لا يستطيع تغيير تردد الناقل Bus frequency (ناقل لا نهائي) ، تذكر أن سرعة المحرك لم تعد تحددها ضبط السرعة Speed setting ولكن من خلال تردد الناقل اللانهائي . في هذه الحالة ، إذا قمنا بتغيير إعداد أو ضبط السرعة ، فقد نتسبب في حدوث تغيير بالحمل ، وليس بالسرعة . لموازاة مجموعة المولدات ، يتعين علينا ضبط السرعة على الخط A (الشكل أعلاه) حيث تكون سرعة عدم التحميل مساوية لتردد الناقل .
بمجرد أن تكون المجموعة متوازية ، إذا قمنا بزيادة إعداد السرعة إلى الخط B . فإننا لا نغير السرعة ، ولكننا نلتقط ما يقرب من نصف الحمل . زيادة أخرى في إعداد السرعة إلى الخط C سوف يتم تحميل المحرك الرئيسي بالكامل . إذا تم تحميل مجموعة المولدات بالكامل وتم فتح قاطع الدورة الرئيسي Main Circuit breaker ، فستكون سرعة عدم التحميل No-load speed أعلى من السرعة التزامنية Synchronous speed بنسبة (٤٪) . عندئذ سوف يتم تعريف هذا المنظم بأنه يحتوي على (٤٪) إنخفاض في السرعة Speed droop .
لاحظ أن المدى الطبيعي لإعدادات منظم الخفض للتوربين Turbine governor droop settings هو ما بين (٢ ٪ إلى ٥ ٪) ، إذا تم إعداد المنظم دون المدى الطبيعي فسيكون حساس جدا وغير مستقر Sensitive & unstable لتغييرات الحمل و في حالة العكس سيكون أقل حساسية لتغييرات الحمل .
المنظم الجيد هو الذي يكون بإعدادات خفض أدنى (٤ ٪ منظم خفض هو أكثر معقولية من ٦ ٪ منظم خفض) .
لاحظ أن ضبط الإنحفاض Droop setting مرتبط بالمحرك الرئيسي (التوربين) وليس مجموعة المولدات .

ملاحظات توضيحية :

١- **Prime mover** هو المحرك الرئيسي (التوربين الغازي) .
٢- **التردد أو الذبذبة Frequency** ويشار إليه أيضا بالتردد الزمني هو مقياس لتكرار حدث دوري ، مثل تردد موجة Wave . غالبا ما يكون الحديث عن تردد موجة صوتية أو تردد موجة ضوئية أو موجة كهرومغناطيسية Electromagnetic wave. ونقيس وحدة التردد منذ عام ١٩٦٠ بوحدة هرتز (Hz) وهي تعادل (١\ثانية) (1/sec.) .
وتستخدم بشكل أساسي لقياس عدد تكرار ذبذبة موجة . يكون تردد موجة دورية Cyclical wave (1 Hz) إذا كانت تمر دورة كاملة في نقطة ما خلال ثانية واحدة ، (الدورة الكاملة لموجة) ، ولنتخيل هنا موجة في الماء ، تتوالى الموجة في الماء من صعود إلى هبوط ثم صعود ، تلك هي الدورة الكاملة . المسافة بين قمتين متتاليتين في الموجة أو المسافة بين قاعين متتالين في موجه يسمى الطول الموجي Wavelength . التردد هو مؤشر مهم يُستخدم في العلوم والهندسة لتحديد معدل الظواهر التذبذبية والاهتزازية ، مثل الإهتزازات الميكانيكية Mechanical vibrations ، والإشارات الصوتية (الصوت) Audio signals (sound) ، والموجات اللاسلكية Radio waves ، والضوء Light .

يجب أن تحتوي التوربينات المتصلة بالشبكة نفسها على نفس إعدادات خفض أو تباطؤ سرعة لمنظماتها لتوفير حصة متساوية من الحمل لكل وحدة فيما يتعلق بحجمها أثناء إضطراب المنظومة System disturbance .



الشكل (١٤٦) مولدتان لهما إعدادات خفض مختلفة

في الشكل أعلاه ، فإن للمولدة الأولى (G1) إعداد خفض أقل من المولدة الثانية (G2) ، وسوف تتفاعل مع تغييرات الحمل أكثر من G2 ، لكونها الأدنى إنخفاضا . سعة Capacity كلا المولدتين (٦٠٠ ميكاواط MW) ويتم تحميل كل منهما بـ (٣٥٠ ميكاواط) . تردد الشبكة (٦٠ هرتز Hz) .
عند حدوث بعض الإضطرابات في الشبكة نتيجة لخروج الوحدة المفاجيء من العمل (الخدمة) Unit trip و بالتالي إنخفاض تردد المنظومة إلى (٥٩,٥ هرتز) و الحاجة إلى زيادة حمل المنظومة بمقدار (٣٥٠ ميكاواط) لإستعادة تردد التشغيل الطبيعي Normal operating frequency .
في هذه الحالة ، سيتم تقاسم كمية الزيادة في الحمل لإجل إستقرار المنظومة System stability بين كل من المولدتين ، سوف تتعامل G1 مع حمل إضافي (زائد) مقداره (٢٥٠ ميكاواط) (لأنها بإعداد خفض Droop setting أقل تجعلها تتحسس انخفاض التردد أسرع من G2) و سوف تتعامل G2 مع (١٠٠ ميكاواط) إضافية .
لاحظ أنه في التطبيق الفعلي للعديد من المولدات التي تغذي منظومة كبيرة ، سوف يتطلب الأمر إضطرابا كبيرا في الحمل لكي ينخفض تردد المنظومة إلى حد كبير (٥٩,٥ هرتز) ولكننا هنا نأخذ المثال السابق فقط لوصف وشرح تأثير إعدادات الخفض المختلفة . ومع ذلك ، يجب أن تحتوي جميع المولدات الكبيرة المتصلة بالشبكة على نفس إعدادات الخفض . حيث سيتم تقاسم الحمل بالتساوي وفقا لقدراتها Capabilities وبالتالي تثبيت وإستقرار الحمل Load stabilizing أثناء اضطرابات المنظومة .

الآن تخيل أن سعة G1 (٤٠٠ ميكاواط) فقط وأنها كانت تعمل مع (٣٥٠ ميكاواط) ، و إن سعة G2 (٨٠٠ ميكاواط) وأنها كانت تعمل مع (٣٥٠ ميكاواط) . فإنه مع نفس إعدادات الخفض و بنفس الزيادة بالحمل لإستعادة تردد المنظومة ، سوف تنتقل G1 إلى التحميل الكامل وستزيد حملها من (٣٥٠ إلى ٤٠٠ ميكاواط) أي تشغيل بالحمل الكامل Full load operation بينما G2 والتي سعتها أكبر بكثير ستزيد حملها من (٣٥٠ إلى ٤٥٠ ميكاواط) أي بنسبة (٥٦٪) فقط من حملها الكامل .
سوف تسترد المولدتين (٥٠ + ١٠٠ = ١٥٠ ميكاواط) فقط من الزيادة المطلوبة بالحمل ويجب مشاركة ال (٢٠٠ ميكاواط) الباقية من قبل مولدات أخرى على الشبكة ، يمكنك أن ترى أن مولدة كبيرة مثل G2 تعمل بنسبة (٥٦٪) فقط من حمولتها الكاملة بينما تعمل G1 الصغيرة بكامل حمولتها إستجابة للطلب على الحمل Load demand لإستعادة تردد المنظومة . ويرجع ذلك إلى أن المولدة الصغيرة لديها إعداد خفض أقل من المولدة الكبيرة وبالتالي ، يجب على جميع المولدات أن يكون لها نفس إعداد الخفض حتى تتشارك وتتقاسم الحمل بالتساوي .
لاحظ أن منظمات السرعة الثابتة Constant speed governors سوف لن تزيد أبدا من الحمل لإستعادة تردد المنظومة . وإنما فقط سوف تبقي عليه عند نقطة ضبط أو تحديد الحمل المطلوب التي يتم تحديدها من قبل المشغل Operator .

أنواع المنظمات (الحواكم) المستخدمة في التوربين الغازي Types of governors used in gas turbine

تم تصميم وحدة تحكم التوربين الغازي على مبدأ الرئيسي \ التابع Master/Slave principal (نموذج من نماذج التواصل Communication ، بين برنامج (في جهاز) واحد تصدر عنه الأوامر يقال له الرئيسي Master ، وبرنامج آخر أو برامج يسمى كل منها تابعا Slave يتلقى أوامر الرئيسي ثم ينفذها ، يكون إتجاه التحكم دائما من الرئيسي إلى التابع) . لتوفير التكرار Redundancy في حالة وجود خطأ غير قابل للتصحيح (خلل لا يمكن إصلاحه Unrecoverable fault) في جهاز التحكم الرئيسي Master controller أثناء إشتغال التوربين الغازي . إن وحدة تحكم التوربين الغازي تكون مسؤولة عن التحكم في جميع وحدات التحكم التالية :

١ - دالة أو وظيفة التشغيل التصاعدي Run up Ramp Function

هدف وحدة التحكم هذه هو السيطرة على بدء تشغيل الغاز Startup of the gas وبدء تشغيل الوحدة . يتم تفعيلها عندما نضغط على زر بدء التشغيل للتوربين الغازي حتى يصبح التوربين الغازي ذاتي الحركة (يتم فصل جهاز بادىء التشغيل ويعتمد التوربين الغازي على قدرته الذاتية) .

٢- وحدة تحكم السرعة \ الحمل Speed /Load Controller

وحدة تحكم السرعة \ الحمل عبارة عن وحدتي تحكم متغيرة ، تتحكم في السرعة والقدرة الكهربائية Electric power في الظروف التالية :

١- سرعة اللاحمل إلى السرعة المقدرة No-load speed to rated speed
٢ - التزامن مع الشبكة الكهربائية Synchronizing with the electric grid
٣ - تحميل التوربين Loading of the turbine
٤ - رفض الحمل Load rejection
٥- إيقاف تشغيل التوربين الغازي Shutdown of the gas turbine

تكون وحدة تحكم السرعة (المتغير الأول) نشطة من بدء التشغيل حتى تتزامن المولدة . بعد ذلك ، تتحول وحدة التحكم في السرعة \ الحمل إلى المتغير الثاني (الحمل الكهربائي Electric load) ، ويكون نطاق تشغيل وحدة التحكم في الحمل من مرحلة التزامن إلى أن تصبح وضعية ريشة توجيه مدخل الضاغط Compressor Inlet Guide Vane (I.G.V) مفتوحة (١٠٠٪) .

٣- وحدة التحكم في درجة حرارة مخرج التوربين (OTC Controller)
Turbine Outlet Temperature Controller

هدف وحدة التحكم هذه هو الحفاظ على درجة حرارة مخرج التوربين إلى القيمة التصميمية Designed value ، إذا كانت درجة حرارة مخرج التوربين عالية ، فهذا يعني أن درجة حرارة مدخل التوربين Turbine inlet temperature تم تجاوزها ، ولتجنب ذلك ، تقوم وحدة التحكم (OTC Controller) بمراقبة درجة حرارة مخرج التوربين عن طريق درجة حرارة تسمى OTC (درجة الحرارة المحسوبة لمخرج التوربين Outlet turbine calculated temperature) ، وهي درجة حرارة نظرية Theoretical temperature (أي أنها ناتجة من معادلة Equation) .

تعتمد درجة الحرارة OTC على متوسط درجات حرارة مخرج التوربين ، وثابت مسنتبط للجو (الطقس) Weather Constant ودرجة حرارة مدخل الضاغط .

المعادلة المستخدمة من قبل وحدة التحكم OTC هي :

$$OTC=OT-(K_1+K_2*TC_1)*TC_1$$

حيث ، OT = متوسط درجة حرارة مخرج التوربين Turbine average outlet temperatures .

K_1 و K_2 هي ثوابت لحالة الطقس Constants for weather condition .

$K_1 = 0.37$

$K_2 = 0.007$

TC_1 = درجة حرارة مدخل الضاغط Compressor inlet temperature .

وبالتعويض ستكون المعادلة : **OTC = OT- (0.37 + 0.007 * TC1) * TC1**

إن وحدة التحكم OTC تحاول الحفاظ على القيمة التصميمية لدرجة الحرارة هذه .

مثال : لتوربين غازي نوع سيمنز (SIEMENS V94.3) هذه القيمة هي :

OTC = 534 م° بإستخدام وقود الغاز الطبيعي Natural Gas

OTC = 520 م° بإستخدام وقود زيت الغاز Gas Oil

إن نطاق عمل وحدة التحكم OTC عند وصول (I.G.V.) إلى وضعية الفتح بنسبة (١٠٠٪) ، فإذا كانت I.G.V. على سبيل المثال عند وضعية (٩٩ ٪) ، ستتتحول منظومة التحكم إلى وحدة تحكم في الحمل .

لاحظ أن جميع التوربينات الغازية تقوم بتركيب أنظمة مراقبة درجة الحرارة Temperature monitoring systems في عادم التوربين الغازي Exhaust of the gas turbine وليس على مدخلها ، وذلك لأن :

١ - درجة حرارة مدخل التوربين عالية جدا ، وبالتالي فإن العمر التشغيلي للمزدوج الحراري الذي يتحمل درجة الحرارة المرتفعة هذه ، يكون قصيرا إضافة إلى التكلفة الإضافية .

٢ - إذا تم كسر أحد أجهزة تحسس درجة الحرارة Temperature sensors المثبتة في مدخل التوربين ، فسوف تندفع وتتجه مع تيار تدفق الغازات إلى داخل ريش التوربين مما يؤدي إلى فشل كارثي للريش في حين أن تم تثبيت هذه المتحسسات في العادم ، فلا يوجد أي خطر .

٤- وحدة التحكم في تحديد الحمل Load Limit Controller

لحماية قسم التوربين من التحميل الزائد Over load ، سيتم تفعيل وحدة التحكم في تحديد الحمل عندما يكون حمل التوربين الغازي أكثر من قيمة معينة (على سبيل المثال : أقصى حمل مسموح به Maximum permissible load للتوربين الغازي نوع سيمنز SIEMENS V94.2 هو ١٧٣ ميكاواط MW) . هدفها هو إحباط أي زيادة في التوربين الغازي عن طريق زيادة نقطة تحديد أو ضبط الحمل Load set point من قبل المشغل . يتم ذلك لحماية قسم التوربين من الحمل الزائد .

٥- وحد التحكم في تحديد حمل المولدة Generator Load Limit Controller

لحماية المولدة من الحمل الزائد سيتم تفعيل وحدة التحكم في تحديد الحمل كلما تم تحميل المولدة لأكثر من قيمة معينة (مثال : الحد الأقصى المسموح به لمولدة التوربين الغازي نوع سيمنز SIEMENS V94.2 هو ٢٠٤ ميكاواط) .

٦- وحدة التحكم في تحديد نسبة إنضغاط الضاغط Compressor Pressure Ratio limit controller

الهدف من وحدة التحكم هذه هو التأكد من أن ضغط مخرج الضاغط Compressor outlet pressure لا يتجاوز القيمة التصميمية القصوى Maximum design value لتجنب زيادة ضغط الضاغط والتغيير الأيروديناميكي المفاجيء (إضطراب التدفق وإرتداد الضغط) Compressor surge (لأن الضغط العالي مطلوب بنفس السرعة) .

٧- وحدة التحكم في درجة الحرارة I.G.V. Temperature Controller

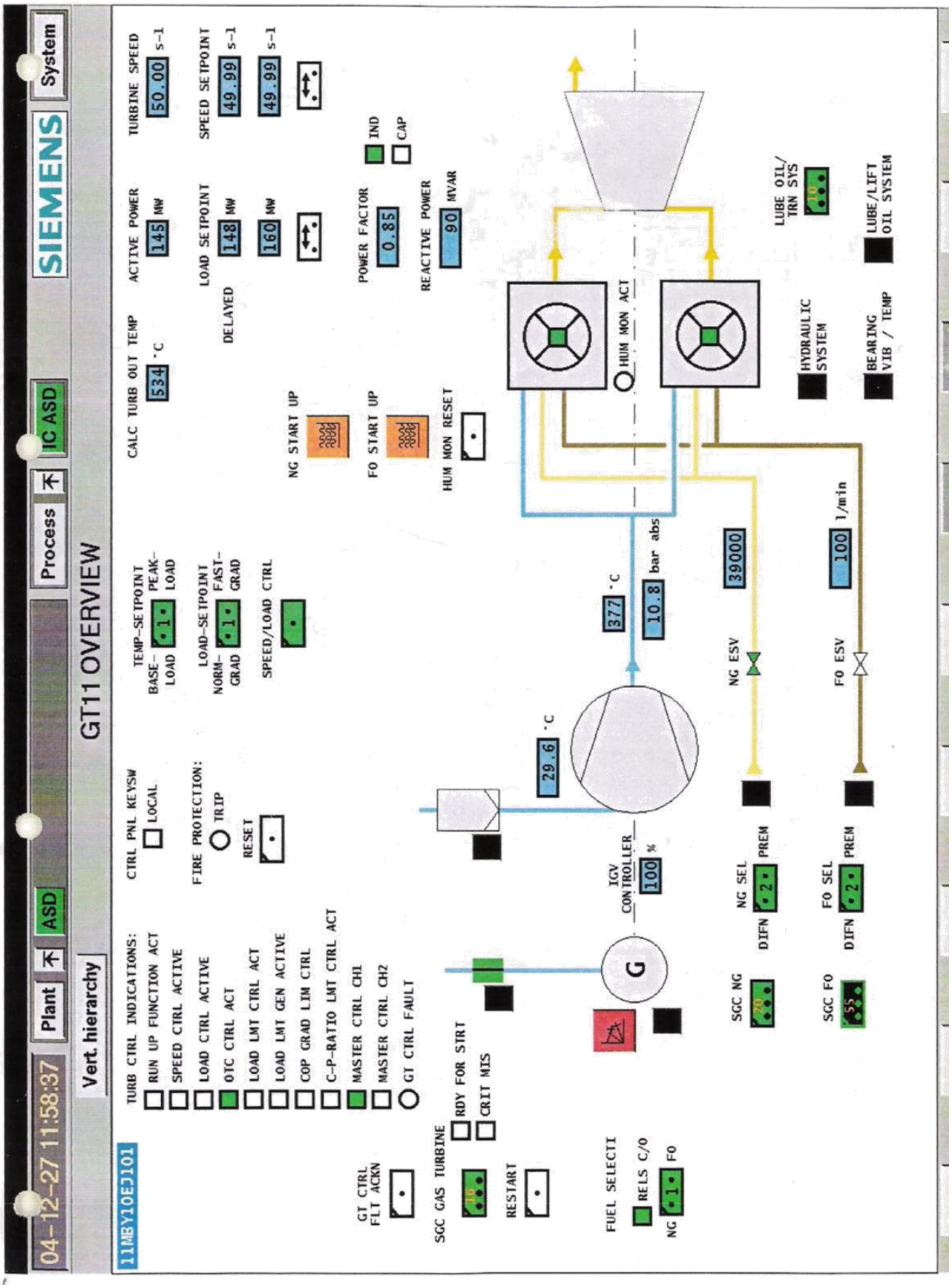
هدف وحدة التحكم هذه هو تقليل درجة حرارة العادم من خلال فتح ريشة توجيه مدخل الضاغط (I.G.V.) لزيادة تدفق الهواء .

٨ - وحدة التحكم في وضعية ريشة توجيه مدخل الضاغط Compressr I.G.V. Position Controller

هدفها السيطرة على حالة أو وضعية I.G.V. .

٩- وحدة التحكم في صمام الرفع Valve Lift Controller

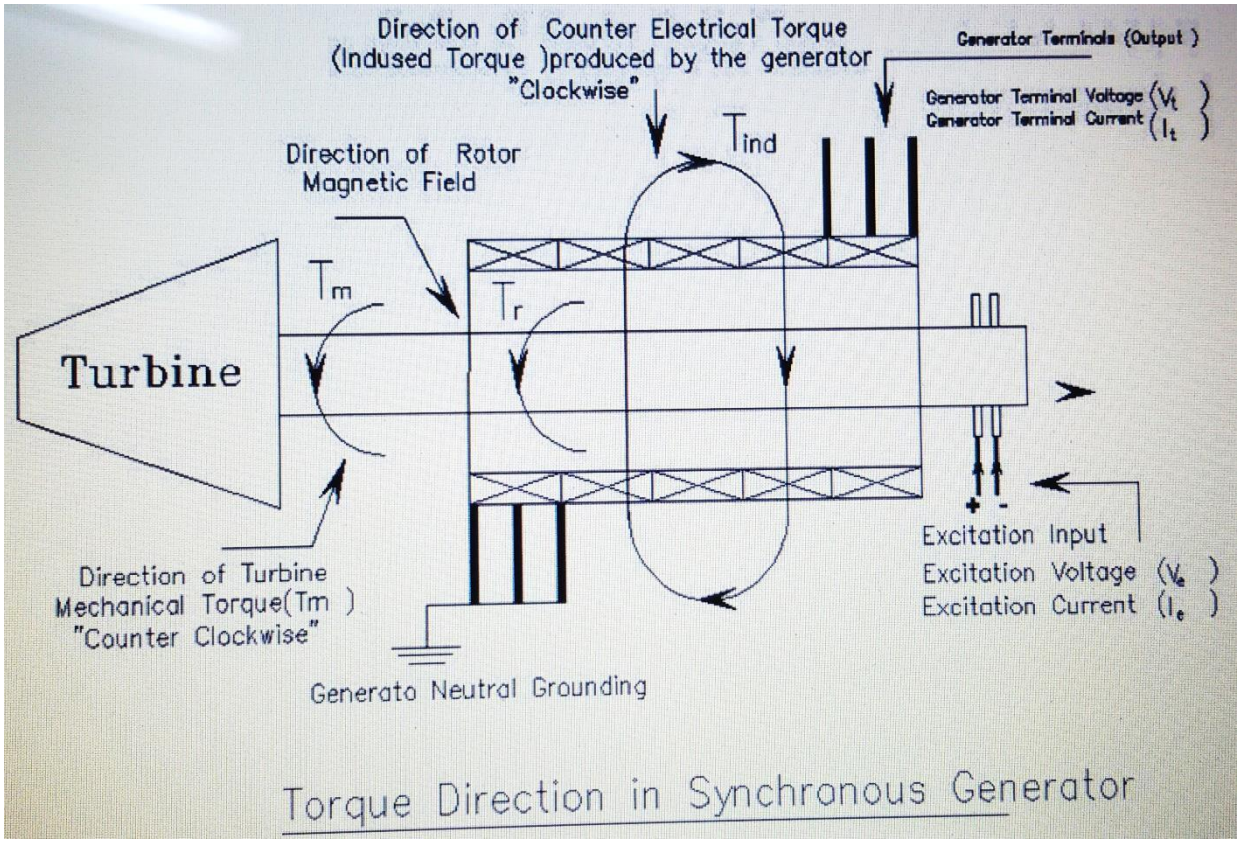
هدفها التحكم في صمام السيطرة Control valve لمنظومة الوقود المختار لأحمال التوربين الغازي المختلفة .



الشكل (١٤٧)شاشة التشغيل للتوربينات الغازية الحديثة Operating screen for modern gas turbines

عملية زيادة الحمل في التوربين الغازي Gas turbine load increase process

١- يتم زيادة نقطة تحديد الحمل Load set point يدويا من قبل المشغل .
٢- ترسل وحدة التحكم في الحمل Load controller إشارة إلى صمام السيطرة على الوقود المحدد لزيادة وضعية فتحها Fuel control valve .
٣- نظرا لتزايد تدفق الوقود ، سوف تزداد درجة حرارة مدخل التوربين وبالتالي سوف يتمدد الغاز المتدفق أكثر وتضاف قدرة ميكانيكية Mechanical power إضافية للتوربين .
٤- عندما تبدأ درجة حرارة مدخل التوربين بالزيادة ، ستزداد درجة حرارة العادم و سوف تقوم وحدة التحكم بفتح ريشة توجيه مدخل الضاغط لزيادة تدفق الهواء الخاص به ليتناسب مع متطلبات زيادة الحمل و تقليل درجة حرارة عادم التوربين .
٥- بزيادة وضعية فتح (I.G.V.) ، سيزداد تدفق الهواء الخارج من الضاغط ، وبالتالي فإن قدرة ميكانيكية إضافية (تكون على شكل عزم دوران Torque إضافي) يجب إن تُزود من التوربين إلى الضاغط ، لذلك سيُفتح صمام السيطرة على الوقود أكثر مما يحتاجه الحمل الإضافي المطلوب وذلك لغرض مواكبة متطلبات الضاغط .
العملية أعلاه تصف زيادة الحمل في التوربين الغازي ، **ولكن ما الذي يحدث في المولدة ؟** :
١- بما أن عزم الدوران الميكانيكي Mechanical torque في التوربين سيزداد ، فإنه سيواجه فعل عزم الدوران الكهربائي Electric torque في الجزء الثابت للمولدة Generator stator الذي يكون عكس إتجاه عزم الدوران التوربيني .
٢- بما أن عزم الدوران العكسي للمولدة يتم تحريكه بواسطة عزم الدوران التوربيني ، ستزداد زاوية الحمل Load angle و يتم قطع خط المجال المغناطيسي Magnetic filed بواسطة المحور الدوار بزاوية أكبر من قبل و بالتالي سوف ينتج عن ذلك تدفق تيار كهربائي Electric current أعلى في الجزء الثابت (قانون الحث Induction low) لاحظ أن عزم الدوران الميكانيكي التوربيني يجب أن يكون أكبر من عزم الدوران الكهربائي لجزء المولدة الثابت وذلك لتنفيذ عملية زيادة الحمل والعكس صحيح .
٣- نظرا للتيار الكهربائي العالي في الجزء الثابت من المولدة ، فإن التيار الطرفي Terminal current للجزء الثابت للمولدة سيزداد .
٤- بما أن تيار طرفي عالي (I) يتم توليده في الجزء الثابت ، ستزداد الطاقة الكهربائية (P) Electric power (P = V * I) بينما تنخفض الفولتية الطرفية (V) Terminal voltage للمولد (بسبب رد فعل الملف المتحرك Armature reaction و تأثير المحثة الذاتية Self inductance لملفات المولدة) .
٥ - إذا تم وضع منظم الجهد (الفولتية) الأوتوماتيكي Automatic Voltage Regulator في الوضع التلقائي Auto mode ، فإنه سيزيد من التيار الحثي لمحور المولدة Generator rotor excitation current لإستعادة المجال المغناطيسي للمحور الدوار وزيادة الجهد الكهربائي للمولدة إلى قيمته الأصلية .
ملاحظات توضيحية : ١- Load angle زاوية التحميل تستخدم في المقام الأول للمولدة المتزامنة Synchronous generator وزاوية العزم Torque angle هي الشيء نفسه للمحرك المتزامن Synchronous motor . زاوية التحميل (أو زاوية العزم): بالنسبة للمولدة المتزامنة ، يدور المجال المغناطيسي بسرعة متزامنة ويتم إنشاء المجال المغناطيسي الدوار في الجزء الثابت للمولدة . هذين المجالين غير محاذاتان بالكامل Not fully aligned . يتخلف المجال الثابت عن المجال الدوار . يتم التعبير عن هذا التخلف أو التأخر بزاوية تسمى زاوية الحمل . الطاقة التي طورها المولدة تتناسب طرديا Directly proportional مع جيب Sine هذه الزاوية . تلعب هذه الزاوية دورا مهما في استقرار المولدة Generator stability . فإذا تجاوزت الزاوية ٩٠ درجة ، تصبح المولدة غير مستقرة . قد يحدث هذا عند حدوث تغيير مفاجئ في الأحمال الكبيرة أو عند حدوث عطل Fault لفترة أطول . عدم استقرار المولدة هو أحد أسباب التعتيم Blackout الهائل في حالة حدوث عطل كبير في خطوط النقل Transmission line . بالنسبة لحالة المحرك المتزامن ، تدعى الزاوية بزاوية عزم الدوران ويتأخر المجال الدوار عن المجال الثابت في هذه الحالة .
٢- Induction low قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي وينص بشكل عام على أنه من الممكن للمجال المغناطيسي أن يولد تيارا كهربائيا .



الشكل (١٤٨) كيفية توليد الطاقة الكهربائية How electric power generated

يمكن تحميل التوربينات الغازية إلى أكثر من الحمل الأساس Base load (التشغيل بالحمل الأساس يعني أن تكون ريش توجيه مدخل الضاغط مفتوحة بالكامل لتأمين تدفق كامل للضاغط) .
يسمى هذا الوضع التشغيلي بتشغيل حمل الذروة Peak load operation ، في هذا الوضع يتم زيادة درجة حرارة مدخل التوربين عن طريق زيادة تدفق الوقود ، والنتيجة هي ميكاواط إضافية تم توليدها لمنظومة الطاقة الكهربائية حتى لو كان I.G.V. مفتوح (١٠٠ ٪) .
يمكن تنفيذ هذا الوضع عن طريق زيادة ضبط درجة حرارة وحدة التحكم OTC إلى قيمة أعلى (مثال : يتم ضبط OTC للتوربين الغازي نوع سيمنز Siemens V94.2 لغرض التشغيل بحمل الذروة عند (٥٦٠ درجة مئوية C°) .

بعض العوامل التي من خلالها يتم تقدير عمر التوربين الغازي
some of the factors that may determine the service life of gas turbine

العوامل التي يجب مراعاتها لتقدير عمر التوربين الغازي هي :
١- عدد مرات بدء التشغيل والتوقف Number of starts and stops .
٢- تقلبات الحمل و درجة الحرارة (رفض الحمل) Load and temperature swings (load rejection)

٣- عدد ساعات التشغيل (التشغيل بحمل الأساس او التشغيل بحمل الذروة)
. Running hours (Base load operation or peak load operation)
٤- ما إذا كانت المكونات لها طبقات طلاء واقية Protective coatings .
٥- مقاومة زحف المادة Material creep strength (يمكن تعريف الزحف بأنه تشوه Deformation يعتمد على الوقت عند درجة حرارة مرتفعة وضغط دائم . الزحف يحدث في المواد في أي درجة حرارة ولكنه يظهر بصورة أكبر في درجات الحرارة المرتفعة) مقاومة الزحف تستخدم أساسا لقياس قدرة المادة على تحمل التحميل المستدام دون تشوه مستمر Continuous deformation كبير .
٦- تقييم حد التحمل لمقاومة الكلال Endurance limit for fatigue strength evaluation (مقاومة الكلال هي مقاومة الإنهيار المفاجئ sudden failure للمادة المعرضة لأحمال متكررة اثناء التشغيل بعد العديد من دورات التحميل .
٧- طريقة تبريد الريش Blade cooling .
٨- تأثير حقن البخار Effect of steam injection .
٩ – التعرية والتآكل الذي يتم ملاحظتهما خلال عمليات الفحص و التفتيش
Erosion wear noted during inspections (تحدث التعرية Erosion بسبب المائع Fluid الذي يصطدم بسطح المعدن ويحل ببطء جزيئات السطح ، مما يؤدي في النهاية إلى تدمير السطح . بينما يحدث التآكل Wear بسبب اثنتين من المواد الصلبة متلامستان ، والإحتكاك Friction الناتج عن ذلك يسبب ضررا للسطح . لذا فإن التعرية والتآكل هما الشيء نفسه في الحقيقة ، ولكن أحدهما يحدث بسبب مائع والآخر يحدث بسبب مادة صلبة).

يتم حساب ساعات التشغيل المكافئة للتوربين الغازي Equivalent operating hours عن طريق معادلة تحتوي على العديد من المتغيرات . ساعات التشغيل المكاقئة التي تنتج عن هذه المعادلة ليست ساعات حقيقية ، وإنما هي ساعات نظرية Theoretical hours ، هي دالة Function للعديد من المتغيرات Variables وهي تتعلق بحالة التوربين الغازي ونوع الوقود وترسبات الوقود Fuel deposits وعدد مرات بدء التشغيل والعديد من المتغيرات الأخرى . المعادلة أدناه تستخدم في التوربينات الغازية نوع سيمنز SIEMENS V94.2 .
ويجب التذكير بما يلي :
١- كل بدء تشغيل Start up سيضيف (١٠) ساعات إلى عمر التوربين الغازي .
٢- كل رفض تحميل Load rejection يحدث سيزيد من ساعات التشغيل المكافئة (٥٠) ساعة .
٣- كل توقف مفاجيء لحمل الأساس Base load trip سيضيف (١٢٥) ساعة .
٤- كل ساعة حمل ذروة Peak load hour ستضيف (٤) ساعات .

$$t_{equ} = a_1 n_1 + a_2 n_2 + \sum_{i=1}^{n} t_i + f \bullet w \bullet (b_1 t_1 + b_2 t_2)$$

t_{equ} = ساعات التشغيل المكافئة Equivalent operating hours
n_1 = عدد مرات بدء التشغيل Number of starts
a_1 = 10 (عامل لبدء تشغيل واحد Factor for one start)

n_2 = عدد مرات التحميل العابر السريع Number of fast loading transients (الحمل الذي يأتي ويذهب بسرعة في كثير من الأحيان)

a_2 = 10 (عامل التحميل العابر بسرعة Factor for fast loading transients)

t_i = ساعات التشغيل المكافئة بسبب التغيرات السريعة في درجات الحرارة

Equivalent operating hours due to fast temperature changes

n = عدد مرات التغيرات السريعة في درجات الحرارة Number of fast temperature changes

t_1 = ساعات التشغيل حتى الحمل الأساس Operating hours up to base load

b_1 = 1 (عامل الحمل الأساس Base load factor) .

t_2 = ساعات التشغيل بين حمل الأساس وحمل الذروة

Operating hours between base and peak load

b_2 = 4 (عامل حمل الذروة Peak load factor) .

f = عامل الوقود Fuel factor

f = 1 لأنواع الوقود حسب مواصفات سيمنز SIEMENS – specification

f = 1.5 لوقود مع زيادة طفيفة في محتويات الصوديوم Sodium (Na) والبوتاسيوم Potassium (K) والفاناديوم Vanadium (V) .

f = 1.5 إلى 4 لزيت الوقود الثقيل Heavy fuel oil (HFO) (ويسمى أيضا زيت الوقود المتبقي Residual fuel oil) ، حسب تحليل الوقود Fuel analysis و $T_{Turbini}$

W = عامل يفترض حقن بالماء أو بالبخار Factor considering injection of water or steam

$$W = 1 + 0.45 \frac{m_W}{m_F}$$

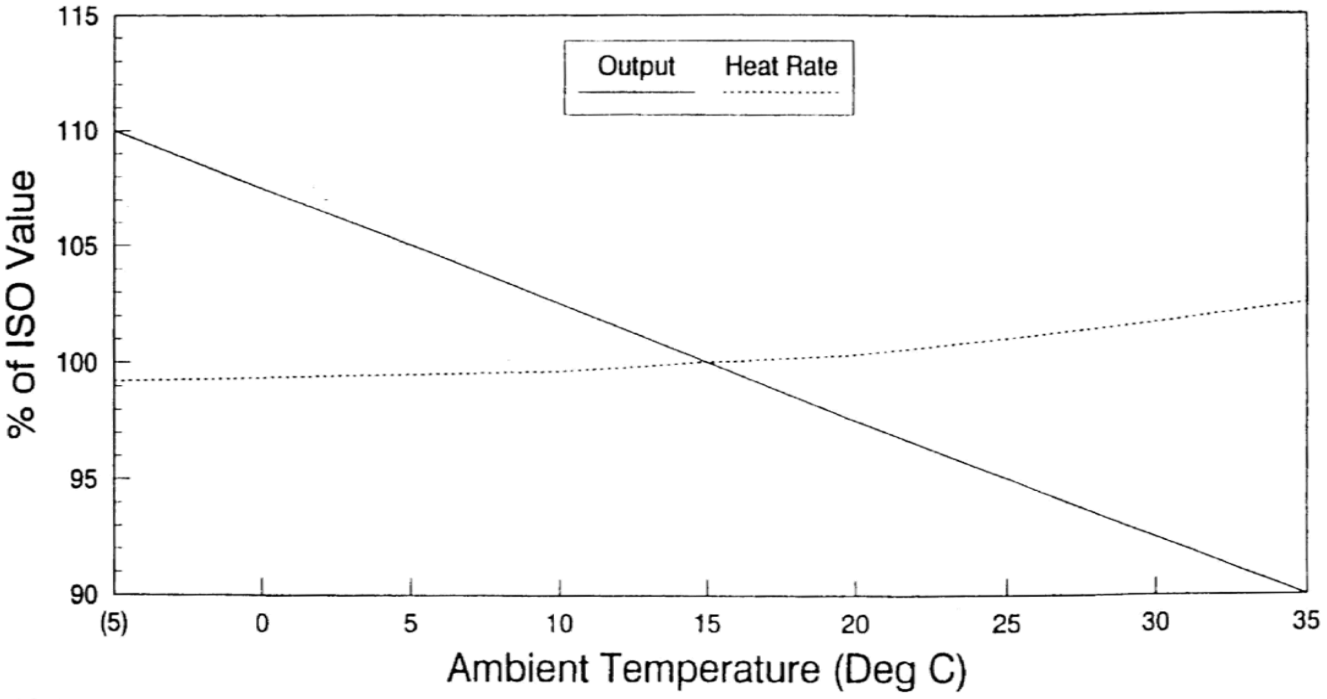
m_W = كمية تدفق الماء أو البخار المحقون Water or steam flow injected

m_F = كمية تدفق الوقود Fuel flow

تأثير درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط على القدرة الناتجة من التوربين الغازي
The effect of compressor inlet temperature on gas turbine output power

مع أنخفاض درجة حرارة مدخل الضاغط Compressor inlet temperature ، ستزداد كثافة الهواء Air density وبالتالي يزداد التدفق الخارج من الضاغط Compressor output flow وسوف يدخل تدفق إضافي إلى التوربين مما ينتج عنه زيادة في القدرة الناتجة Output power (لاحظ أن سرعة الهواء المضغوط Compressed air velocity ثابتة تقريبا بغض النظر عن كثافة الهواء ، وذلك لأن سرعة المحور ثابتة عند مختلف الأحمال - تعمل المولدة المتزامنة Synchronous generator بسرعة ثابتة) .

إن أداء التوربين الغازي GT performance هو دالة لدرجة الحرارة المحيطة Ambient temperature (درجة حرارة مدخل الضاغط) ونتيجة لذلك فإن أي انخفاض في درجة الحرارة المحيطة سيؤدي إلى زيادة الحمل المتاح Available load للتوربين الغازي [كل أنخفاض بمقدار (١ درجة مئوية C°) سيؤدي إلى زيادة الحمل المتاح بمقدار (١,٢٤ ميكاواط MW)] . ومع ذلك ، تجدر الإشارة إلى أن حمل التوربين الغازي غير ثابت عند السعة المقدرة (التصميمية) Rated or Design capacity طوال الوقت (بخلاف التوربينات البخارية Steam turbines) .



ISO Conditions:15 C, 60 % RH, 1013 mbar,
Fuel: Natural gas
Data Source :GTPRO+ manufacturer's curves

الشكل (١٤٩) تباين حمل التوربين الغازي مع درجة الحرارة المحيطة

ملاحظة : International Organization for Standardization (ISO) تعني المنظمة الدولية للمعايير ، أما ISO Conditions فهي تعني الشروط أو الظروف القياسية Standard conditions الثلاثة المحددة في التصنيفات والتي تؤثر على كثافة الهواء Air density وهي درجة الحرارة المحيطة Ambient Temperature (١٥ درجة مئوية °C) ، الرطوبة النسبية Relative Humidity (٦٠ ٪) والضغط المحيط عند مستوى البحر Ambient Pressure at Sea Level (١,٠١٣ بار bar) .

المخطط التالي والجدول التالي هو لتوربين غازي نوع سيمنز SIEMENS V94.2 موجود في أحدى محطات توليد الطاقة الكهربائية ، وهناك افتراضات مهمة لتقديم هذا الجدول وقراءته وهي :

١ - تم حساب الحد الأقصى للحمل المتوقع Maximum expected load في هذا الجدول على إفتراض أن معامل القدرة يساوي (١) Unity power factor .

ملاحظة : Power factor معامل القدرة هو النسبة بين القدرة الفعالة و القدرة الظاهرية ، وهو مساوي لجيب تمام زاوية الطور والتي هي فرق زاويتي الجهد والتيار. لذا فهو قيمة عددية ليس لها وحدة قياس تتراوح من (٠ – ١) ، في محطات القدرة يحبذ ويتم السعي إلى أن يكون معامل القدرة أكبر ما يمكن حيث أنه بزيادة درجة معامل القدرة يزداد مقدارالقدرة الفعالة وتنخفض قيمة القدرة غير الفعالة أو القدرة المخزنة .

لأن الحمل الذي يحتوي على معامل قدرة منخفض يسحب تيار أكثر من الحمل الذي يحتوي على معامل قدرة مرتفع لنفس المقدار من الطاقة المفيدة المنقولة . تزيد التيارات الأعلى من الطاقة المفقودة في منظومة التوزيع Distribution system ، وتتطلب أسلاك Wires أكبر ومعدات أخرى . وبسبب تكاليف المعدات الكبيرة والطاقة المهدورة Wasted energy ، فإن شركات الكهرباء عادة ما تفرض تكلفة أعلى على المستهلكين الصناعيين أو التجاريين Industrial or Commercial customers ، لذا فإن هدف أي شركة خدمات كهربائية هم جعل معامل القدرة (١) ، حيث أنه إذا كان معامل القدرة أقل من واحد ، فيجب عليهم توفير المزيد من التيار للمستخدم من أجل إستخدام كمية معينة من الطاقة . وللقيام بذلك ، فإنها تتحمل المزيد من خسائر الخط Line losses .

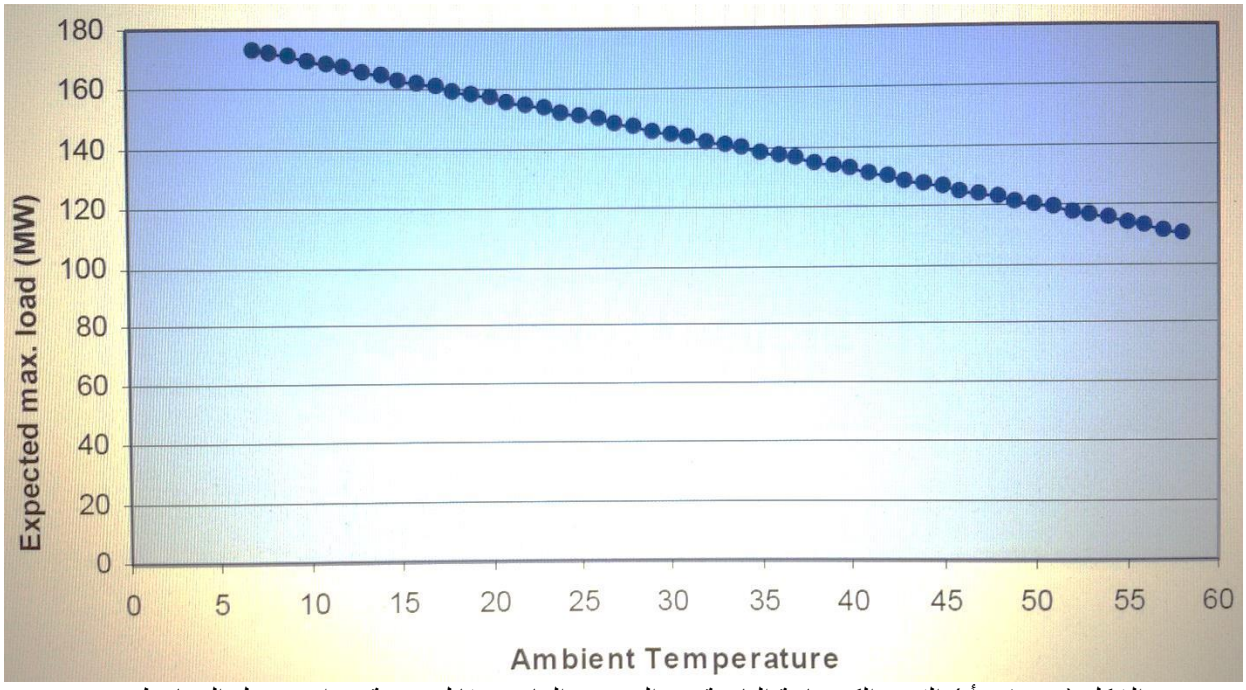
٢- بما أن وحدة التحكم في حد الحمل Load Limit Controller تُقيد أو تُحدد حمل التوربين الغازي إلى (١٧٣ ميكاواط) كحد أقصى ، حتى إذا كانت درجة الحرارة المحيطة (٥ درجة مئوية) على سبيل المثال ، فإن الحمل لا يمكن زيادته إلى الحد الأقصى المقابل (١٧٥ميكاواط في هذه الحالة) لهذا السبب .

٣- إذا تم الطلب من مركز التحكم (السيطرة) الوطني National Control Center (N.C.C) بزيادة حمل التوربين الغازي إلى أقصى حمل متوقع ، فهذا يعني بالتأكيد أن التوربين الغازي سوف يتحول تلقائيا إلى وحدة التحكم في درجة حرارة مخرج التوربين OTC Controller عندما تفتح ريشة توجيه مدخل الضاغط IGV (١٠٠٪) .

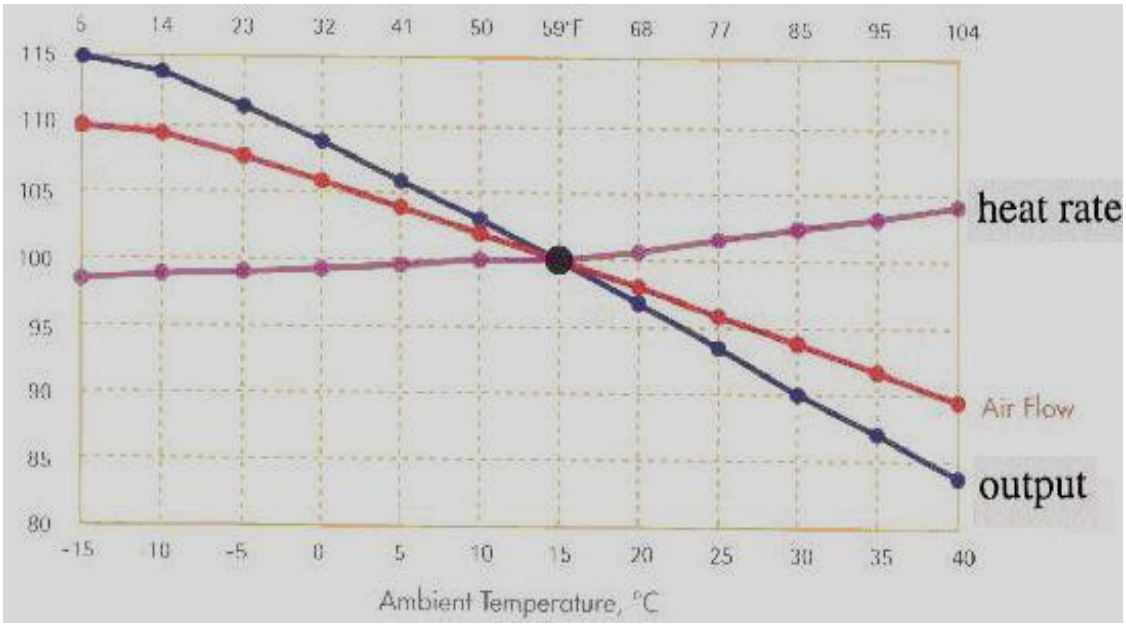
٤- هذا الجدول تم إعداده على إفتراض ظروف الطقس الجاف Dry weather (أي رطوبة نسبية Relative humidity منخفضة < ٣٥ ٪) .

٥- تم إفتراض وقود الغاز الطبيعي Natural Gas كوقود مستخدم في التشغيل . حيث تختلف الحالة عند إستخدام وقود زيت الغاز Gas Oil fuel لأن إعدادات وحدة التحكم OTC- settings تكون أقل في حالة تشغيل التوربين الغازي بوقود زيت الغاز .

٦- في حالة وجود عدة توربينات غازية في المحطة والذي من المؤكد أن لا يكون لها نفس الأداء Performance ولا نفس إعدادات وحدة التحكم OTC ، فإنه لا يُتوقع أن جميع التوربينات الغازية ستنتج نفس الحمل الأقصى عند درجة الحرارة المحيطة المحددة .



الشكل (١٥٠ - أ) القدرة الكهربائية الناتجة من التوربين الغازي مقابل درجة حرارة مدخل الضاغط



الشكل (١٥٠ - ب) تأثير درجة الحرارة المحيطة على القدرة الناتجة من التوربين الغازي

Ambient temp. (ºC)	Max. expected load (MW)	Ambient temp. (ºC)	Max. expected load (MW)	Ambient temp. (ºC)	Max. expected load (MW)
7	173	25	151	43	128.68
8	171.8	26	149.76	44	127.44
9	170.6	27	148.52	45	126.2
10	169.4	28	147.28	46	124.96
11	168.2	29	146.04	47	123.72
12	167	30	144.8	48	122.48
13	165.8	31	143.56	49	121.24
14	164.6	32	142.32	50	120
15	163.4	33	141.08	51	118.76
16	162.16	34	139.84	52	117.52
17	160.92	35	138.6	53	116.28
18	159.68	36	137.36	54	115.04
19	158.44	37	136.12	55	113.8
20	157.2	38	134.88	56	112.56
21	155.96	39	133.64	57	111.32
22	154.72	40	132.4	58	110.08
23	153.48	41	131.16		
24	152.24	42	129.92		

جدول يوضح تباين القدرة الكهربائية الناتجة من التوربين الغازي مع درجة الحرارة المحيطة (مدخل الضاغط)
(توربين غازي نوع سيمنز SIEMENS V94.2)

أهم الحمايات المستخدمة في التوربينات الغازية الأرضية
Most important protections used in land base gas turbines

فيما يلي أهم حمايات التوربين الغازي عندما يكون في حالة التحميل On load والتي من خلالها يتم التوقف المفاجيء للتوربين الغازي في حال تفعيلها :

١- الحماية من التغير المفاجيء للتدفق في الضاغط Compressor surge protection
٢- درجة حرارة العادم عالية Exhaust temperature high
٣- الضغط التفاضلي (فرق الضغط) للهواء الداخل إلى بيت المرشحات (الفلاتر) عالي Air intake filter house differential pressure high
٤- ضغط الوقود المجهز أو المغذي عالي \ منخفض Fuel supply pressure high/low
٥- نظام الكشف عن الغاز داخل التوربين مُفعل (أثناء التشغيل بوقود الغاز) Gas detection system inside turbine hall activated (during firing with fuel gas)
٦- نظام الحماية من الحريق في التوربين الغازي مُفعل Gas turbine fire protection system activated
٧- منظومة الحماية من فوق السرعة (السرعة الزائدة) للتوربين # ١ أو # ٢ مُفعل Turbine over speed protection system #1 or #2 activated
٨- إهتزاز المحامل (المساند) عالي Bearing vibration high
٩- درجة حرارة المحامل عالية Beraring temperature high
١٠- خطأ أو خلل في وحدة تحكم التوربين الغازي Gas turbine controller fault
١١- خلل في كاشف اللهب Flame detector has fault
١٢- أي حماية من المولدة تتطلب توقف مفاجيء للتوربين الغازي Any protection from generator required gas turbine trip
١٣- أي حماية من محولة المولدة تتطلب توقف مفاجيء للتوربين الغازي Any protection from generator transformer required gas turbine trip
١٤- ضغط زيت التزييت منخفض Lubrication oil pressure low

خطوات تشغيل التوربين الغازي الأرضي Start up sequence of land base gas turbine

الجدول التالي يصف خطوات بدء تشغيل التوربين الغازي Start up وتحميله Loading وإيقاف تشغيله Shut down :

ملاحظات توضيحية :

١- الرمز (SGC) يعني وحدة التحكم في المجموعة الفرعية Sub Group Control تُستخدم لأتمتة العمليات الكبيرة (البدء ببرامج العمليات تلقائيا Automatically start the program) مثل : بدء تشغيل التوربين الغازي Turbine start up أو إيقاف تشغيل التوربين الغازي Turbine shut down أو فحص الدوال (الوظائف) Test functions .

٢- الرمز (SFC) يعني محول التردد الثابت Static Frequency Converter كما يشار إليه بأسم بادىء الحركة الثابت Static starter ، يُستخدم SFC بدلا من إستخدام صندوق التروس Gearbox لبدء تشغيل التوربين الغازي وهذا النوع من وسائل البدء يستخدم المولدة كمحرك Motor أثناء البدء . يتم تطبيق التيار ، عند تردد متغير ، على أطراف (أقطاب Terminals) الجزء الثابت للمولدة (يجب أيضا تطبيق الإثارة Excitation على المحور الدوار للمولدة) لتسريع الوحدة من السرعة صفر خلال مرحلة التنظيف أو التطهير Purging ، والأحتراق Firing ، وحتى تقريبا الوصول إلى السرعة المُقدرة Rated speed ، قبل أن تعود المولدة إلى دورها الطبيعي كمحول لعزم الدوران Torque إلى كهرباء Electricity .

الوحدات التي تحتوي على صندوق تروس لا تستخدمه كوسيلة تسريع أو تعجيل Accelerating ؛ انه ببساطة محول السرعة Speed converter . يتطلب صندوق التروس نوعا من إدخال عزم الدوران . وفي حالة التوربينات الغازية ذات التصميم الثقيل

(الأداء العالي) من جنرال إلكتريك GE-design ، فإن المحور الذي ينقل عزم الدوران من وسائل بدء الحركة مثل (المحرك الكهربائي Electric motor ، أو محرك الديزل Diesel motor ، أو التوربين المتوسع ، إلخ) إلى عمود التوربين - المولدة يكون مباشرا وهذا يعني أن سرعة المحرك بادىء الحركة لم تتغير إبتداءا من تطبيقه على عمود التوربين - المولدة .

STEP NUM. رقم الخطوة	SGC-GAS TURBINE STEP FUNCTION وحدة تحكم المجموعة الفرعية - دالة خطوة التوربين الغازي	SGC-GAS TURBINE وحدة تحكم المجموعة الفرعية - التوربين الغازي MBY01EC001
ST(01)	SFC-Unit Start Selected محول التردد الثابت – إختيار بدء تشغيل الوحدة	From ST(01) To ST(07) Preparation for Gas Turbine Start Up من الخطوة (١) إلى الخطوة (٧) إعداد التوربين الغازي لبدء التشغيل
ST(02)	Hydraulic Oil Pumps ON مضخات الزيت الهيدروليكية تشغيل	
ST(03)	Compressor Blow Off Valves OPEN صملمات تنفيس الضاغط مفتوح	
ST(04)	Generator Cooling System ON منظومة تبريد المولدة تشغيل	
ST(07)	Prepare SFC إعداد محول التردد الثابت	
ST(08)	Start Up Of Selected Fuel System بدء تشغيل منظومة الوقود المحدد (١) (٢)	From ST(09) To ST(11) Monitoring Run Up Behavior of GT من الخطوة (٩) إلى الخطوة (١١) مراقبة تصرف التوربين الغازي أثناء الصعود بالسرعة
ST(09)	Acceleration GT until SFC-OFF if Speed > 38.6 Hz تسريع التوربين الغازي حتى فصل محول التردد الثابت إذا السرعة أكبر من ٣٨,٦ هرتز	
ST(10)	GT Acceleration To Nominal Speed Hz تسريع التوربين الغازي إلى السرعة الأسمية	
ST(11)	GT At Full Speed No Load (FSNL) التوربين الغازي عند السرعة الكاملة بدون تحميل	
ST(12)	Excitation Switched ON توصيل (الحث) الإثارة	From ST(12) To ST(16) Synchronizing Generator to Grid & Load Increase من الخطوة (١٢) إلى الخطوة (١٦) تزامن المولدة مع الشبكة وزيادة الحمل
ST(13)	Generator Synchronizing To Grid تزامن المولدة مع الشبكة	
ST(14)	أنتظار أشارة تحميل المولدة (٣) Waiting for generator on load signal	
ST(16)	Normal Gas Turbine Operation تشغيل عادي (طبيعي) للتوربين الغازي	
ST(51)	Unloading GT to < 8 MW نزول حمل التوربين الغازي إلى أقل من ٨ ميكاواط	From ST(51) To ST(55) Unloading the Gas Turbine & Disconnecting Generator from Grid من الخطوة (٥١) إلى الخطوة (٥٥) نزول الحمل وفصل المولدة عن الشبكة
ST(52)	تم نقل مساعدات (ملحقات) الوحدة (غير قابل للتطبيق) (٤) Unit Auxiliaries Has Transferred (Not Applicable)	
ST(53)	Unloading GT to < 1.5 MW نزول حمل التوربين الغازي إلى أقل من ١,٥ ميكاواط	
ST(54)	Disconnecting Generator From Grid فصل المولدة عن الشبكة	
ST(55)	Excitation Switched OFF فصل (الحث) الإثارة	
ST(56)	SHUT DOWN of Selected Fuel System أيقاف تشغيل منظومة الوقود المحدد	
ST(57)	Shaft Running Down تقليل سرعة دوران العمود الدوار	From ST(57) To ST(58) Gas Turbine Running Down من الخطوة (٥٧) إلى الخطوة (٥٨) نزول سرعة التوربين الغازي
ST(58)	Set Release Memory For Restart ضبط (تحديد) تحرير الذاكرة لغرض إعادة التشغيل	
ST(59)	Turning Gear Operation START if GT Speed < 3 Hz بدء تشغيل جهاز التدوير البطيء إذا سرعة التوربين الغازي أقل من ٣ هرتز	From ST(59) To ST(62) Start Turning Operation من الخطوة (٥٩) إلى الخطوة (٦٢) بدء تشغيل
ST(60)	Generator Cooling system SHUT DOWN أيقاف تشغيل منظومة تبريد المولدة	
ST(61)	Hydraulic Oil Pumps OFF & active turn Program أيقاف تشغيل مضخات الزيت الهيدروليكية و برنامج التشغيل فعال	
ST(62)	Ready to Start Up the Gas Turbine (Restart) أستعداد لبدء تشغيل التوربين الغازي (أعادة تشغيل)	
ST(0)	SGC-GAS TURBINE in Manual Mode التوربين الغازي في الوضع اليدوي	

جدول خطوات بدء تشغيل التوربين الغازي وتحميله وأيقافه Gas turbine start up, loading & shutdown

(١) - أثناء تشغيل التوربين الغازي بوقود الغاز الطبيعي Natural gas مع وضع الخلط أو المزج المسبق أو البريمكس (خلط الوقود والهواء معا مسبقا قبل حرق الوقود) Premix mode ، هناك بعض الحالات التي تتطلب إما تغيير سريع أو طبيعي إلى وضع الإنتشار أي شعلة ذات إنتشار رقائقي (طباقي ، صفائحي) Diffusion mode . ومع ذلك ، فإن التغيير السريع إلى وضع الإنتشار مطلوب عندما :

أ - ينخفض ضغط الغاز الطبيعي إلى الحد الأدنى أو التذبذب Fluctuating .

ب - التغير السريع في ضغط الغاز الطبيعي .

ج - الإستجابة ل Humming Monitoring .

د - خلل في صمام التحكم بالغاز (الصمام الموجه أو البادىء) Pilot gas valve .

هـ - تذبذب الحمل خلال التشغيل بوقود الغاز الطبيعي مع وضع البريمكس .

لاحظ أن هناك تغيير سريع إلى وضع الإنتشارأثناء التشغيل بزيت الوقود (.F.O) Fuel oil مع وضع البريمكس بوجود خطوات إضافية على .SGC - F.O .

(٢) - في حالة تغيير الوقود ، هناك خطوات إضافية يجب على SGC المكافىء القيام بها .

(٣) - إذا تم إستلام إشارة تحميل المولدة ، فسيتم إيقاف تشغيل جهاز المزامنة التلقائي Automatic paralleling device .

(٤) - لا تتوفر هذه الخطوة في بعض التوربينات الغازية ويتم تطبيقها فقط للوحدات التي تحتوي مولدها على قاطع دورة Circuit breaker قبل محولة الخدمة للوحدة ، وبالتالي تحتاج مساعدات الوحدة Unit auxiliaries إلى الطاقة المغذية Feed power من الوحدات المجاورة في حالة إيقاف تشغيل الوحدة .

ملاحظة : Pilot valve صمام تحكم : هو صمام صغير يتحكم في تدفق تغذية محدود إلى صمام توجيهي منفصل . هذا الصمام عادة يتحكم في الضغط العالي أو تدفق التغذية العالي High flow feed . تكون الصمامات التجريبية مفيدة لأنها تسمح بتغذية صغيرة وتشغيلها بسهولة للسيطرة على ضغط أعلى أو تدفق تغذية أعلى ، وإلا فإن الأمر قد يتطلب قوة أكبر بكثير ، في الواقع ، هذا مفيد حتى عندما يتم إستخدام الملف اللولبي Solenoid Coil لتشغيل الصمام . غالباً ما تستخدم الصمامات التجريبية في التطبيقات الحرجة Critical applications (التحكم في الطوارئ والسلامة Emergency and safety controls) .

توضيح خاص بال (SFC) : إن الأجهزة او الماكينات المتزامنة Synchronous machines التي تحركها التوربينات الغازية لغرض إنتاج الطاقة الكهربائية Electrical power مجهزة بشكل عام بـ SFC وهي أيضاً من أجل تشغيل الوحدة وليست معدات تشغيل مستمرة . فالتوربينات الغازية غير ذاتية البدء . تعمل الماكينة المتزامنة كمحرك Motor في البداية لتدوير التوربين الغازي . عندما يكتسب المحور السرعة المثلى Optimum speed ، يتم تشغيل التوربين الغازي ويبدأ التوربين الغازي في إنتاج عزم الدوران . في البداية ، عندما تعمل الآلة المتزامنة كمحرك ، لا يمكنك توصيل تيار متناوب (٥٠ هرتز) مباشرة بالمحور مع بعض الإثارة Excitation حيث أنه سوف لن ينتج عزم دوران وقد يحرق الملف بدلا من ذلك . بل تحتاج بدلا من ذلك إلى تزويد الملف بجهد (فولتية) متغير بنفس نسبة التغير في التردد لتدوير المحور و التحكم بسرعة المحرك الحثي Induction motor الذي يحتاج أيضا إلى إثارة مثلى . كل هذا يجب أن يتم مع الحفاظ على مقدار (أو أعلى قليلا) من التدفق (الفيض) المُقدر (الفولتية \ التردد) Rated flux (V / Hz) .

كلما أزدادت سرعة المحور ، كلما زاد التردد المجهز لمواكبة عزم الدوران المطلوب ويُسرّع عملية الإحتراق في التوربين الغازي . وبمجرد وصول سرعة المحور إلى سرعة (١٠٠٪) ، يتم تغيير وضع الماكينة إلى التوليد وتبدأ في إنتاج الطاقة الكهربائية .

لا توجد هذة الحالة في التوربينات البخارية لأنها وحدات بدء تشغيل ذاتية Self starting unit . وبعض وحدات التوربينات الغازية مجهزة بمحرك DC منفصل لغرض البدء .

ملاحظة توضيحية : (V / Hz) : تقترن محركات التيار المتناوب AC motors عادة بمحركات التردد المتغير (VFDs) Variable frequency drives ، التي تتحكم في سرعة المحرك من خلال تنظيم أو ضبط تردد الجهد المغذي . وبالإعتماد على تطبيق ومستوى تنظيم السرعة المطلوبة ، فإنه يمكن التحكم في VFDs إما بالطرق العددية أو المتجهات . النوع الأكثر شيوعا للتحكم في VFD هي الطريقة العددية يشار إليها (بالفولتية \ التردد) Volts per frequency (V / Hz) .

توضيحات

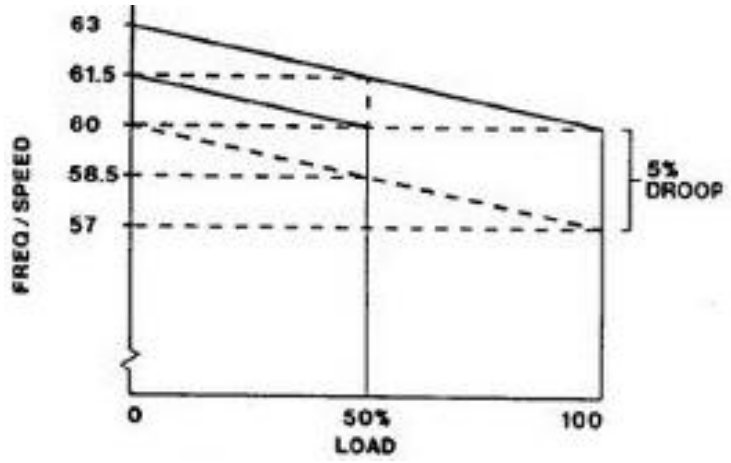
نظامي التزامن والتباطؤ Isochronous & Droop systems

يمكن تشغيل المنظم في وضعين :

١ - الوضع المعزول أو المتزامن Isolated or Isochronous Mode :

النظام المعزول Isolated system هو تطبيق يقوم فيه محركان أو أكثر بتوجيه حمل مشترك . يمكن أن يكون هذا الحمل مولدات كهربائية Electrical generators ، مضخات Pumps ، مراوح سفن Ship propellers ، إلخ . هذه الأنظمة المعزولة غير متصلة بأي أنظمة أخرى أو أداة مساعدة . إذا كان هناك محركان يعملان في الوضع المتزامن دون أجهزة تحكم في مشاركة الحمل ويجهزان نفس الحمل ، فسيحاول أحدهما تحمل الحمل بالكامل وسيتخلى الآخر عن كل حمولته . ولكي يتشارك الإثنان في حمل متساوي ، يجب إستخدام بعض الوسائل الإضافية للحفاظ على إستقرارهما مثل وضع الإنخفاض Droop mode .

في وضع الإنخفاض ، ستشترك جميع المحركات في التحميل حسب إعدادات الإنحفاض Droop setting الخاصة بها . إذا كانت جميع المحركات في وضع الإنخفاض لها نفس الإعداد ، فستتقاسم الحمل بالتساوي بنفس إعدادات السرعة والعكس صحيح .



الشكل (١٥١) مع وضع الإنخفاض تقل السرعة مع زيادة الحمل

ما الفرق بين خصائص منظم التزامن Isochronous governer و منظم الإنخفاض أو التباطؤ Droop governer ؟

يعني التزامن أو تساوي الزمن أن المنظم يبقي دائما على نفس التردد Frequency . بينما يُستخدم التباطؤ لضمان إنخفاض التردد وفقا للحمل .

على سبيل المثال ، إذا كان لديك مولدة يمكنه توفير (١٠٠ كيلو فولت أمبير kVA) كحد أقصى . عند العمل في الوضع المتزامن ، سيحاول المنظم الحفاظ على نفس التردد . وإذا كانت تعمل في وضع التباطؤ ، دعنا نقول بنسبة (١٪) ، فعندما يكون الحمل (صفر) يكون التردد (٥٠ هرتز Hz) . ولكن عندما يكون لديك الحد الأقصى من الناتج (الحمل) سينخفض التردد إلى (٤٩,٥ هرتز) .

التحكم في إنخفاض (نزول) السرعة Droop speed control

في توليد الطاقة الكهربائية ، يعتبر التحكم في إنخفاض (نزول) السرعة Droop speed control هو وضع التحكم في السرعة لمحرك رئيسي Prime mover يقود مولدة متزامنة Synchronous generator متصل بشبكة كهربائية Electrical grid . يسمح هذا الوضع للمولدات المتزامنة بالعمل بالتوازي ، بحيث يتم تقاسم الأحمال بين المولدات بما يتناسب مع قدراتها المصنفة Power rating .

إنخفاض التردد أو إنخفاض السرعة Frequency droop or Speed Droop هو فقدان أو نقصان في التردد أو السرعة بينما تمضي الوحدة من عدم التحميل No load إلى التحميل الكامل Full load (أي مع الزيادة في الحمل) .

النسبة المئوية لإنخفاض التردد Droop Frequency هي نسبة الفرق في التردد عند عدم التحميل والتحميل الكامل إلى التردد عند عدم التحميل .

Droop Frequency = [(No Load Frequency - Full Load Frequency) / No Load Frequency] x 100%

مثال:

تردد اللاحمل للمولدة = ٦٣ هرتز (Hz) ، تردد الحمل الكامل للمولدة = ٦٠ هرتز

Droop Frequency = [(63 Hz - 60 Hz) / 63 Hz] x 100%

Droop Frequency = 4.7 % نسبة إنخفاض التردد

النسبة المئوية لإنخفاض السرعة Droop Speed هي نسبة الفرق في السرعة عند عدم التحميل و التحميل الكامل إلى السرعة عند عدم التحميل .

Droop Speed = [(No Load Speed - Full Load Speed) / No Load Speed] x 100%

مثال:

سرعة المحرك Motor بدون تحميل = ١٨٧٢ دورة في الدقيقة (rpm) .

سرعة المحرك عند التحميل الكامل = ١٨٠٠ دورة في الدقيقة

Droop Speed = [(1872 rpm - 1800 rpm) / 1872 rpm] x 100%

Droop Speed = 3.85 % إنخفاض السرعة بنسبة

توضيح الأمثلة : يجب أن تقابل المولدات المتزامنة Synchronous generators العاملة بالتوازي مع أربعة شروط للتشغيل المتزامن وهي تسلسل الطور(المرحلة) Phase sequence وزاوية الطور Phase angle والجهد Voltage والتردد Frequency . عندما يتم إضافة الحمل إلى المولدة ، فإن السرعة تتباطأ Speed droops بسبب الحمل .

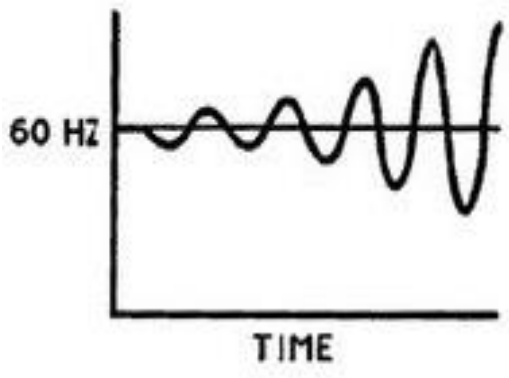
يتم التحكم في التردد لمولدة متزامنة بواسطة الشبكة الكهربائية Grid المرتبطة بها . يتم ضبط سرعة المحرك الرئيسي Prime mover إلى حد ما أعلى من السرعة (دورة في الدقيقة RPM) المطلوبة لمطابقة تردد المولدة مع تردد الشبكة . ثم عند إضافة الحمل ، تتباطأ المولدة إستجابة للحمل المضاف وإذا كانت جميع الحسابات صحيحة ، فإن تردد المولدة سوف يتطابق مع تردد الشبكة .

وهذا أمر مهم لأنه إذا كانت المولدة يعمل بشكل أبطأ من الشبكة ، فسوف تعمل مثل المحرك Motor حيث تحاول الشبكة أن ترفع سرعتها . إذا كانت أسرع من الشبكة ، فستحاول الشبكة إبطائها . كلتا الحالتين قد تسببان ضررا كبيرا في الجزء الثابت للمولدة Generator stator . و في بعض الحالات ، ستدمر الجزء الثابت .

ولذلك ، فمن الضروري أن يتم احتساب التباطؤ Droop لمنع تلف المولدات التي تكون بالعمل . وكما في المعادلة التالية :
النسبة المئوية لإنخفاض أو تباطؤ السرعة Droop Speed هي نسبة الفرق في السرعة عند عدم التحميل و التحميل الكامل إلى السرعة عند عدم التحميل
Droop % = (No load rated speed - full load rated speed) / No Load Rated Speed

٤ ٪ هي نسبة انخفاض مشترك . إذا كانت السرعة المقدرة عند التحميل الكامل هي (١٨٠٠ دورة في الدقيقة) ، فإن السرعة المقدرة عند عدم التحميل تكون أعلى بنسبة (٤ - ٥ ٪) وهي حوالي (١٨٧٥ دورة في الدقيقة).
عندما يتم تشغيل الشبكة مسبقا ويتم ربط مولدة أخرى لتلبية الطلب على الطاقة الكهربائية ، يجب أن نتأكد من المتطلبات أو الشروط الأربعة . يجب أن يكون الجهد والتردد أقرب إلى الشبكة قدر الإمكان وترتبط الأطوار بنفس التسلسل .
تعمل المولدة بسرعة اللاحمل والتي تنتج ترددا أعلى قليلا من الشبكة . سوف يدور مؤشر التزامن (سنكروسكوب) Synchroscope indicator ببطء في اتجاه عقارب الساعة Clockwise مشيرا إلى أن التردد أسرع قليلا من الشبكة . وعندما يصل إلى موضع الساعة (١٢:٠٠) ، نقوم بإغلاق قاطع المولدة الذي يضيف حملا إلى المولدة ويبطئها .
إذا كانت جميع الحسابات صحيحة ، فإنه يتم مطابقة تردد المولدة بشكل وثيق مع الشبكة وتولد القدرة بدلا من إستهلاك القدرة كمحرك Motor . يمكننا الآن تعديل جهاز التحكم (الخانق) Throttle على المولدة لحل أي فجوة متبقية في زاوية الطور بين الشبكة والمولدة عن طريق إبطاءها قليلا أو تسريعها لجعل زوايا الطور في محاذاة أو تطابق مثالي Perfect alignment . إذا بدأنا بالأقتراب فإن كل شيء على ما يرام . إذا تباعدت للغاية فإن الدخان Smoke سيشير إلى أننا أفسدنا الأمر بالفعل .
في محطات توليد الطاقة الحديثة Modern power plant ، غالبا ما تتم هذه العملية بشكل آلي ، أوتوماتيكي (عملية آلية) Automated process . بدء تشغيل المولدة ، والسماح له بالوصول إلى السرعة والاستقرار ، ثم تضغط على زر أو تشغيل المفتاح الكهربائي Switch و سوف يُنظم الحاسوب Computer كل شيء .

لماذا منظم إنخفاض السرعة Droop governor ضروري ؟
إذا كان نظام المحرك يعمل بدون تدلى ، فإن زيادة الحمل ستؤدي إلى إبطاء المحرك . بعد ذلك ، سيستجيب المنظم Governor عن طريق زيادة الوقود حتى تعود سرعة المحرك إلى السرعة الأصلية .
نظرا للخصائص المجتمعة لكل من القصور الذاتي (قوة الإستمرار) Inertia وتأخر أو تباطؤ القدرة Power lag ، ستستمر سرعة المحرك في الزيادة إلى ما بعد إعدادات سرعته الأصلية ، مما يتسبب في السرعة الزائدة Overspeed للمحرك . سوف يستجيب المنظم مرة أخرى لتقليل السرعة لغرض تصحيح تجاوز السرعة . سيعمل على تصحيح زائد (مفرط) Over-correct للسرعة في إتجاه آخر مما يؤدي إلى ضعف إستجابة سرعة المحرك (أي أن كمية إستجابة النظام للتغير المفاجئ في المدخلات لا يرقى إلى المستوى المطلوب) .
هذا التصحيح الزائد للسرعة في كلا الإتجاهين سوف يكبر أو يضخم إلى أن يتوقف المحرك بالسرعة الزائدة .



الشكل (١٥٢) منحنيات الإستجابة لمنظم(حاكم) بدون تحكم بالسرعة وتعويض

يمكن القضاء على عدم إستقرار المنظومة عن طريق تباطؤ السرعة Droop . فكلما زاد الحمل ، قلّ إعداد سرعة المحرك Engine speed setting . عندما يتحرك المنظم (الحاكم) لتصحيح الإنخفاض الذي حصل بسبب زيادة الحمل ، سيتم تصحيحه إلى إعداد سرعة أقل . يعمل هذا الإعداد المنخفض للسرعة على منع سرعة المحرك من تجاوز الحد المسموح (المُعد) Overshooting . عادة يقوم منظم إنخفاض السرعة بتخفيض موضع ضبط السرعة من (٣٪ إلى ٥٪) من المرجع المحدد مسبقا ، بينما يزداد الحمل من اللاحمل إلى الحمل الكامل .

الحمل المعزول Isolated load

عادة ما تكون المولدة مع الأحمال المعزولة Isolated loads مولدة واحدة تدعم كل الأحمال في جزيرة صغيرة أو في قرية نائية صغيرة بدون منظومة شبكة كهربائية Grid system . حيث يكون تردد المنظومة System frequency في مكان منعزل هو تردد مولدة واحدة فقط . إنها مجرد مثل وجود مكبس مروحة Propeller piston يزود محرك طائرة Engine aeroplane بالقدرة . تعتمد كمية الطاقة المتولدة من المولدة على أحجام الأحمال في النظام المعزول Isolated system . فإذا كان الحمل (١ ميكاواط MW) ، فإن التوليد يكون (١ ميكاواط) . وإذا كان الحمل (٢٥٠ كيلو واط kW) ، فسيتم تخفيض التوليد إلى (٢٥٠ كيلواط) .

من ناحية أخرى ، فإن المولدات التي ترتبط بنظام شبكة لديها تردد نظام واحد يتحقق بالترددات المتراكمة Accumulated frequencies من المولدات . لكن المولدة الأكبر في المنظومة هي عادة ما تفرض تردد النظام . سوف تتزامن Synchronized المولدات الأخرى وتتوحد أو تندمج مع تردد المولدة الأكبر . ولكن أثناء حدوث اضطراب Disturbance كبير مثل توقف المولدة المفاجيء Generator tripping أو خروج مفاجيء لخط الفولتية العالية من الخدمة High voltage line tripping ، فإن كل مولدة ستولد على ترددها الخاص لمدة أقل من عشر ثوان . بينما في الحالة المستقرة الطبيعية ، سيكون هناك تردد نظام واحد فقط في منظومة الشبكة . تماما مثل وجود ستة مراوح Propellers مع ست طائرات بمحركات مكبسية Piston engines aeroplane . يمكن خروج أو فصل أي مولدة من الشبكة دون حدوث أي قلق بشأن الحمل في المنظومة لأن المولدات العاملة الأخرى on line generators سوف تزيد من توليد طاقاتها من أجل تعويض الخسارة أو الفقد في التوليد بسبب المولدة المتوقفة .

يجب مزامنة المولدة المتصلة بشبكة كبيرة مع الشبكة ، مما يعني أنه يجب تشغيلها بوثوقية Reliably بشكل يعتمد على نفس تردد الشبكة . لا يمكن أن تبطئ أو تسرع Slow down or speed up .

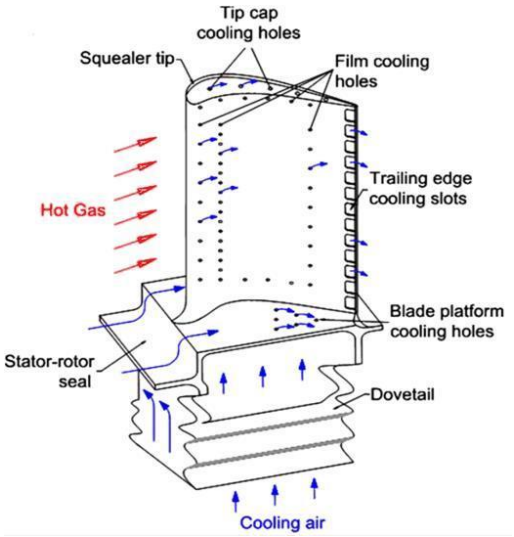
لا تحتاج المولدة التي تولد حمل منعزل Isolated load [مثل مولدة محمولة (متنقلة) Portable generator في موقع مخيم Campsite] إلى تنظيم محدد ومحكم للتردد Tight frequency regulation ، ويمكن أن تغير التردد والسرعة قليلا دون تلف أو ضرر . (قد يؤدي التغيير المفرط إلى تضرر الحمل) .

طرق تحسين كفاءة التوربين الغازي
Gas turbine –efficiency & optimization

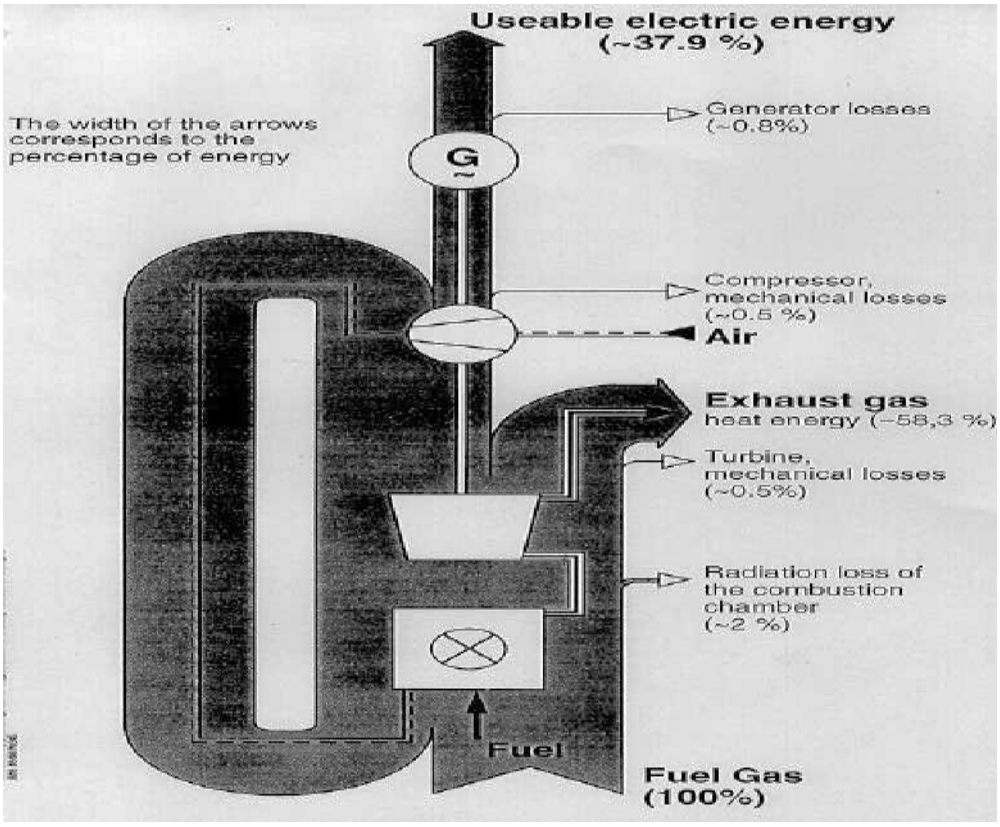
المفاقيد في التوربين الغازي The losses in gas turbine

تشمل خسائر أو مفاقيد التوربين الغازي ما يلي :
١- خسائر إحتكاك المحامل (المساند) Bearing friction losses .
٢- الخسائر الميكانيكية Mechanical losses .
٣- خسائر نزف الهواء Bleed air المستخدم لتبريد ريش التوربين Turbine blade cooling [(٥٪ إلى ٦٪) من تدفق هواء الضاغط للتوربينات الغازية متوسطة المدى و (١٦٪) للتوربينات الغازية الكبيرة)] .
٤- خسائر العادم Exhaust losses (أكبر الخسائر ٦٧٪) .
٥ - خسائر القدرة للأجهزة والمعدات المساعدة (الملحقات المساعدة) Auxiliaries power losses (فقط ٠,٥٪ بخلاف التوربينات البخارية Steam turbine) .

على مدار السنوات الماضية ، تم تحسين كفاءة التوربينات الغازية Gas turbine efficiency بشكل جيد بسبب التقنيات المعتدلة وتحسين سبائك درجة الحرارة العالية High temperature alloys لتتحمل درجة حرارة مدخل التوربين الأعلى .
كفاءة التوربينات الغازية أقل من التوربينات البخارية بسبب إتصال التوربين الغازي بالضاغط الذي يستخدم جزءا كبيرا من حمل المولد (الثلثين) ، وكذلك درجة حرارة عادم التوربين البخاري أقل بكثير من مثيلتها في التوربين الغازي ، لذلك كمية كبيرة من الطاقة يتم فقدانها على شكل حرارة في المدخنة Chimney . علاوة على ذلك ، فإن النسبة المئوية للهواء المستخلص Extracted air لغرض تبريد الأجزاء الساخنة Hot parts (هواء جانبي By pass air) هي سبب آخر لإنخفاض كفاءة التوربين الغازي .
أثناء السرعة الكاملة وفي حالة عدم التحميل No load condition أي (وضع اللاحمل Idling) ، يحتاج التوربين البخاري إلى (٢ - ٣ ٪) من تدفق الحمل الكامل Full load flow في حين يحتاج التوربين الغازي إلى (٦٧ ٪) من تدفق وقود الحمل الكامل Full load fuel أثناء وضع اللاحمل .

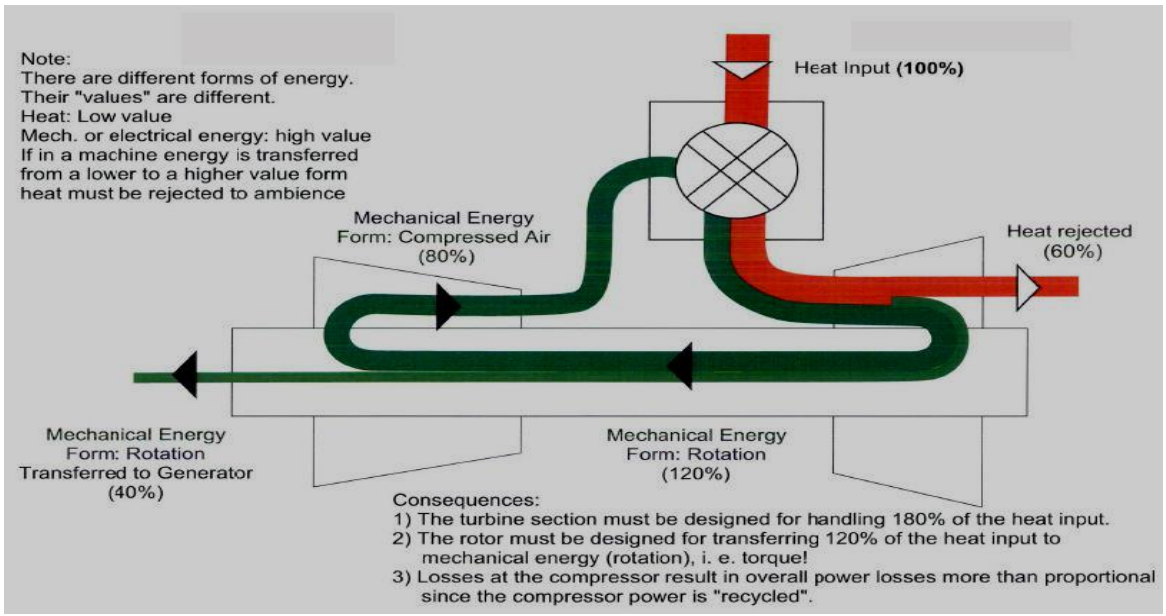


الشكل (١٥٣) تبريد ريش التوربين
Turbine blade cooling



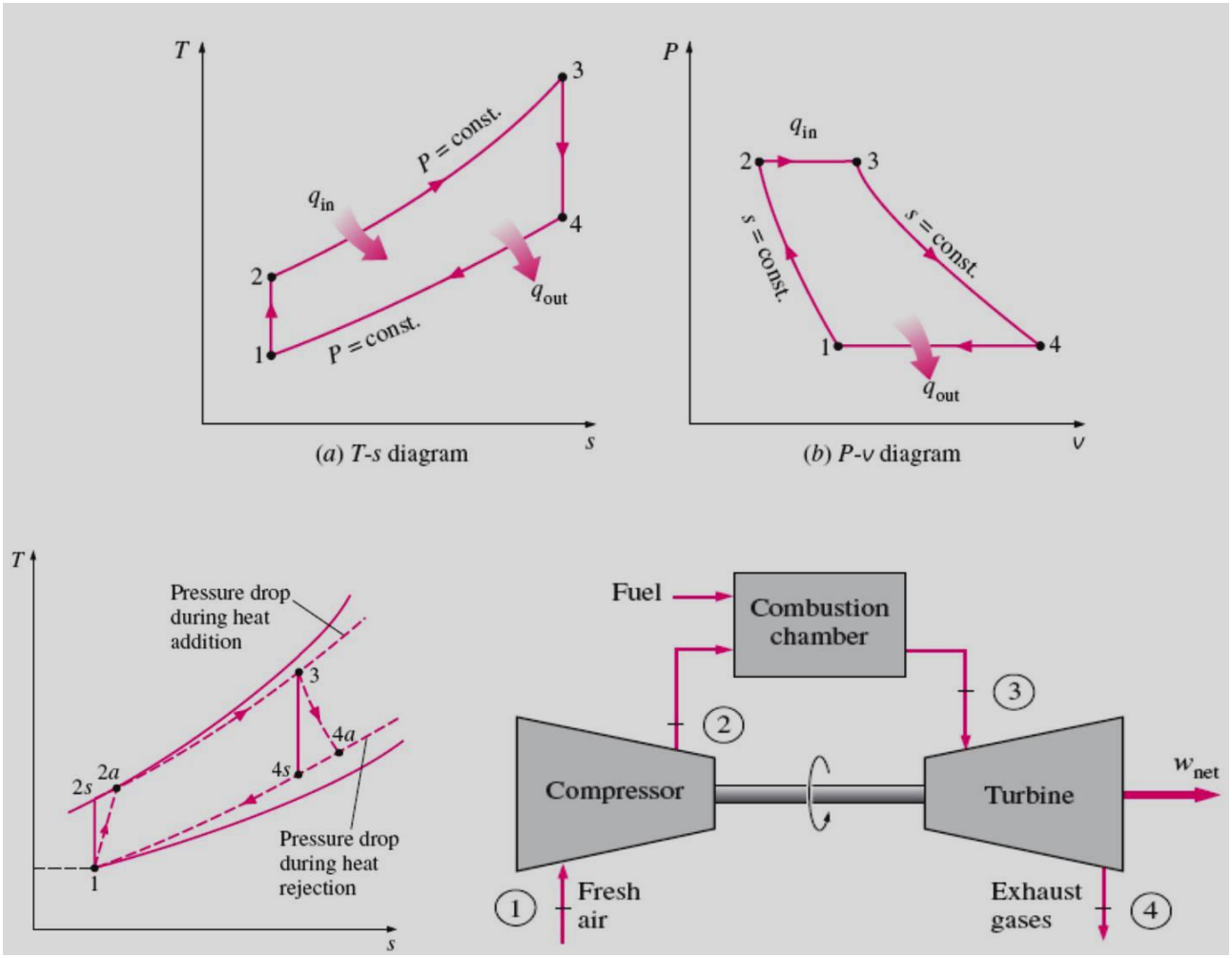
الشكل (١٥٤) مخطط سناكي Snakey diagram للتوربين الغازي نوع سيمنز SIEMENS - V94.3A

ملاحظة : Snakey diagram مخطط سناكي هو مخطط أو رسم بياني إنسيابي لوصف ثلاثي (الحركة - الإتجاه - الكمية) في تدفق المواد أو الطاقة داخل منظومة ما ، ويقوم على مبدأ المدخلات والمخرجات ، وتستخدم الأسهم عادة في هذه المخططات بحيث يتناسب عرض السهم طرديا مع كمية التدفق المشار له . وتعود التسمية إلى الكابتن الإيرلندي ماثيو هنري فينياس ريال سانكي ، الذي أستخدم هذا النوع من الرسم في عام ١٨٩٨ في منشور له عن كفاءة إستخدام الطاقة في محرك بخاري .



الشكل (١٥٥) شغل ضاغط التوربين الغازي Compressor work

ملاحظات توضيحية حول الشكل (١٥٥) :
هناك أشكال مختلفة من الطاقة Energy وبقيم مختلفة .
الحرارة Heat : قيمة منخفضة .
الطاقة الميكانيكية أو الكهربائية Mechanical or Electrical energy : قيمة عالية .
إذا تم تحويل طاقة ماكينة ما من قيمة أدنى إلى شكل آخر للطاقة بقيمة أعلى ، عندئذ يجب طرح الحرارة إلى الجو أو المحيط Ambience
النتائج :
١- يجب تصميم قسم التوربين للتعامل مع (١٨٠٪) من الحرارة الداخلة Heat input .
٢ - يجب تصميم المحور الدوار Rotor لتحويل (١٢٠٪) من الحرارة الداخلة إلى طاقة ميكانيكية Mechanical energy (دوران rotation) أي عزم الدوران Torque .
٣ - ينتج عن الخسائر في الضاغط خسائر في القدرة بشكل عام أكثر نسبيا لأن طاقة الضاغط (يعاد إستخدامه Recycled) .



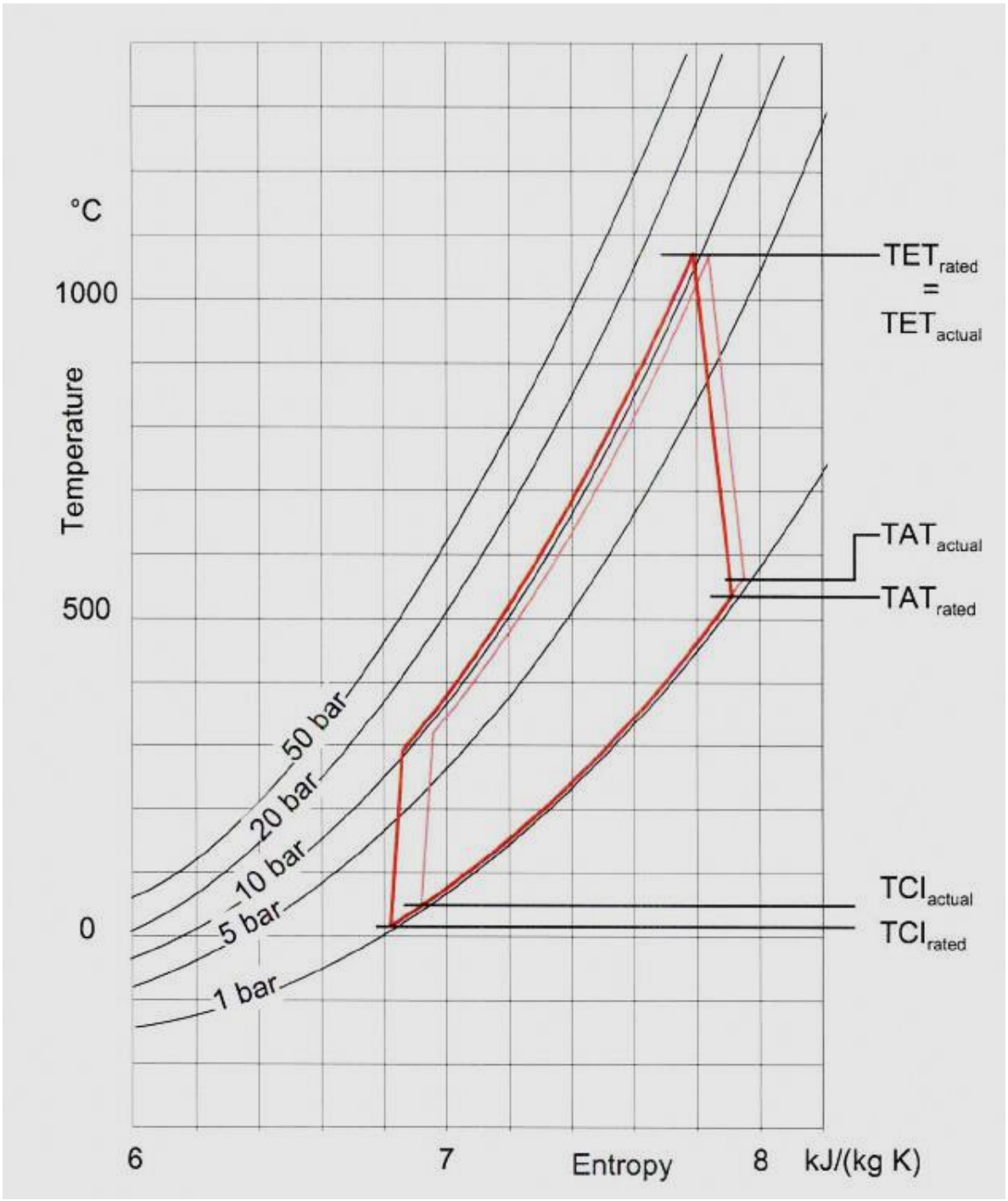
الشكل (١٥٦) مخططات ثيرموديناميكية (ديناميكية حرارية) Thermodynamic diagrams لتوربين غازي بدورة مفتوحة Open cycle gas turbine (في الأعلى مخططات لدورة برايتون المثالية Ideal Bryton Cycle) و (في الأسفل مخطط لدورة برايتون الحقيقية Actual Bryton cycle)

الطرق المستخدمة لتحسين كفاءة التوربينات الغازية الأرضية
The methods used to improve land base gas turbine efficiency

١- زيادة درجة حرارة مدخل التوربين Increase turbine inlet temperature .
٢- زيادة كفاءة مكونات الماكينات أو الآليات التوربينية Increase The efficiency of turbo machinery components
٣ - التوربين الغازي مع المجدد (المسترجع أو معيد التوليد) Gas turbine with regenerator .
٤- الضاغط مع التبريد البيني compressor with Intercooling .
٥ – التوربين الغازي مع إعادة التسخين Gas Turbines with Reheat .
٦ - التبريد التبخيري لمدخل الضاغط Evaporative cooling for compressor inlet .
٧- نظام التضبيب (رش أو ترذيذ الماء بضغط عالي) Fogging system (high pressure water spray)
٨- منظومة تبريد المياه لتبريد هواء مدخل الضاغط (التبريد الميكانيكي) Chilling water system for cooling compressor inlet air (Mechanical Chilling)
٩- حقن الماء أو البخار Water or steam injection .
١٠- زيادة نسبة الإنضغاط (rp) Increase the pressure ratio .
١١- الشحن الزائد (التغذية الإضافية) Supercharging .
١٢- دورة التوربين الغازي المشتركة أو المركبة Combined cycle gas turbine .
١٣- دورة توربين الهواء الرطب Humid air Turbine cycle .
١٤- الأخذ بنظر الإعتبار نوعية الوقود في التوربين الغازي Fuel consideration in gas turbine .

فيما يلي وصف هذه الطرق بالتفصيل :

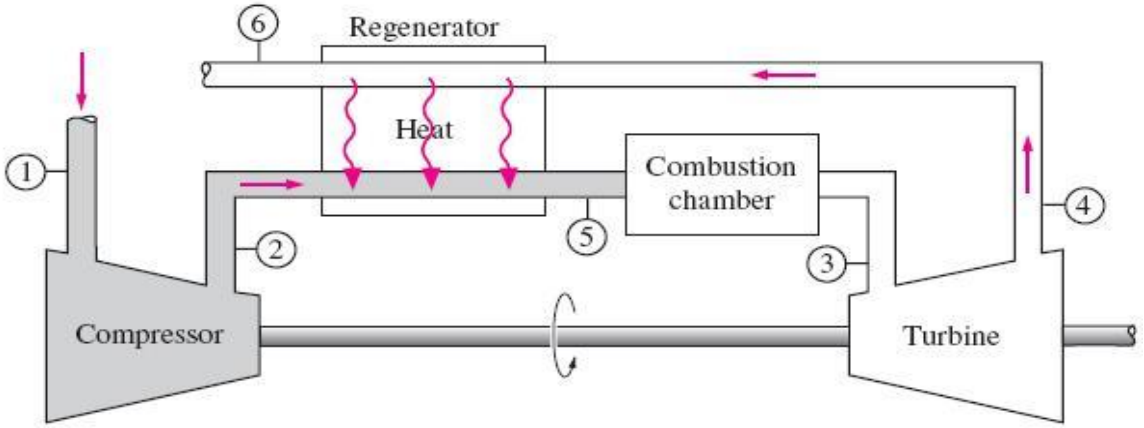
١- زيادة درجة حرارة مدخل التوربين :
اليوم ، تم تحسين درجة حرارة مدخل التوربين من (٥٤٠ درجة مئوية °C) إلى (١٤٢٥ درجة مئوية °C) ، مع زيادة درجة حرارة مدخل التوربين ، ستزداد القدرة الناتجة Output power وكفاءة التوربين الغازي . العوامل الرئيسية التي تحد من هذا الإختيار هي تطوير سبائك فائقة Super alloys لتحمل درجات الحرارة العالية و خليط أكاسيد النيتروجين Nitrogen oxides (NOx) الإضافية الزائدة مع زيادة درجة حرارة مدخل التوربين . كلما أزدادت درجة حرارة مدخل التوربين بمقدار (٥٦ درجة مئوية) ، ستزداد قدرة التوربين بنسبة (١٠٪) والكفاءة الحرارية Thermal efficiency بنسبة (١,٥٪) .
إستخدام البخار كمبرد Coolant لريش التوربين يسمح بإنخفاض متوسط درجة الحرارة لريشة التوربين (يتمتع البخار بقدرة إزالة حرارية أفضل من الهواء).
لزيادة درجة حرارة مدخل التوربين ، يجب الأخذ بنظر الإعتبار كل من مادة (معدن) الريشة Blade material ، ونوع الوقود Fuel type وتقنية التبريد Cooling technique .
مساوئ زيادة درجة حرارة مدخل التوربين هي قصر عمر (حياة) أجزاء التوربين التي تتطلب صيانة متكررة بإستمرار Frequent maintenance .



الشكل (١٥٧) دورة برايتون للتوربين الغازي (المخطط البياني الثيرموديناميكي درجة الحرارة – الأنتروبي)
Bryton cycle for gas turbine . Thermodynamic diagram Temp. - Entropy (T-s)

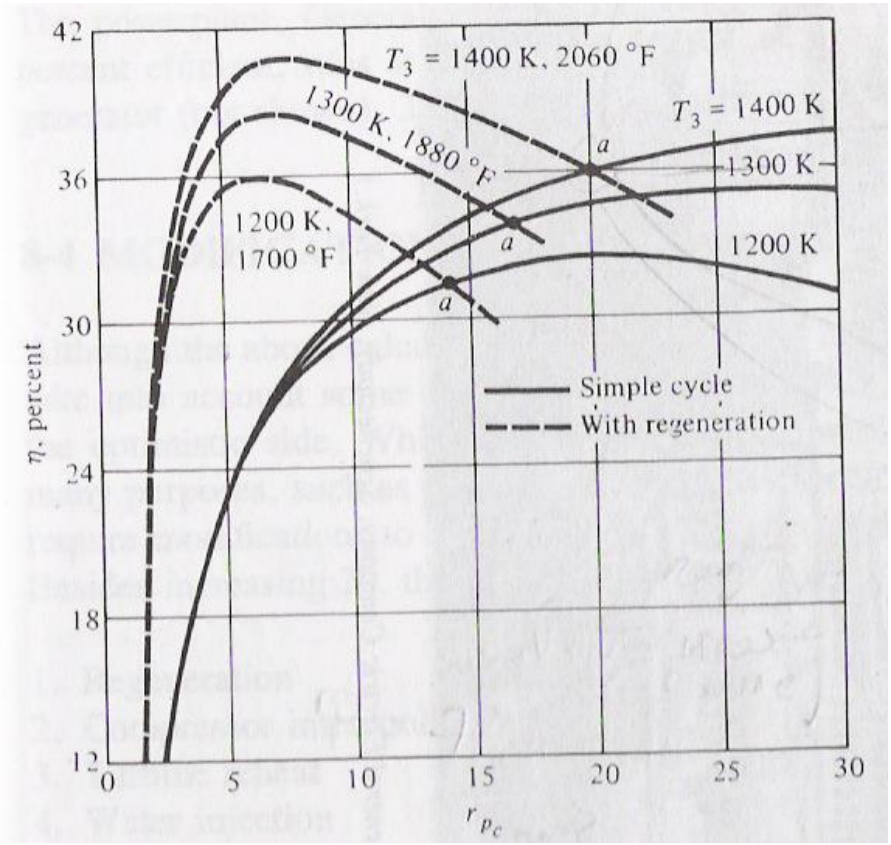
٢- زيادة كفاءة مكونات الماكينات أو الآليات التوربينية :
تحتوي التوربينات الغازية القديمة على ريش ذات تصميم ديناميكي هوائي عادي Poor blade aerodynamic ، ولكن اليوم مع التصميم بمساعدة الكمبيوتر ، تتمتع هذه الريش بكفاءة أفضل وبخسائر أدنى .

٣- التوربين الغازي مع المجدد أو المسترجع أو معيد التوليد (مبادل حراري Heat exchanger) :
في هذه الطريقة ، يتم إسترجاع (إسترداد) الغازات الساخنة من عادم التوربين Turbine exhaust لزيادة درجة حرارة مخرج الضاغط Compressor outlet temperature حيث سيتم التسخين المسبق Pre-heating للهواء قبل دخوله إلى غرفة الإحتراق ، وتقلل تأثيرات هذه الطريقة من الحرارة الداخلة عن طريق الوقود وتزيد من كفاءة الدورة Cycle efficiency ، علما أن هذا التعديل (التحوير) Modification ينطبق فقط على التوربينات الغازية مع نسبة إنضغاط Pressure ratio منخفض بحيث يكون الفرق بين درجة حرارة مخرج الضاغط ومخرج التوربين كبيرا لغرض الحصول على النتائج المطلوبة .
بالنسبة للتوربينات الغازية ذات نسبة الإنضغاط العالية ، قد تؤدي إضافة المسترجع Regenerator إلى تقليل كفاءة الدورة (لأن درجة حرارة مخرج الضاغط سيكون أعلى منها في عادم التوربين) .

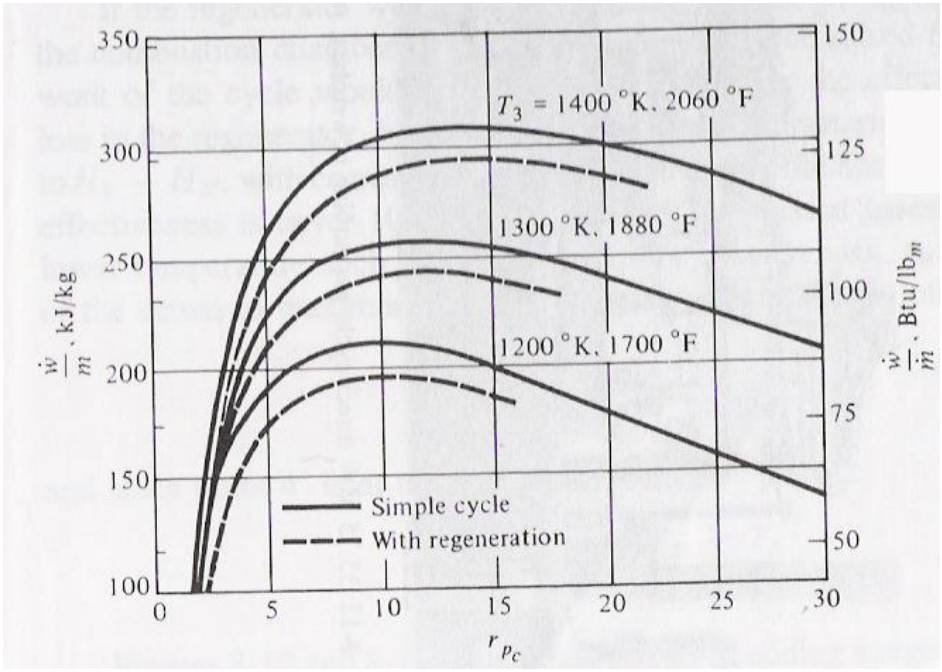


الشكل (١٥٨) التوربين الغازي مع المسترجع Gas turbine with regenerator

تتمثل عيوب Disadvantages هذه الطريقة في إنخفاض القدرة النوعية Specific power الناتجة من التوربين (كيلو جول \ كغم KJ / Kg) نتيجة لفقدان الضغط الإضافي على المُجدد أو المسترجع ، كما سينتج المسترجع خسائر الضغط الراجع (الخلفي) Back pressure على التوربين (تماما مثل عادم محرك السيارة مع شحن فائق Super charge) .
سوف تؤدي إضافة المجدد إلى دورة التوربين الغازي إلى زيادة الضغط الخلفي للتوربين (كل زيادة بمقدار ٢,٥ في الضغط الخلفي ستقلل حمل التوربين الغازي بنسبة ٠,٣٪) ، وسيتم الحصول على نفس النتيجة عند استخدام دورة التوربينات الغازية المركبة Gas turbine combined cycle ، حيث ستكون أنابيب مرجل (مولد البخار) إسترجاع الحرارة Heat recovery stream generator تماما مثل حاجز لتدفق الغازات الساخنة ، والنتيجة هي زيادة الضغط الخلفي على التوربين الغازي وتقليل حمله بنسبة (١٪ إلى ٢٪) .



الشكل (١٥٩) الكفاءة مقابل نسبة إنضغاط الضاغط للتوربين الغازي ، يوضح تأثيرات كل من درجة حرارة مدخل التوربين والتجديد (الإسترجاع) Regeneration



الشكل (١٦٠) القدرة النوعية Specific power مقابل نسبة الإنضغاط للتوربين الغازي ، يوضح تأثيرات كل من درجة حرارة مدخل التوربين والتجديد (الإسترجاع)

٤- الضاغط مع التبريد البيني :

يمكن تقليل شغل الضاغط Compressor work إذا حدثت عملية الإنضغاط عند درجة حرارة تدفق ثابتة بنفس نسبة الضغط عبر كل مرحلة من مراحل الإنضغاط .

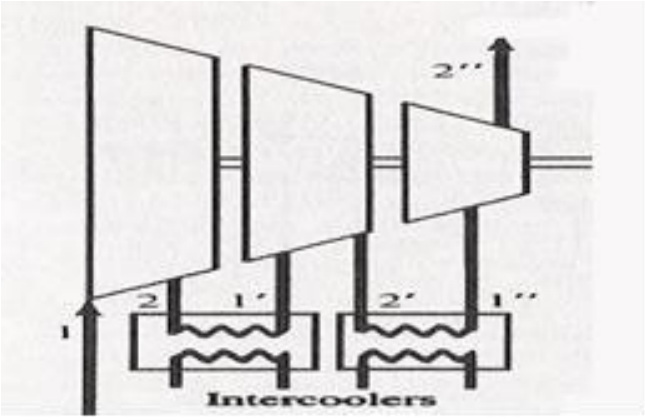
لتقليل شغل الضاغط أثناء مرحلتين إنضغاط ، يجب أن تكون نسبة الضغط عبر كل مرحلة من مراحل الضغط هي نفسها ، عند استيفاء هذا الشرط ، سيصبح شغل الضاغط في كل مرحلة متطابقا (مثال: شغل مرحلة الضاغط ١ = شغل مرحلة الضاغط ٢) .

سوف تزداد درجة حرارة التدفق المضغوط عبر كل مرحلة من مراحل الإنضغاط ولتقليل درجة الحرارة هذه ، يتم إستخدام عملية التبريد البيني Intercooling بين المراحل (بمياه التبريد Cooling water) .

هذه الطريقة فعالة في المحركات الترددية Reciprocating engines (ضاغط الإزاحة الإيجابي Positive displacement compressor) وتستخدم أيضا في ضاغط الطرد المركزي Centrifugal compressor ولكنها غير عملية في الضاغط المحوري Axial compressor .

بسبب إن إتجاه التدفق في الضاغط المحوري يكون دائما موازي لمحور الدوران ، فإن إدخال المبردات البينية Intercoolers بين مراحلها تتطلب تغيير في إتجاهات التدفق من خلال تحسين تصميم غلاف الضاغط Compressor casing ، وسوف تحد خسائر الضغط والسرعة الإضافية من الاستفادة من التبريد البيني (بخلاف ضواغط الطرد المركزي التي تقوم بالفعل إعادة توجيه التدفق من كل مرحلة إلى مرحلة جديدة لكونها ضواغط تدفق نصف قطري أو شعاعي Radial flow compressors) .

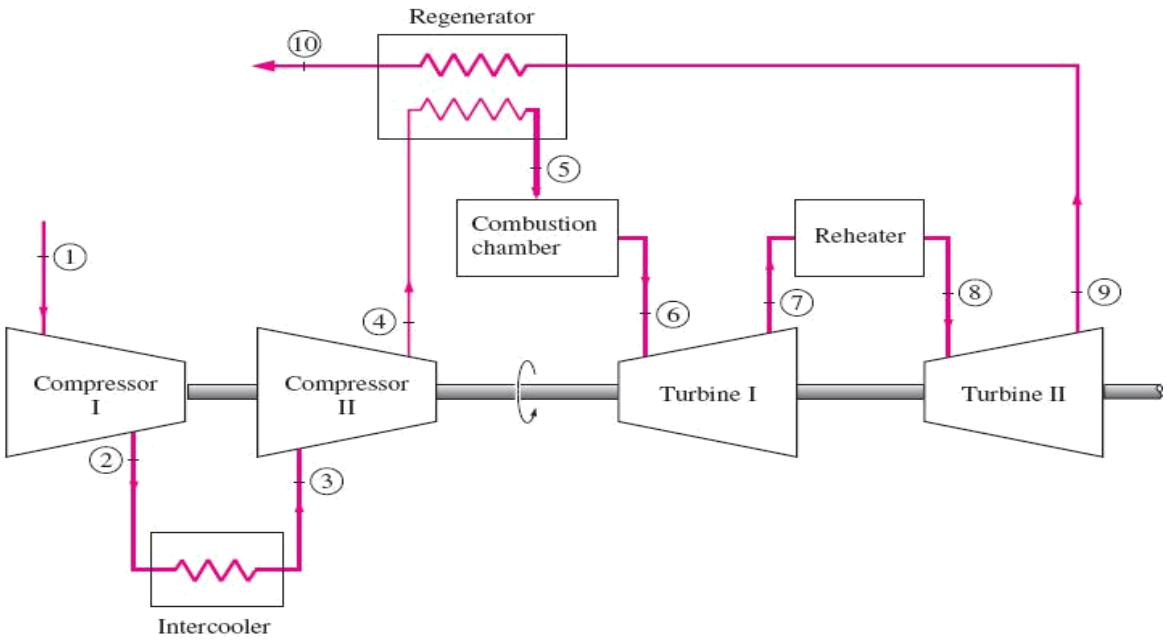
لاحظ أن فقدان السرعة مهم في الضاغط المحوري لأنه يزيد من ضغط التدفق عن طريق تسريعه أو تعجيله Accelerate (ضواغط ديناميكية أو حركية Dynamic compressors) .



الشكل (١٦١) التبريد البيني للضاغط المحوري الشكل (١٦٢) يجب أن يغير ضاغط الطرد المركزي إتجاه التدفق

لاحظ أن التبريد البيني لضاغط الهواء سيقلل من شغل الضاغط وبالتالي يزيد من القدرة الناتجة من التوربين والكفاءة الحرارية ، لكنه سيزيد قليلا من المدخلات الحرارية Heat input عن طريق الوقود ولكن التعويض هي الزيادة في الكفاءة الحرارية .

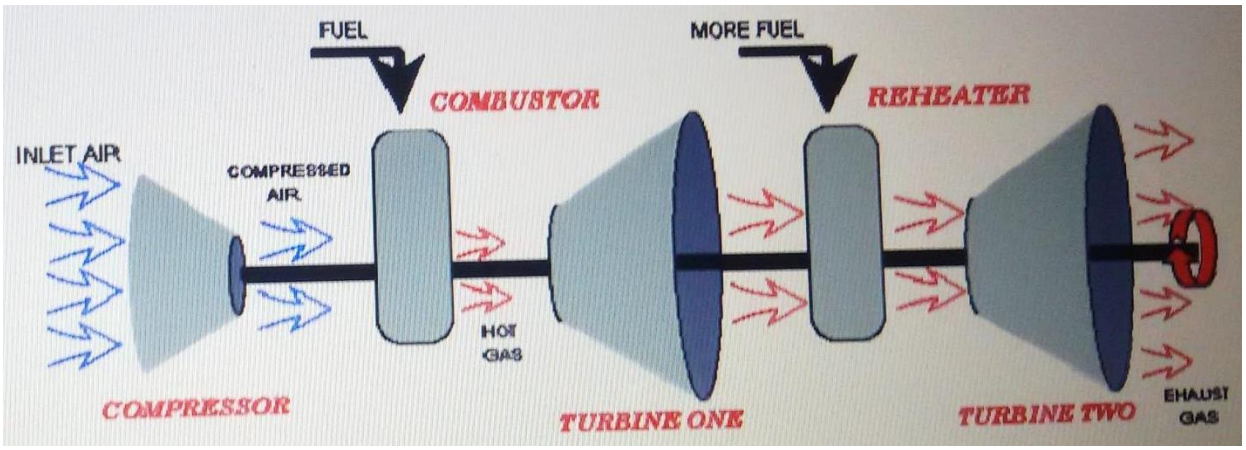
يعمل التبريد البيني للضاغط على تحسين كفاءة الدورة إذا تم استخدامه مع التوربين .



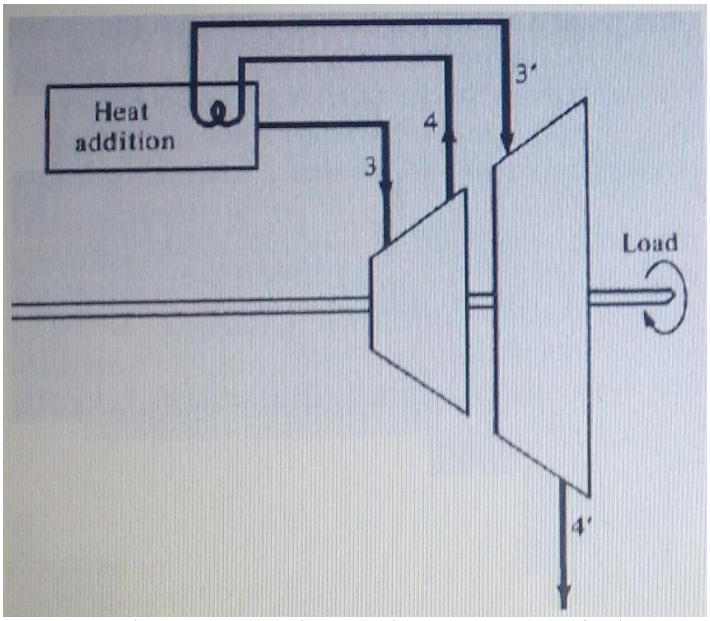
الشكل (١٦٣) التوربين الغازي مع التبريد البيني ، و إعادة التسخين و التجديد (الإسترجاع)
Gas turbine with compressor inter-cooling, turbine reheat& regeneration

٥- التوربين الغازي مع إعادة التسخين :

سيزيد معيد التسخين Reheater من قدرة التوربين الغازي ، لاحظ أن غازات العادم من التوربين الأول سيحتوي على نسبة عالية من الهواء لذا سيتم إضافة منظومة إحتراق Combustion system ثانية لحقن المزيد من الوقود والسماح بتمدد الغازات الساخنة مرة أخرى في التوربين الثاني مما يؤدي إلى زيادة إنتاجية التوربين الغازي من القدرة .

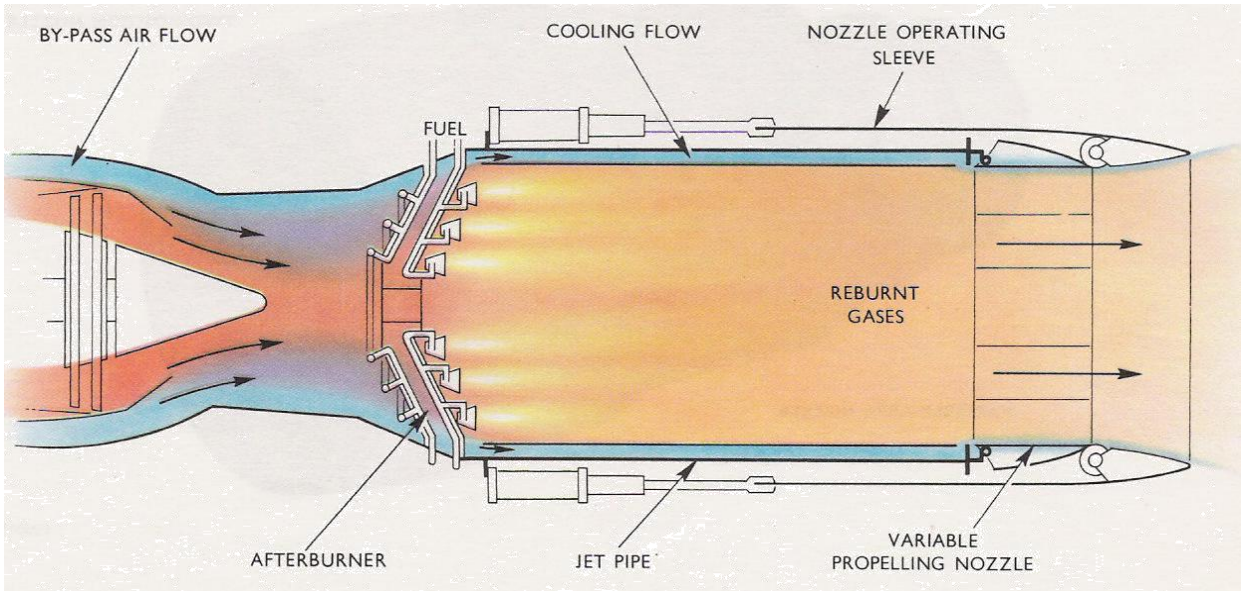


الشكل (١٦٤ - أ) التوربين الغازي مع معيد التسخين

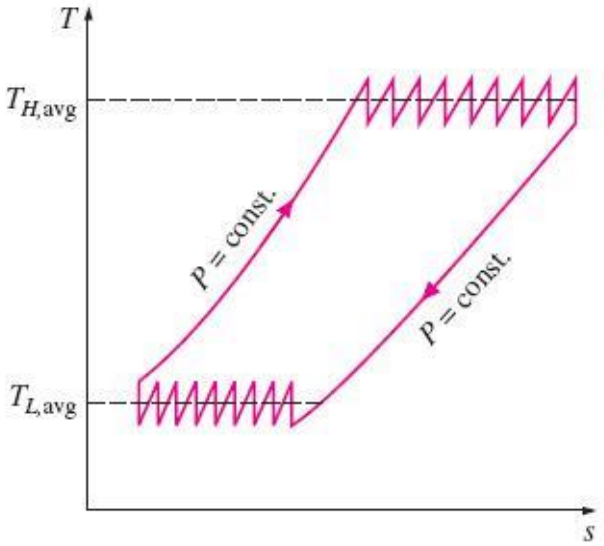


الشكل (١٦٤ - ب) التوربين الغازي مع معيد التسخين

لاحظ أنه في التوربينات الغازية الجوية (الطائرات Aircraft) ، يتم إستخدام نفس الطريقة لزيادة قوة دفع المحرك Engine thrust ولكنها لا تسمى عملية إعادة التسخين ، بدلا من ذلك يطلق على هذه الطريقة أسم الإحتراق المتأخر أو الإحتراق المتخلف Afterburning وكذلك أسم الحارق اللاحق (الثانوي)After burner والذي يستخدم فقط للطائرات المقاتلة (الحربية) Military fighter من أجل زيادة معدل سرعة الصعود Climb rate في السماء أثناء الرمي (الضرب) وأيضا أثناء الإقلاع القصير Short take off ، هذه القوة الدافعة الإضافية من الحارق اللاحق ستسمح للمقاتلة بالاقلاع ضمن مسافة أقصر . ولان الحارق اللاحق يستهلك كمية عالية من الوقود وكذلك لقلة فعاليته.بدأت الحاجة إلى الحارقات اللاحقة تقل مع بزوغ الجيل الخامس من المقاتلات لقدرتها على تحقيق سرعات فوق صوتية دون الاستعانة بها .



الشكل (١٦٥) مبدأ عمل الحارق الثانوي Principal of after burner



الشكل (١٦٦- أ) تأثير زيادة عدد عمليات إعادة التسخين و التبريد البيني على أداء دورة التوربين الغازي Gas turbine cycle performance

٦- التبريد التبخيري لمدخل الضاغط :

تذكّر أنه يمكن زيادة قدرة التوربين الغازي عن طريق خفض درجة حرارة مدخل الضاغط ، في منظومة التبريد التبخيري Evaporative cooling system ، يتم رش الماء إلى أسطح مائلة Tilted surfaces مصممة لإمتصاص الماء (مصنوع من الكرتون أو الصوف Cartoon or Wool) ، يمر الهواء من خلال هذه الأسطح وتقوم بتبخير بعض هذا الماء ، لذا يفقد الهواء بعض من حرارته (الحرارة الكامنة لتبخير الماء Latent heat of vaporization of the water) لكنه سيبرد إلى درجة حرارة الهواء الرطب Wet-bulb temperature تقريبا .

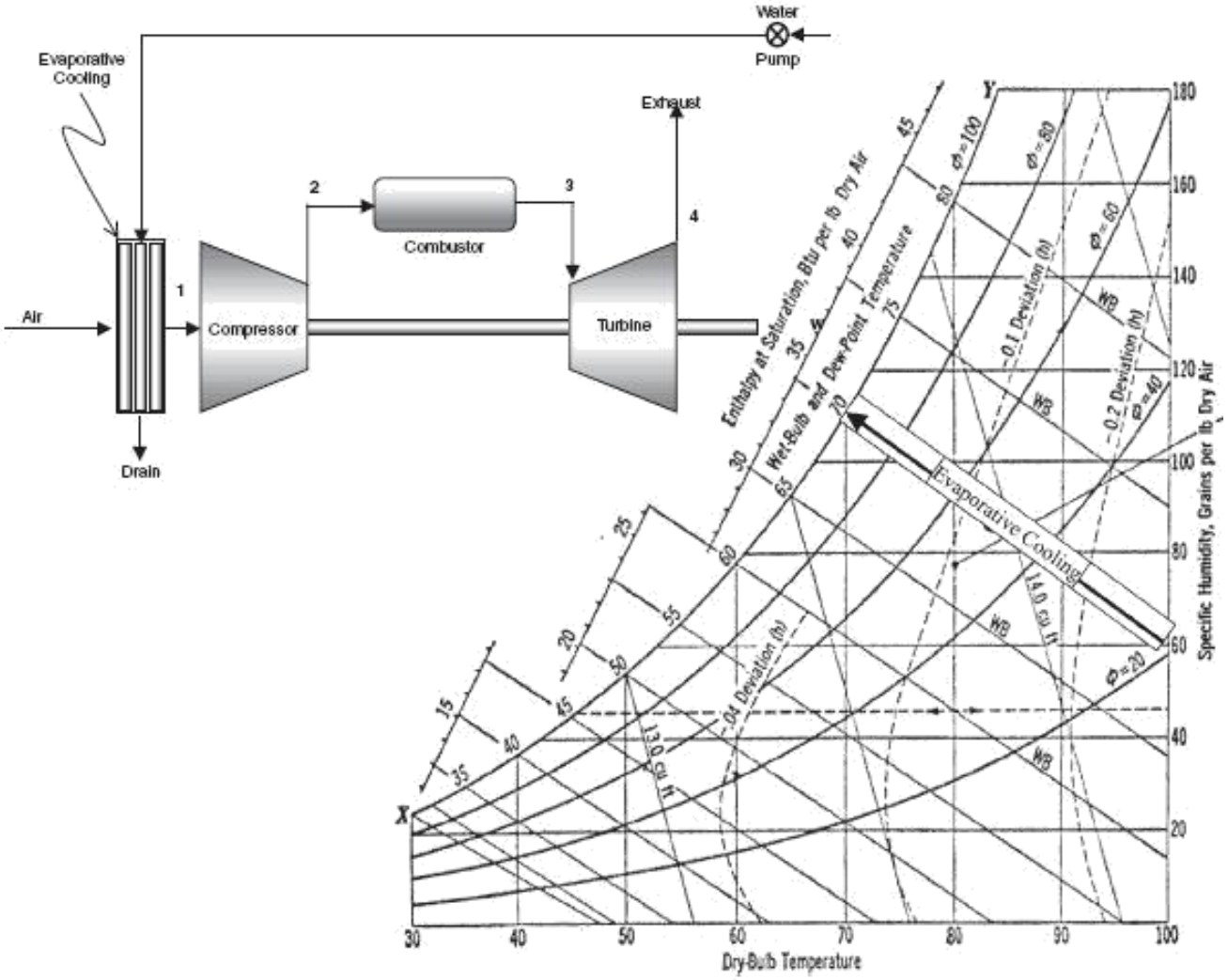
ملاحظة توضيحية : درجة حرارة الهواء الجوي ممكن قياسها بعديد من الدلائل وهي :

١ - درجة الحرارة الجافة Dry-bulb temperature (DBT) وهي درجة الحرارة المقاسة بواسطة ثرمومتر Thermometer يكون الانتفاخ (البصيلة Bulb) له جافا .

٢ - درجة الحرارة الرطبة Wet-bulb temperature (WBT) وهي أقل درجة للحرارة تقاس بواسطة ثرمومتر انتفاخه مبلل خفيفا بالماء ونتيجة لتبخر الماء من سطح انتفاخ اثرمومتر تنخفض درجة الحرارة وتكون دائما اقل من درجة الحرارة الجافة كنتيجة لتبخر الماء الذي يمتص الحرارة الرطبة لهواء مشبع ببخار الماء تكون مساوية تماما لدرجة الحرارة الجافة .

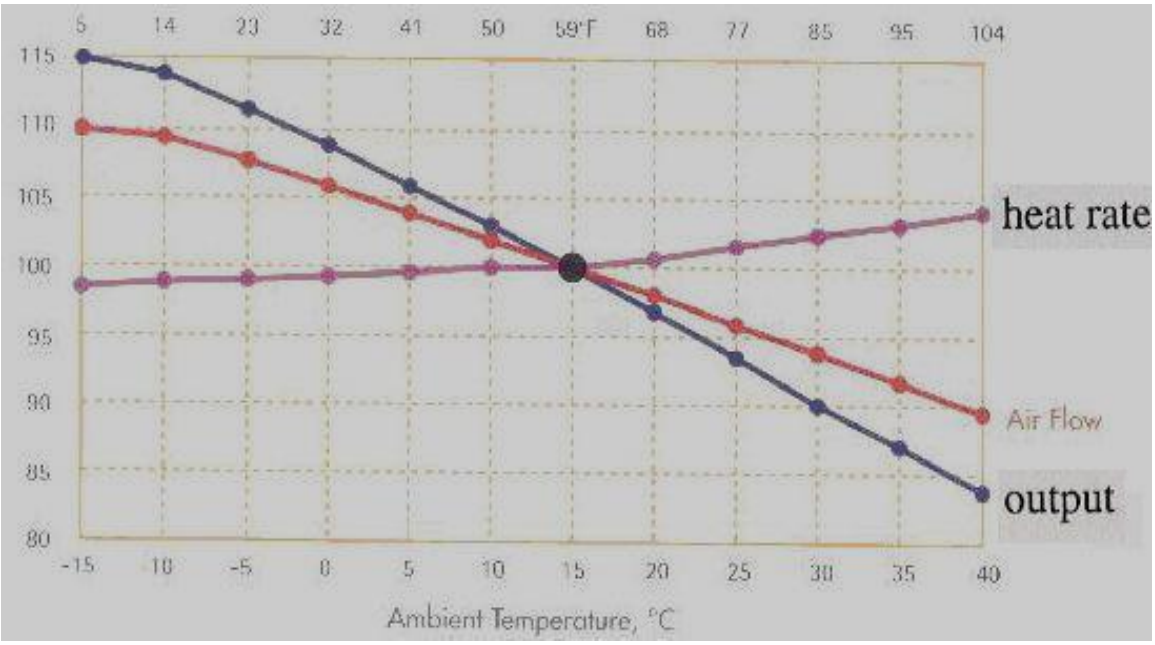
٣ – درجة حرارة نقطة الندى Dew point temperature (DPT) وهي درجة الحرارة التي يبدأ عندها بخار الماء الموجود في الهواء في التكثف . وتقاس بوضع ثرمومتر في إناء به ماء ويبرد الماء تدريجيا حتى يلاحظ تكثف جزئيات من الماء على سطح الإناء الخارجي .

WBT هي مقياس لمدى وجود بخار الماء Water vapour أو الرطوبة Moisture في الهواء و هي أقل درجة حرارة يمكن فيها تبريد أي مائع Fluid من خلال التبخر Evaporation .

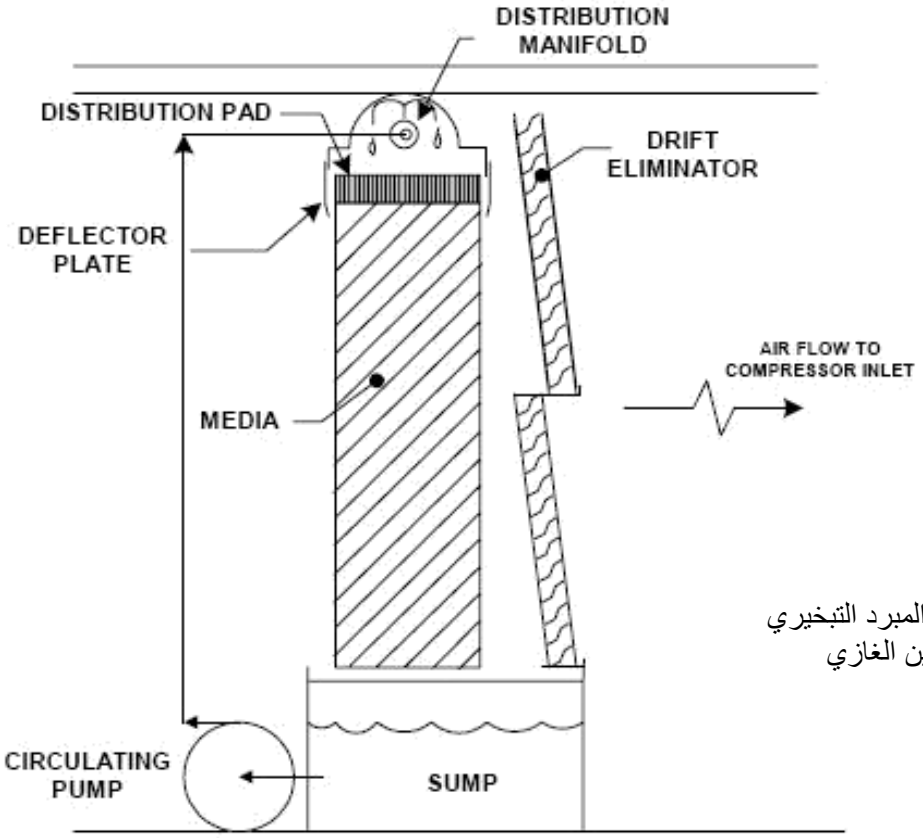


الشكل (١٦٦- ب) مفهوم التبريد التبخيري كما هو موضح في الخريطة السيكرومترية psychrometric chart

ملاحظة توضيحية : الخريطة السيكرومترية psychrometric chart هي رسم بياني يوضح المتغيرات الحرارية Thermodynamic parameters المختلفة للهواء الرطب Moist air (عند ضغط ثابت وهو الضغط الجوي وغالبا ما يساوي الإرتفاع بالنسبة لمستوى سطح البحر) مثل الرطوبة النسبية و درجة الحرارة البصيلة الجافة Dry-bulb temperature (DBT) و درجة حرارة البصيلة الرطبة Wet-bulb temperature (WBT) و درجة حرارة نقطة الندى Dew point temperature (DPT) والحجم النوعي Specific volume والرطوبة النسبية Relative humidity (RH) والإنثالبية النوعية Specific enthalpy. تستخدم الخريطة السيكرومترية في تطبيقات حسابات تكييف الهواء .

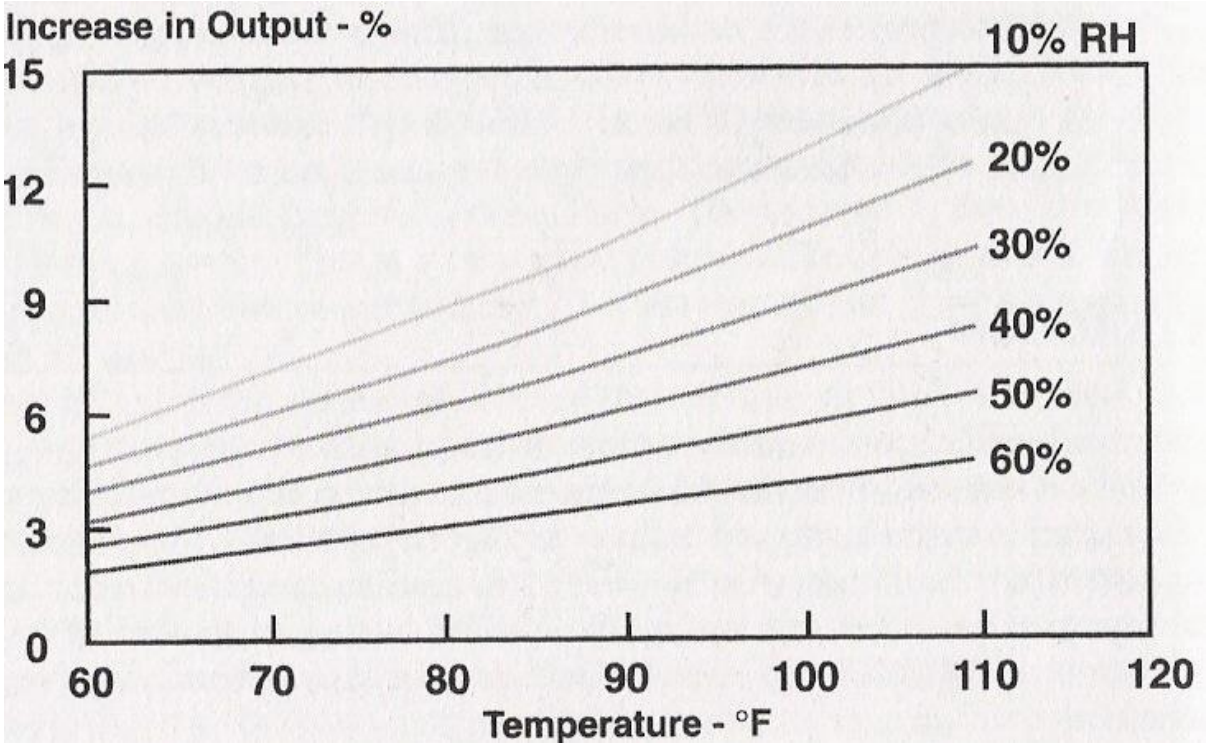


الشكل (١٦٦- ج) تأثير درجة الحرارة المحيطة Ambient temperature على
القدرة الناتجة Output power من التوربين الغازي



الشكل (١٦٧) قسم المبرد التبخيري
لمدخل ضاغط التوربين الغازي

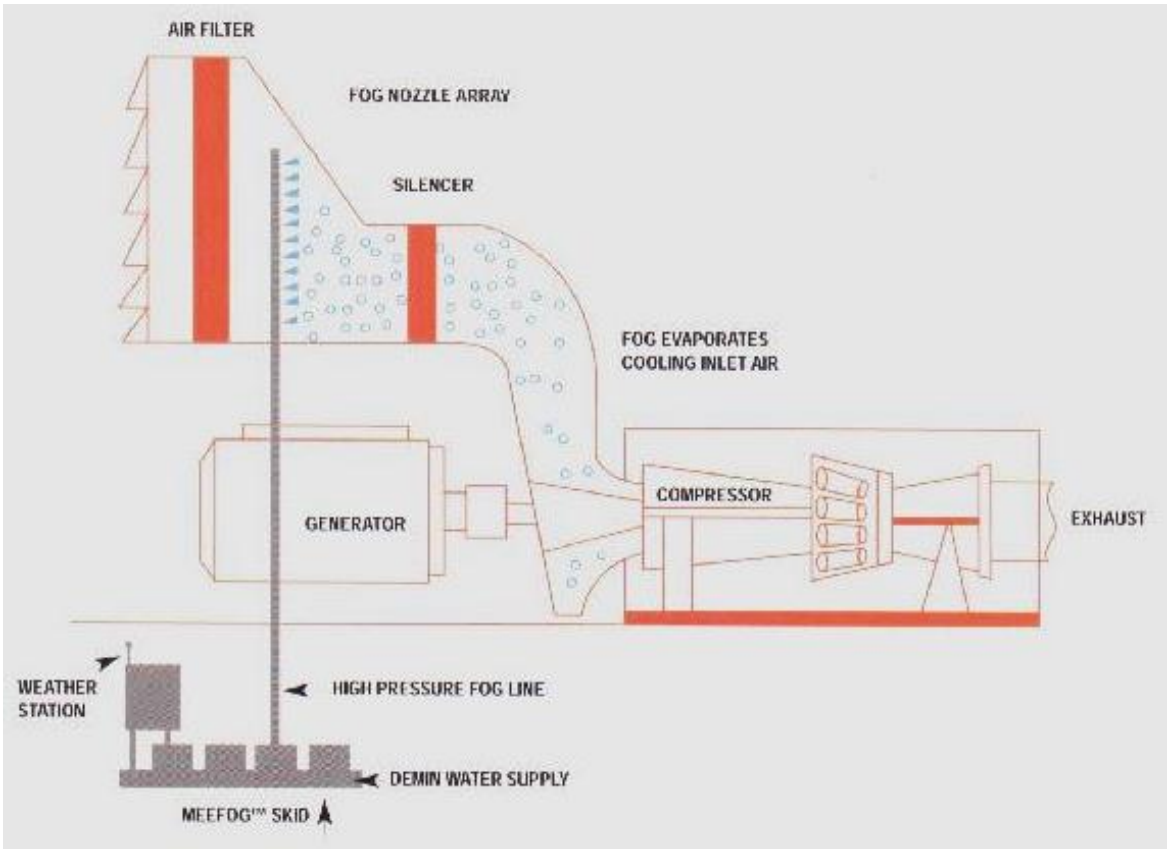
مزايا هذا النظام هي البساطة وانخفاض التكلفة مقارنة بنظام تبريد الماء Chilling water system ، والعيوب الرئيسية هي أن هذا النظام هو مناسب فقط للمناطق الحارة والجافة Hot & Dray regions (مع زيادة الرطوبة النسبية المحيطة Ambient relative humidity ، فإن كفاءة عملية التبريد التبخيري سوف تنخفض لأن درجة حرارة بصيلة الهواء الرطب Air wet bulb temperature سوف تقترب من درجة حرارة البصيلة الجافة Dry bulb temperature وبالتالي لا مزيد من الإنخفاض في درجة حرارة الهواء من خلال هذا المفهوم أي (التبريد التبخيري) .



الشكل (١٦٨) تأثير الرطوبة النسبية على زيادة حمل التوربين الغازي عند استخدام أنظمة التبريد أو التضبيب
Effect of Relative Humidity (RH) on increasing Gas turbine load when using evaporative cooling or fogging systems

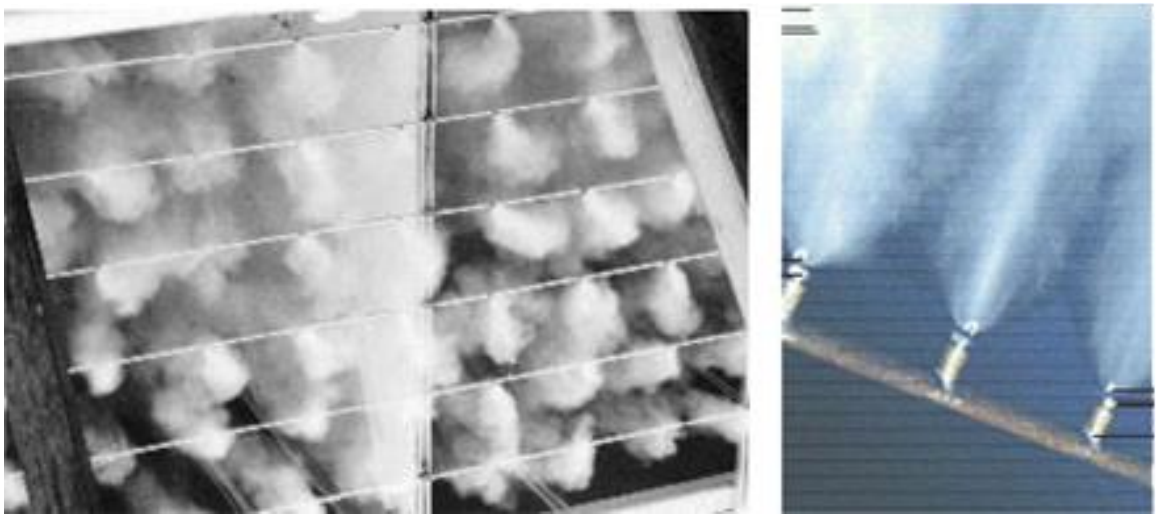
٧- نظام التضبيب (رش أو ترذيذ الماء بضغط عالي) :

في هذا النظام ، يتم تركيب سلسلة من فوهات رش المياه Water spray nozzles في بيت مرشحات (فلاتر) دخول الهواء Air intake filter house (بالطبع بعد عناصر الترشيح لتجنب إنسدادها نتيجة التكثيف Condensate) حيث عن طريق رش المياه في تيار التدفق الهوائي ، تنخفض درجة حرارة الهواء إلى درجة الحرارة الرطبة wet bulb temperature للهواء (مفهوم التبريد التبخيري Evaporative cooling concept) .



الشكل (١٦٩) منظومة التضبيب Fogging system

الميزة الرئيسية لهذا النظام هي :
١- زيادة الإنتاج بنسبة (٢٠٪) .
٢- يقلل من انبعاثات أكاسيد النيتروجين NOx حتى (٣٠٪) .



الشكل (١٧٠) ترتيب منظومة التضبيب مع الفوهات

٨ - منظومة تبريد المياه لتبريد هواء مدخل الضاغط (التبريد الميكانيكي) :

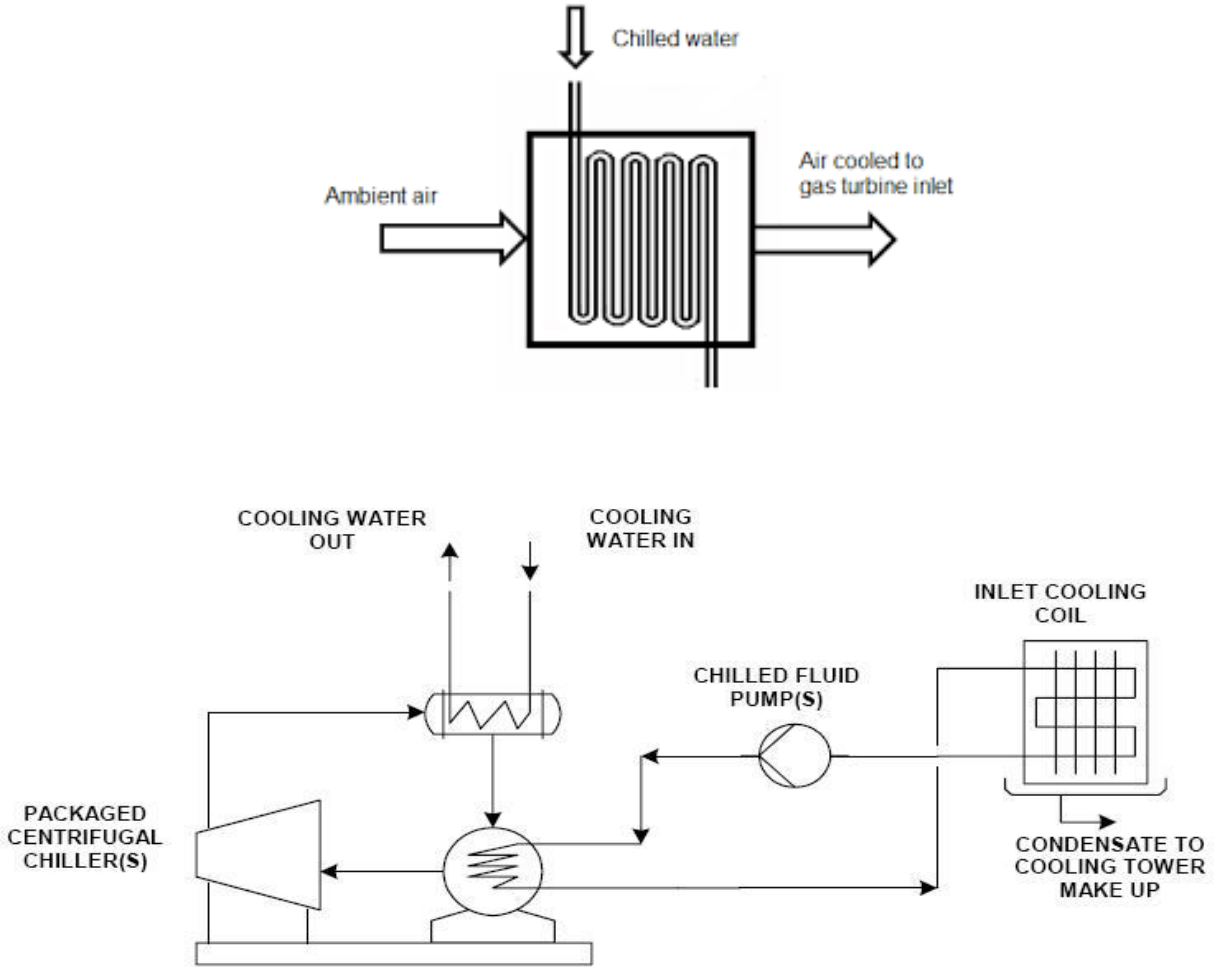
هذا النظام يكون مستقل عن تأثير حالة الطقس (تأثير الرطوبة Humidity effect) .

يدخل هواء مدخل الضاغط من خلال ملفات التبريد Cooling coils المثبتة في قسم المدخل أو المأخذ Intake house مع تدفق الماء البارد Chilled water داخل الأنابيب من مخرج المُبرد Chiller output . تكون مكثفات Condensers هذه المبردات إما مُبردة بالهواء Air cooled أو مُبردة بالماء Water cooled .

إن سعة Capacity مُبرد الطرد المركزي Centrifugal chiller المستخدم في تبريد هواء دخول التوربين الغازي يتراوح ما بين (١٥٠٠ إلى ٤٥٠٠ طن) (مما يتطلب طاقة كهربائية Electric power كبيرة جدا)

مثال :

توربين غازي بقدرة (١٨٥ ميكاواط) مع ظروف محيطة Ambient conditions (٤٠ درجة مئوية °C) درجة حرارة جافة و (٢٦ درجة مئوية) درجة حرارة رطبة والهواء المبرد عند (١٣ درجة مئوية) يحتاج إلى مبرد مياه سعة (٥٧٠٠ طن) تقريبا . والطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل هذا المبرد حوالي (٨,٦ ميكاواط) !



الشكل (١٧١) نظام التبريد الميكانيكي لتطبيقات تبريد مدخل ضاغط التوربين الغازي

Mechanical chilling system for gas turbine compressor inlet cooling application

العيوب الرئيسية لهذا النظام هو أرتفاع تكلفة التنصيب والتشغيل High installation & operation cost مقارنة بالطرق الأخرى .
سيؤدي تبريد تدفق مدخل الضاغط إلى زيادة القدرة الناتجة للتوربين ، وزيادة المدخلات الحرارية عن طريق الوقود وزيادة متطلبات شغل الضاغط ، لكن التعويض في الزيادة في قدرة وكفاءة التوربين الغازي .
يوجز الجدول التالي المزايا والعيوب الرئيسية لتقنيات تبريد مدخل الضاغط :

نوع المنظومة System type	التبريد التبخيري Evaporative cooling	التضبيب Fogging	التبريد الميكانيكي بالماء Mechanical chilling. Water cooling	التبريد الميكانيكي بالهواء Mechanical chilling. Air cooling
المزايا Advantages	١ - خطورة قليلة عند الرش الزائد Overspray	١ - يحقق درجة حرارة أقل من النظام اللوحي Pad system في معظم الحالات .	١ - يمكن أن يحقق درجات حرارة جافة منخفضة لدخول الهواء Low inlet air dry bulb temps بغض النظر عن الرطوبة النسبية Relative humidity RH (حوالي ٥٠ درجة فهرنهايت = ١٠ درجة مئوية C°)	١ - يمكن أن يحقق درجات حرارة جافة منخفضة لدخول الهواء بغض النظر عن الرطوبة النسبية (حوالي ٥٠ درجة فهرنهايت = ١٠ درجة مئوية) .
	٢ - النظام السلبي Passive system الأكثر ملاءمة للمناخات الرطبة Humid climates بالمقارنة مع التضبيب .	٢ - تتطلب مساحة صغيرة لمنصة المضخة Pump skid	٢ - يتم يتوفيره كحزمة واحدة (منصة إنزلاق) Package (skid) بدون ملفات الهواء الداخل Inlet air coils وأنابيب الربط Interconnect piping	٢ - يتم يتوفيره كحزمة واحدة (منصة إنزلاق) بدون ملفات الهواء الداخل وأنابيب الربط .
	٣ - عادة ما تكون قادرة على إستخدام مياه الموقع Site water وليس مياه مُعالجة Demin water (خالية من الأملاح والمعادن) .	٣ - تسمح المضخات المدارة (المتحكم فيها) Staged (controlled) pumps بتوفير الطاقة Energy savings خلال الظروف المحيطة Ambient المختلفة conditions	٣ - يمكن أن تستخدم مصدر مياه تبريد المحطة Plant cooling water source إذا كانت متوفرة .	٣ - لا يتطلب مصدر مياه تبريد خارجي
	٤ - التحكم الإلكتروني Electronic control غير ضروري للتشغيل .	٤ - يمكن إستخدامها للتحكم في الحمل Load control عند بعض الحالات .	٤ - يمكن تحقيق معدلات الطاقة دون الذروة Off peak مع تخزين الطاقة الحرارية Thermal Energy Storage (TES) .	٤ - يمكن تحقيق معدلات الطاقة دون الذروة مع تخزين الطاقة الحرارية .
	٥ - تكون مادة قناة الدخول - Inlet duct material قياسية Standard إذا لم تكن تشتمل على ماء مُعالج .	٥ - لا فقدان ضغوط إضافية Added pressure loss عند عدم الاستخدام .		
		٦ - الحاجة إلى مساحة قنوات Duct space أقل بالمقارنة مع نظام التبريد التبخيري والتبريد الميكانيكي .		

١ - تتطلب مساحة كبيرة كبيرة لحزمة المعدة او المنظومة .	١ - تتطلب مساحة كبيرة لحزمة المعدة او المنظومة Equipment package .	١ - فعالية محدودة حيثما تكون الظروف المحيطة حارة ورطبة .	١ - فعالية محدودة Limited effectiveness حيثما تكون الظروف المحيطة حارة ورطبة Humid .	العيوب Disadvantages
٢ - خسائر طفيلية أكبر مما في أنظمة التبخير .	٢ - خسائر طفيلية Parasitic losses أكبر مما في أنظمة التبخير .	٢ - يتطلب إستخدام مواد كفؤة للمياه المُعالجة Demin water material upgrade مثل الفولاذ المقاوم للصدأ Stainless steel أو الطلاء الخاص Special coatings لمكونات قنوات التدفق .	٢ - عادة عملية التشغيل يدوية Manual operation (ذاتي \ تشغيل \ إيقاف Auto/on/off) تتطلب إنتباه المُشغل Operator	
٣- يتطلب مساحة جبهة أو واجهة أكبر (أقل سرعة) عبر ملف التبريد مما في الأنظمة التبخيرية مما يتطلب بيت فلاتر أو مرشحات أكبر	٣ - يتطلب مساحة جبهة أو واجهة face area أكبر (أقل سرعة Less velocity) عبر ملف التبريد Chilling coil مما في الأنظمة التبخيرية مما يتطلب بيت فلاتر أو مرشحات Filter house أكبر .	٣ - يمكن أن يكون للقطيرات غير المتبخرة Non-vaporized droplets تأثير جلخ أو كشط Abrasive effect على ريش الضاغط Compressor blades .	٣ – زيادة أقل في القدرة Power مقارنة بالتبريد الميكانيكي .	
٤ - تحقيق هبوط ضغط إضافي (إنخفاض الطاقة) حتى عندما لا تكون قيد الأستعمال .	٤ - تحقيق هبوط ضغط إضافي (إنخفاض الطاقة) حتى عندما لا تكون قيد الأستعمال	٤ - يتطلب الأخذ بنظر الإعتبار وجود مجمع تصريف Inlet manifold drain .	٤ - تحقيق هبوط ضغط إضافي Added pressure drop (إنخفاض الطاقة) حتى عندما لا تكون قيد الأستعمال .	

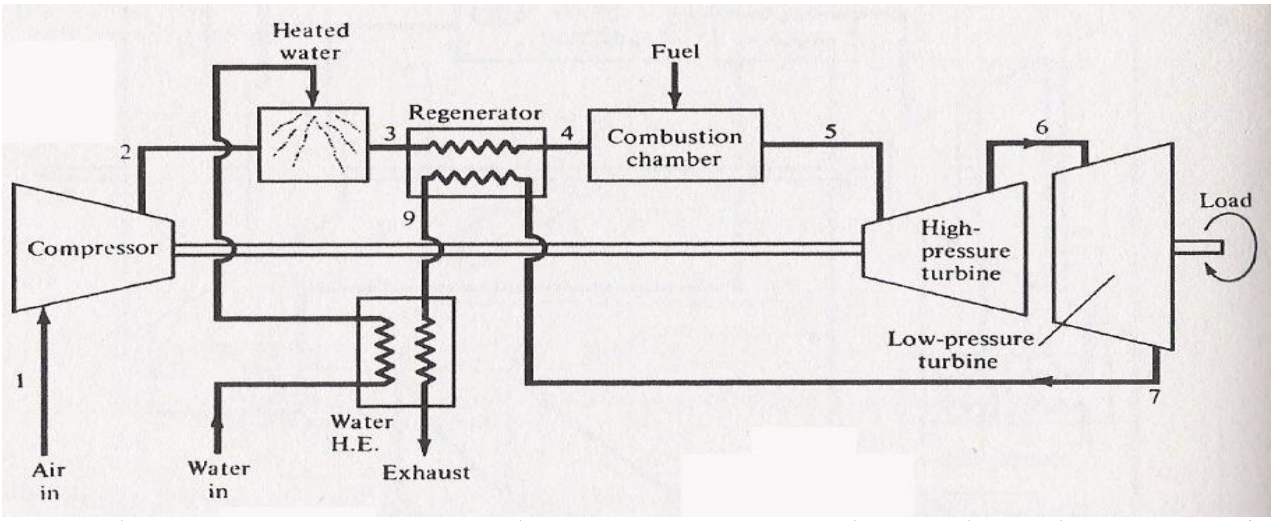
ملاحظة توضيحية : يشير تخزين الطاقة الحرارية Thermal energy storage (TES) إلى التقنية Technology التي تسمح بنقل وتخزين الطاقة الحرارية أو ، بدلا من ذلك ، الطاقة من الجليد أو الهواء البارد أو الماء . بنيت هذه الطريقة في التقنيات الجديدة التي تُكمل حلول الطاقة مثل الطاقة الشمسية والمائية Solar and hydro .

بعض طرق تخزين الطاقة الحرارية تسمح للاستخدام اليومي ، على سبيل المثال ، إستخدام الطاقة في ساعات الليل Nighttime energy خارج أوقات الذروة Off-peak لإنشاء التخزين الساخن أو البارد الذي يستخدم لمنظومات القدرة على مدار اليوم . الأنظمة الأخرى طويلة المدى Long-term ، مثل الأنظمة التي تخزن الطاقة الشمسية في الصيف لاستخدامها في الشتاء .

إن الفكرة وراء (TES) هي تغيير الطريقة التي يولد بها المستخدمون المقدار الهائل من قدرة التدفئة والتبريد Heating and Cooling Capacity التي تستهلك الكثير من الطاقة التقليدية Conventional energy من الشبكة Grid . تكمن المشكلة في أن الكثير من طاقة الشبكة الكهربائية المستخدمة في أعمال التدفئة والتبريد يتم توليدها بواسطة الطاقة من الوقود الأحفوري Fossil fuels مثل الفحم Coal والنفط Oil والغاز الطبيعي Natural gas . يمكن معالجة ذلك باستخدام TES ، التي يمكن أن توفر حلول التدفئة والتبريد بمجرد موازنة الحرارة الموزعة في دورة الطبيعة ، على سبيل المثال ، من خلال تطبيق الحرارة المخزنة في مجمعات الطاقة الشمسية Solar collectors أو عن طريق توزيع الماء البارد أو الهواء من باطن الأرض Underground لتبريد فضاء البناء. يعمل العلماء والمهندسون جاهدين على إيجاد حلول جديدة لتخزين الطاقة الحرارية لاستبدال أنظمة التكييف Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) التي تعمل بالوقود الأحفوري .

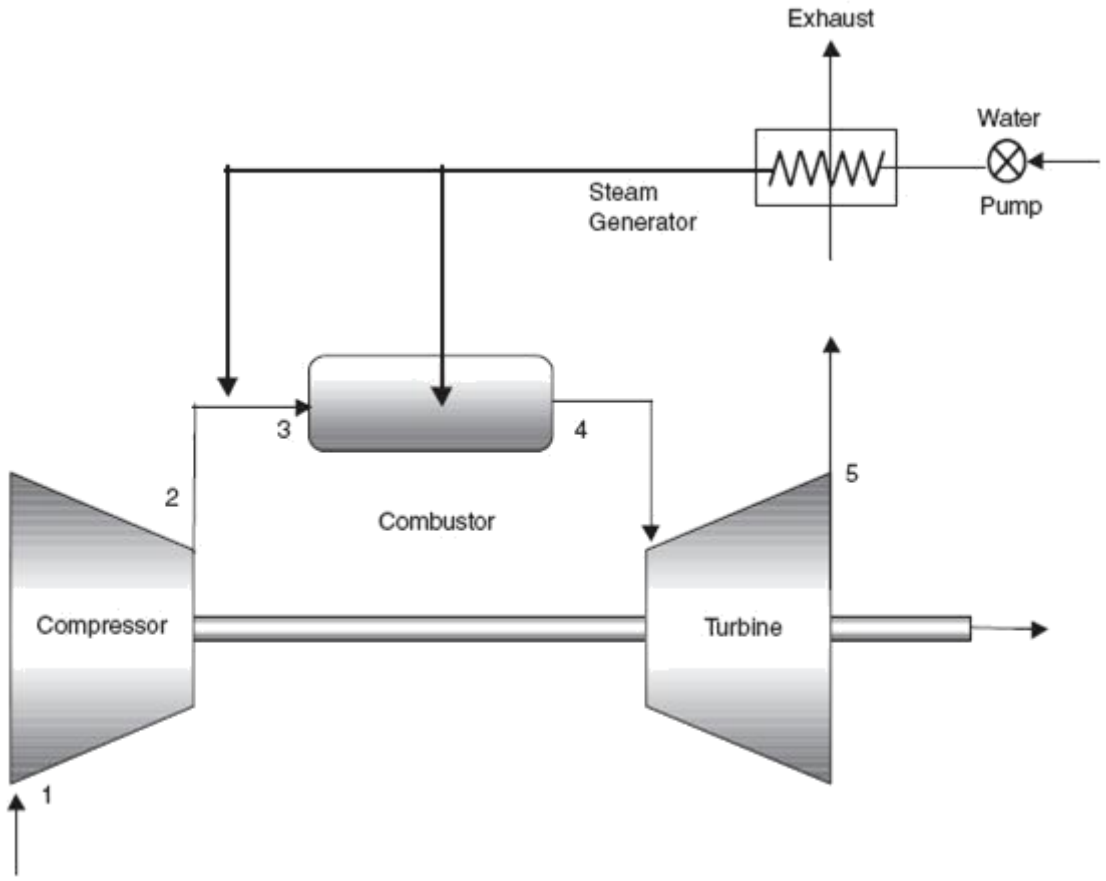
٩- حقن الماء أو البخار :

يتم حقن المياه إما في مراحل الضاغط Compressor stages أو تصريف أو مخرج الضاغط Compressor discharge أو مباشرة في الحارق (المشعل) Burner .
في هذا الأسلوب ، يتم حقن الماء في الضاغط ويتبخر عندما ترتفع درجة حرارة الهواء خلال عملية الإنضغاط ، والحرارة الكامنة للتبخير Latent heat of vaporization المكتسبة من الهواء ستقلل درجة حرارته وينتج عنه تقليل في شغل الضاغط (تماما مثل عمليات التبريد البيني التي تم وصفها مسبقا) .
يتم إستخدام حقن المياه في بعض محركات الطائرات Aircraft engines لتحسين كفاءة المحرك . على أرتفاع عالٍ ، تنخفض كثافة الهواء Air density وبالتالي سوف تقل قوة دفع المحرك Engine thrust . هذه الطريقة تكون فعالة إذا إستخدمت على أرتفاعات عالية و (أو) عند درجة حرارة المحيط العالية . ولتحسين قوة الدفع ، يتم رش خليط من الماء والميثانول Methanol أو الماء فقط في مدخل الضاغط أو حقنه في غرف الإحتراق Combustion chambers ، بالإضافة إلى ذلك فإن الميثانول يتميز بخصائص مضادة للإنجماد .
يمكن إستخدام هذة الزيادة الناتجة في قوة الدفع لزيادة سرعة الطائرة أو لتعزيز الإقلاع .
عندما يتم إستخدام حقن المياه مع التجديد ، يمكن تحقيق المزيد من التحسن لكفاءة الدورة Cycle efficiency .
تدفق المياه يدخل الحاقن Injector بالقدر الذي يجعل الهواء المضغوط مشبعا Saturated ، (أي الرطوبة النسبية Relative Humidity = ١٠٠٪) ، والمزيد من الحقن للمياه يؤدي إلى تدفق السائل مع الهواء المضغوط ، وعلى الرغم من أن هذا السائل سيزيد من شغل التوربين Turbine work ولكنه سيؤثر على التوربين أكثر من الهواء المشبع بسبب فرق (إختلاف) درجة الحرارة الموضعية والإجهادات الحرارية Thermal stresses المرتبطة بها .
يعود سبب الزيادة في شغل التوربين الناتجة عن حقن الماء إلى الزيادة في إجمالي التدفق الكتلي mass flow الذي يدخل التوربين (الغازات الساخنة Hot gases + بخار الماء Water vapor) ، مع زيادة مقابلة في شغل الضاغط . لاحظ أن التدفق الكتلي للماء لا يدخل الضاغط في هذه الحالة ، (البخار له حرارة نوعية Cp Specific heat أعلى من الهواء ، بمرتين تقريبا).
ملاحظة توضيحية : Specific heat الحرارة النوعية هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة (١ غرام) من المادة درجة مئوية واحدة ، ووحدة قياسها هي : جول / (كغم . ْم) Joule / Kg.°C . الرمز (Cp) يعني الحرارة النوعية عند ضغط ثابت .



الشكل (١٧٢) دورة التوربين الغازي مع التجديد Regeneration وحقن المياه Water injection في تصريف الضاغط

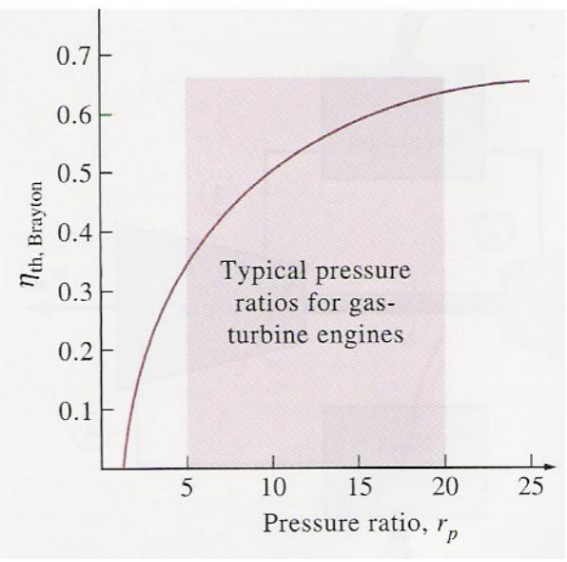
المزايا الرئيسية لهذه الطريقة هي زيادة الكفاءة الميتالورولوجية (المعدنية) للتوربين والقدرة الناتجة عنه .
لكل (١٪) من وزن البخار يضاف إلى الهواء (لنفترض ١٠٠٪ من حيث الوزن في تدفق الضاغط المحوري axial compressor) ، سوف تزداد قدرة التوربين بنسبة (٣,٥٪) مع زيادة (١,٦٪) فقط في تدفق الوقود . لاحظ أن (١ ٪) من البخار المحقون يحتوي على مستوى طاقة أعلى من الهواء . إضافة إلى أن الحرارة النوعية للبخار تساوي تقريبا ضعفها للهواء .
وجد أن حقن الماء سوف يقلل من تكوين أكاسيد النيتروجين NOx في التوربين الغازي إلى النصف .
تُحدد كمية البخار أو الماء المحقون إلى حوالي (١٢٪) ، وهذه الكمية ستزيد من انتاج الطاقة بنسبة (٢٥٪) .

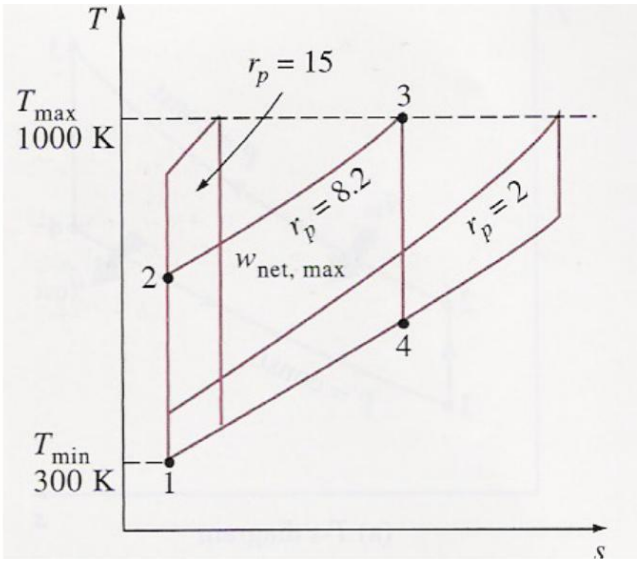


الشكل (١٧٣) التوربين الغازي مع حقن البخار Steam injection

١٠- زيادة نسبة الإنضغاط (rp) :

مع زيادة نسبة الإنضغاط ، تزداد كفاءة التوربين الغازي .
زيادة نسبة الإنضغاط (حجم مراحل الضاغط Compressor size-stages) أثناء تحديد و تثبيت مدخل التوربين (معدل إشتعال الوقود المغذي Firing rate بوحدات الحجم أو الحرارة أو الوزن \ الوقت) سوف يؤدي إلى زيادة قدرة التوربين ، والوصول إلى الحد الأقصى وبعد ذلك سوف تنخفض ، أنظر إلى الشكل التالي .

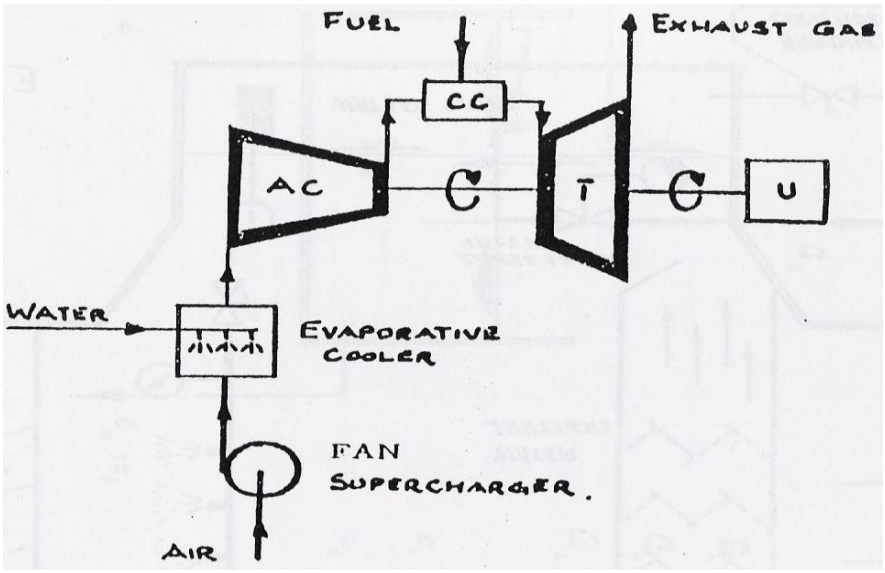




الشكل (١٧٤) تأثير نسبة الإنضغاط على شغل التوربين الغازي وكفاءة الدورة

١١- الشحن الزائد أو الفائق (التغذية الإضافية) Supercharging :

في هذا النظام يتم تركيب مروحة كبيرة Large fan أعلى التيار المتدفق عند مأخذ ضاغط التوربين الغازي لزيادة ضغط السحب Intake pressure . ستزداد القدرة الناتجة Output power بنسبة (٢٠٪) ولكن المروحة تتطلب (٤١١) من قدرة التوربين الغازي ، وبالتالي فإن الزيادة الصافية في القدرة الناتجة تبلغ (١٥٪) .
ونظرا للحرارة المتولدة من المروحة ، تكون طريقة الشحن الزائد Supercharging أكثر فعالية إذا تم استخدامها مع نظام التبريد التبخيري Evaporative cooling system .



الشكل (١٧٥) الشحن الزائد بالأشتراك مع التبريد التبخيري

١٢- دورة التوربين الغازي المشتركة أو المركبة Combined cycle gas turbine :

واحدة من أكثر الطرق نجاحا وإستخداما على نطاق واسع في هندسة محطات الطاقة Power plant engineering وهي إستعادة غازات العادم من التوربين الغازي في مرجل (مولد البخار) لإسترداد الحرارة Heat recovery steam generator (HRSG) ، وسيتم إستخدام البخار المتولد إما للتوربينات البخارية Steam turbines أو لعملية التسخين والتدفئة أو مجتمعة .

هناك طريقتان رئيسيتان لتصنيف الدورة المركبة هما :

أ – تصنيف يعتمد على معالم الدورة Cycle parameters :

١- عمود دوار أحادي Single shaft أو عمودان .

٢- ضغط أحادي أو ضغط مزدوج أو ضغط ثلاثي Single pressure or dual pressure or triple pressure

٣ - مع إشعال تكميلي (إضافي أومساعد) أو بدونه With Supplementary firing or without

٤ - مع مرجل مساعد أو بدونه With auxiliary boiler or without

ب – تصنيف يعتمد على العملية التي تتضمنها الدورة :

١ - دورة مركبة Combined cycle (يتم تغذية البخار الناتج من HRSG إلى التوربينات البخارية) .

٢- دورة التوليد المشترك للطاقة Cogeneration cycle [يتم تغذية البخار الناتج من HRSG إلى العمليات الحرارية (التسخين والتدفئة)] .

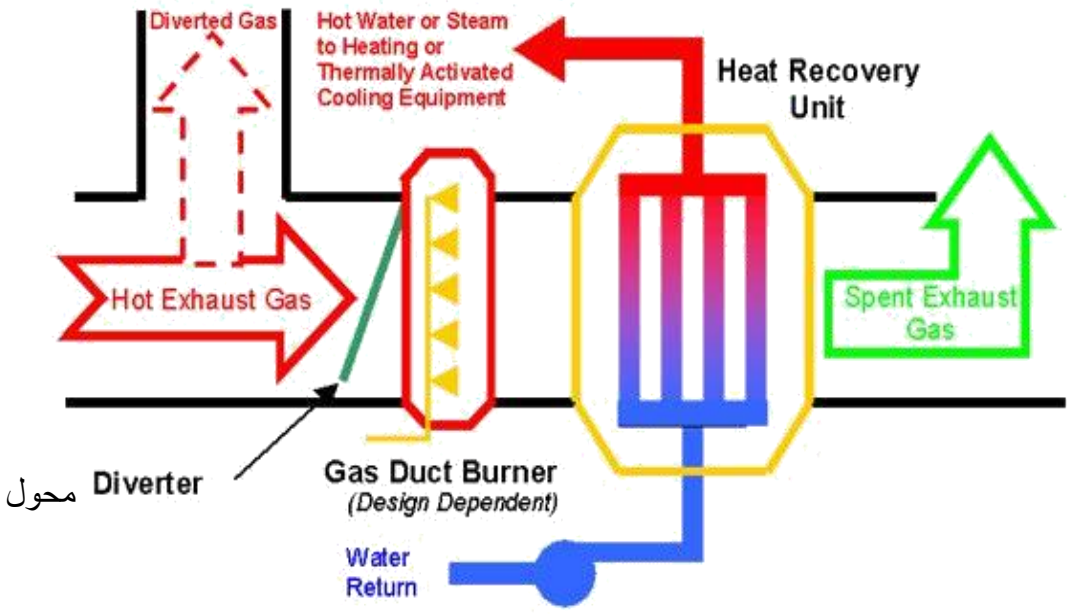
٣- المركبة - التوليد المشترك Combi - cogeneration (يتم تغذية البخار الناتج عن HRSG إلى التوربينات البخارية والعمليات الحرارية)

٤- دورة مركبة مع إشعال تكميلي (مساعد) (يتم إدخال الوقود بعد عادم التوربين بدون الحاجة إلى مراوح) .

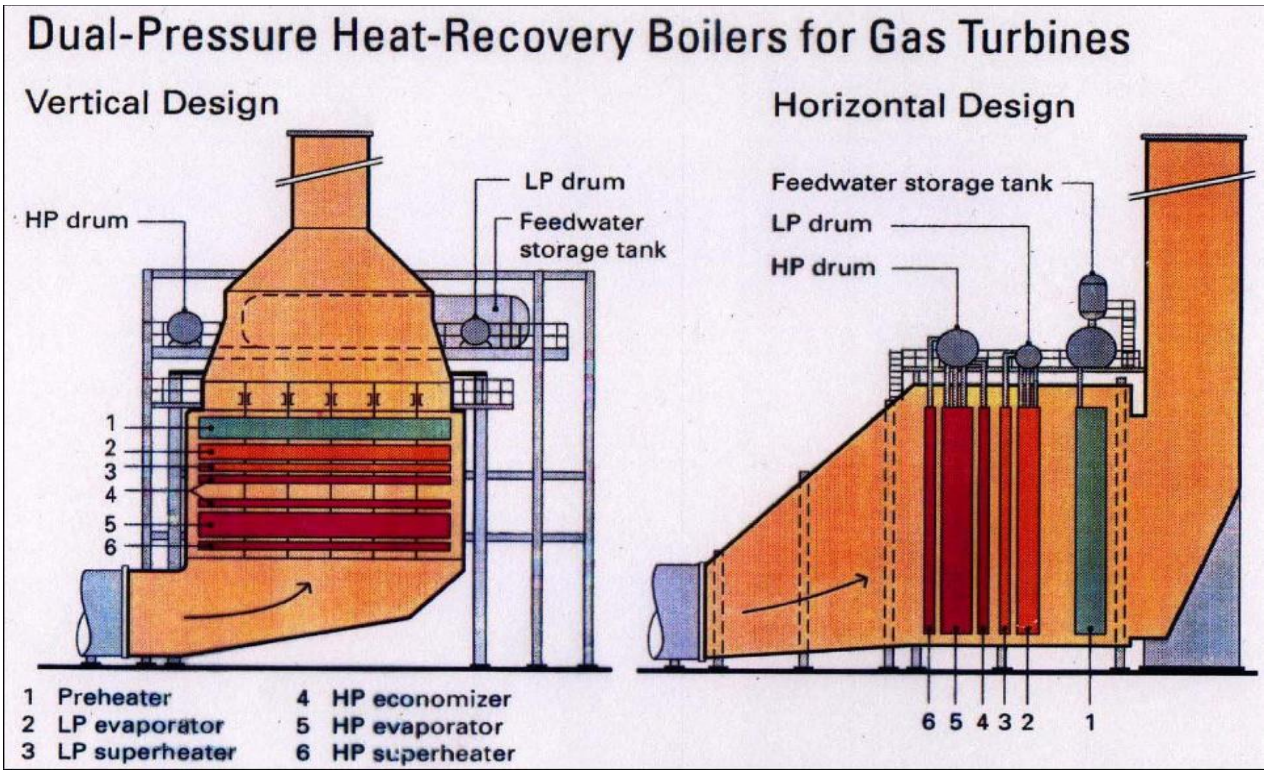
٥- دورة مركبة مع مشاعل مساعدة Auxiliary burners (يتم تحميص البخار الناتج من HRSG في مرجل مساعد) .

فيما يلي أشكال توضح أهم الأنواع الرئيسية لمراجل أسترجاع أو إسترداد الحرارة

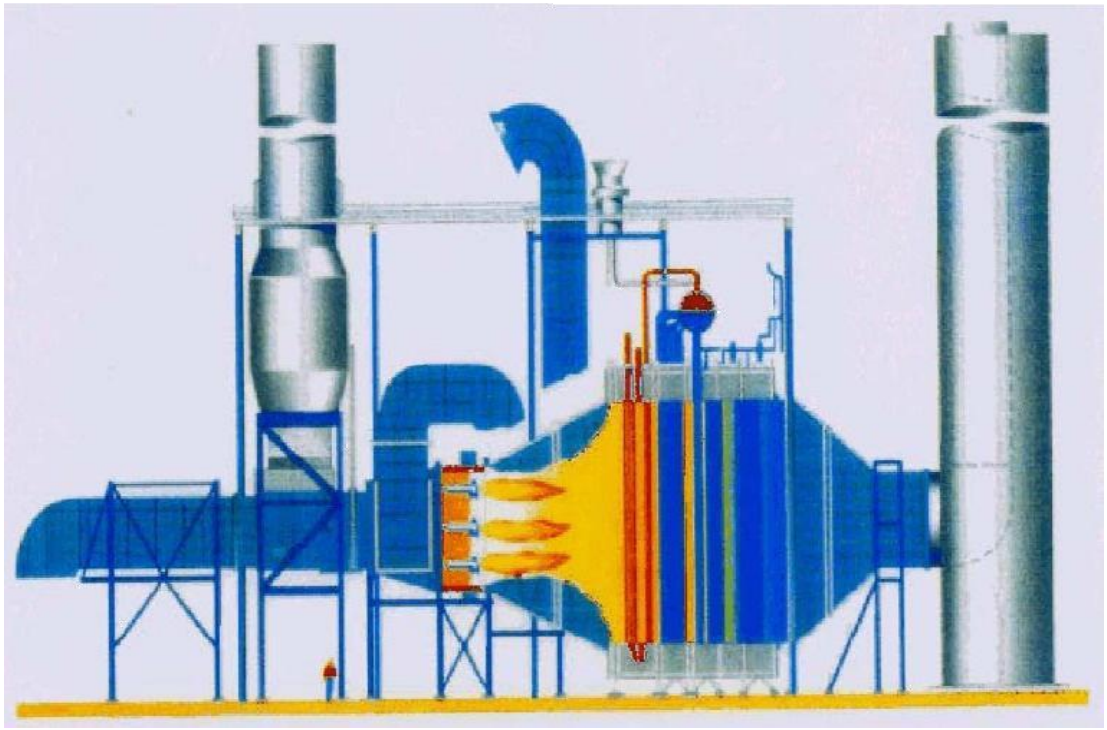
Main Configurations of heat recovery steam generator(HRSG)



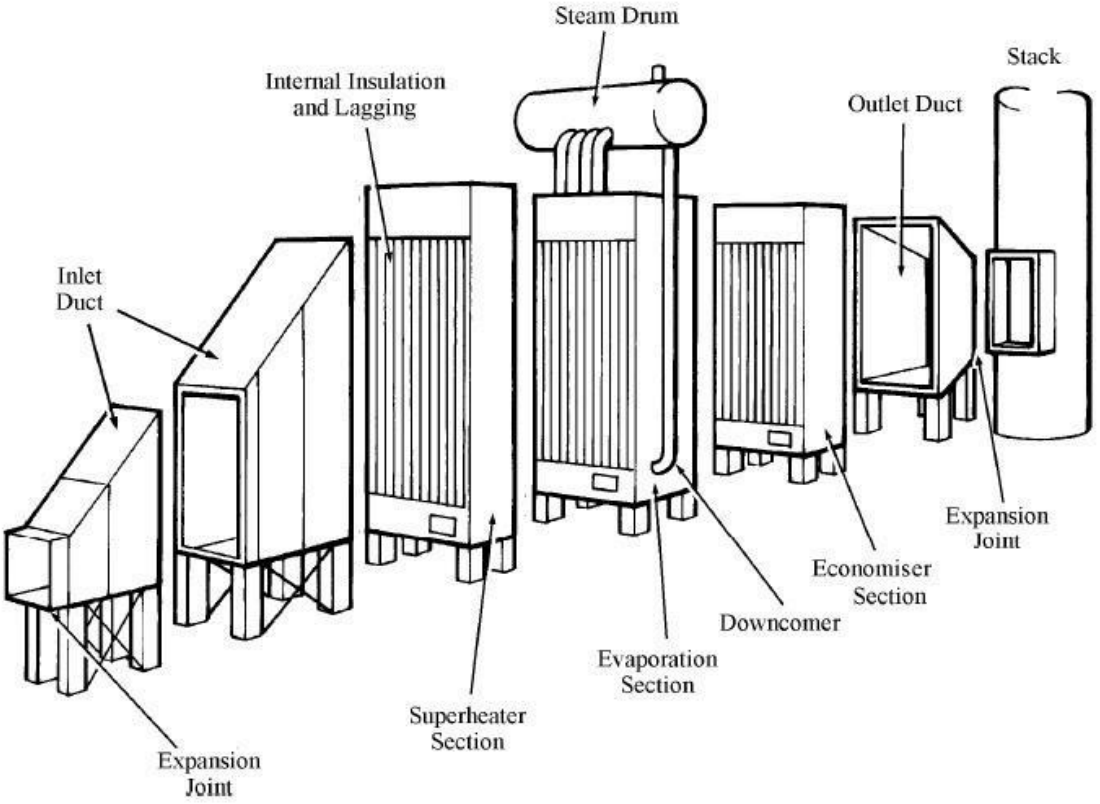
الشكل (١٧٦) مبدأ عمل HRSG



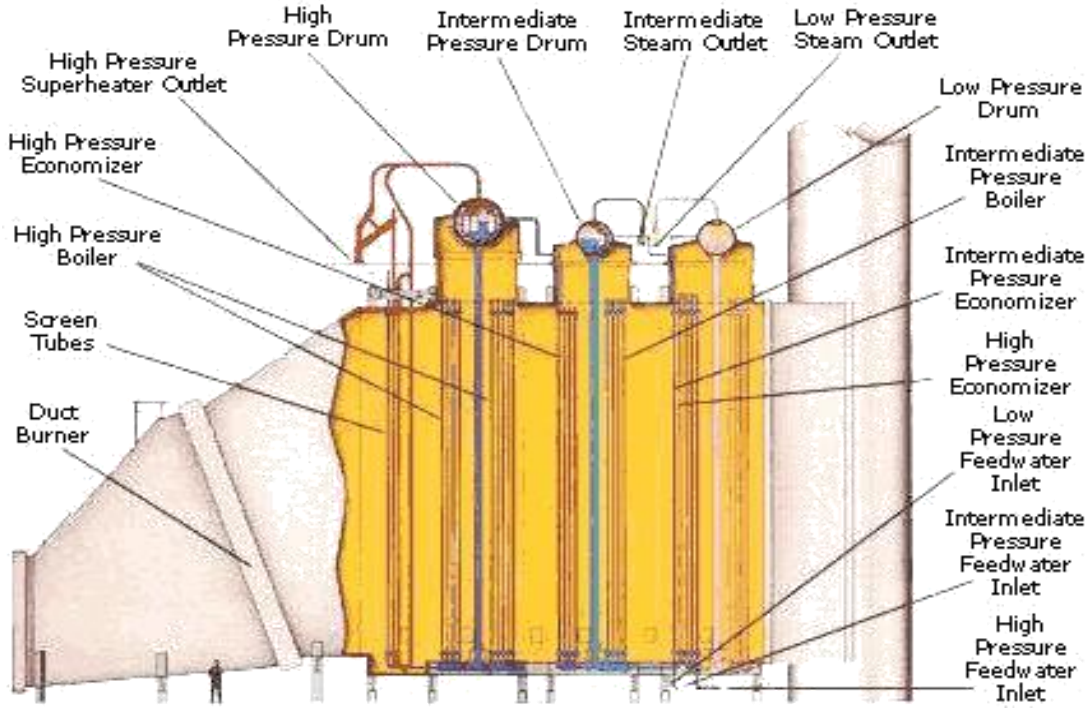
الشكل (١٧٧) أنواع HRSG



الشكل (١٧٨) HRSG مع الأشعال التكميلي supplementary firing

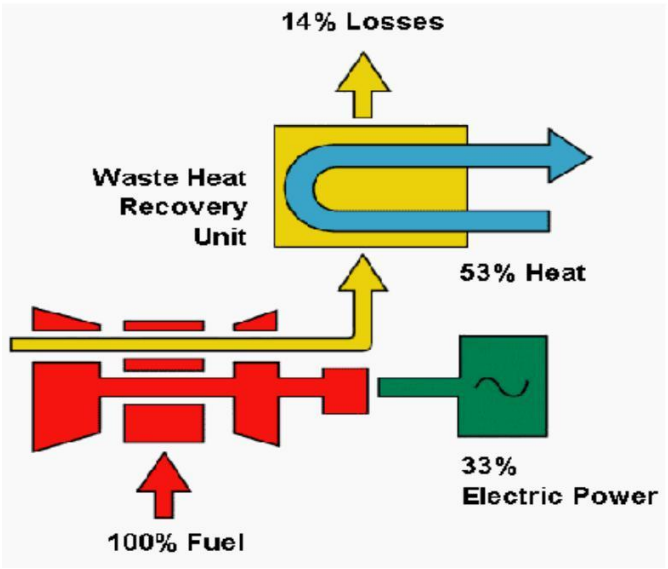


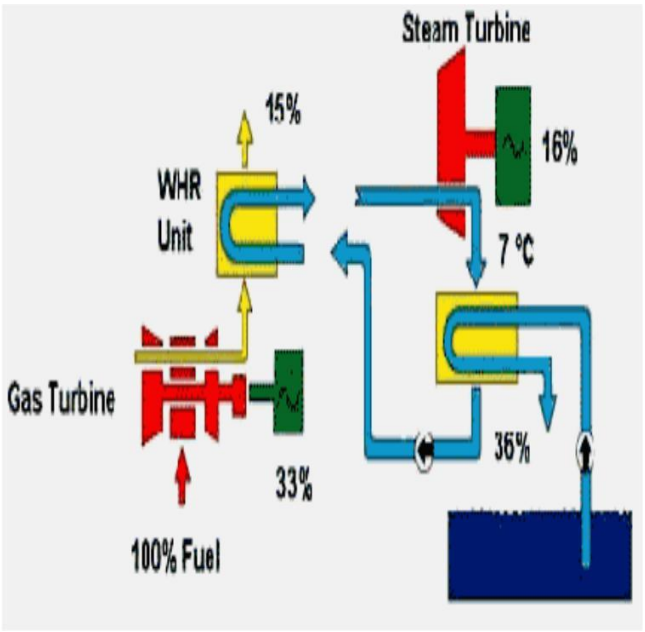
الشكل (١٧٩) الأجزاء الرئيسية ل (HRSG) (تصميم أفقي – ضغط أحادي)
Horizontal Configuration - single pressure



الشكل (١٨٠) الأجزاء الرئيسية ل (HRSG) (تصميم أفقي – ضغط ثلاثي)
Horizontal Configuration – Triple pressure

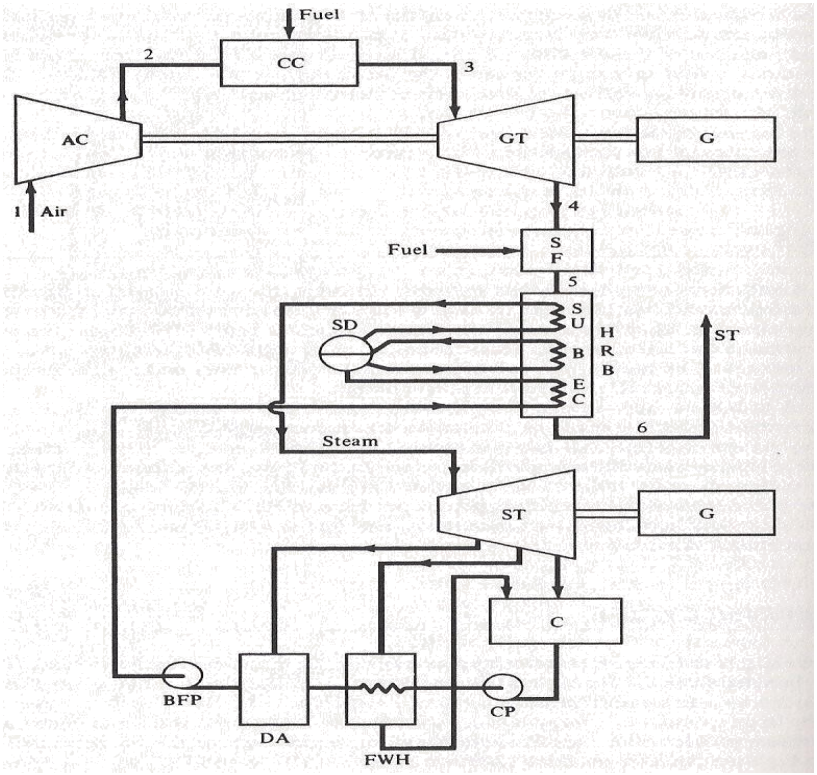
تلخص الأشكال التالية بعض تكوينات الدورة المركبة :



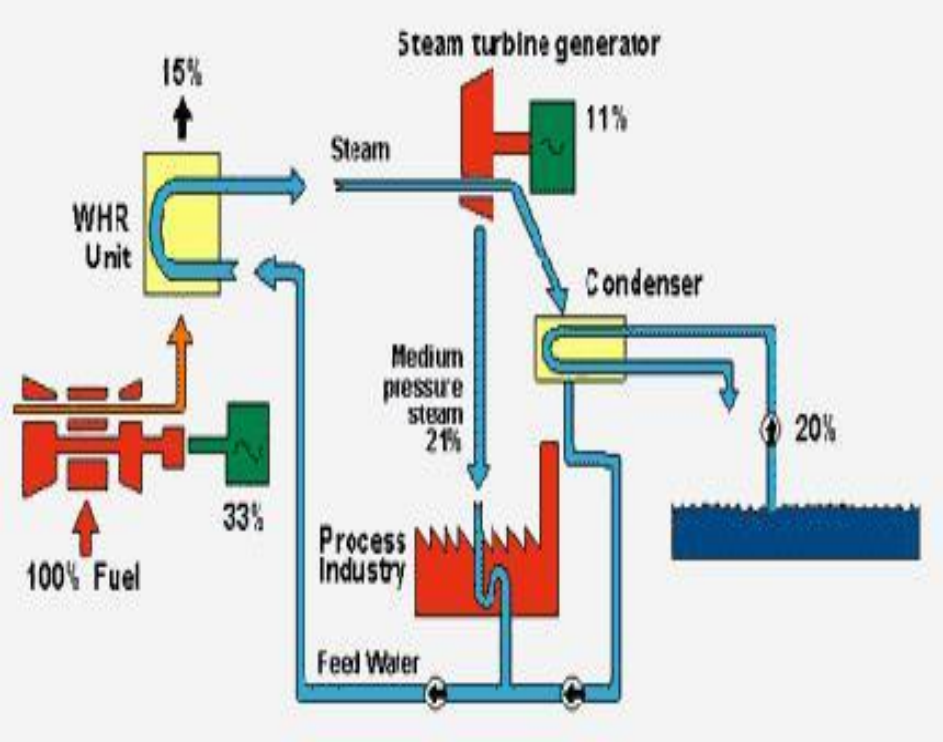


الشكل (١٨١) الدورة المركبة Combined cycle

الشكل (١٨٢) دورة التوليد المشترك Cogeneration cycle

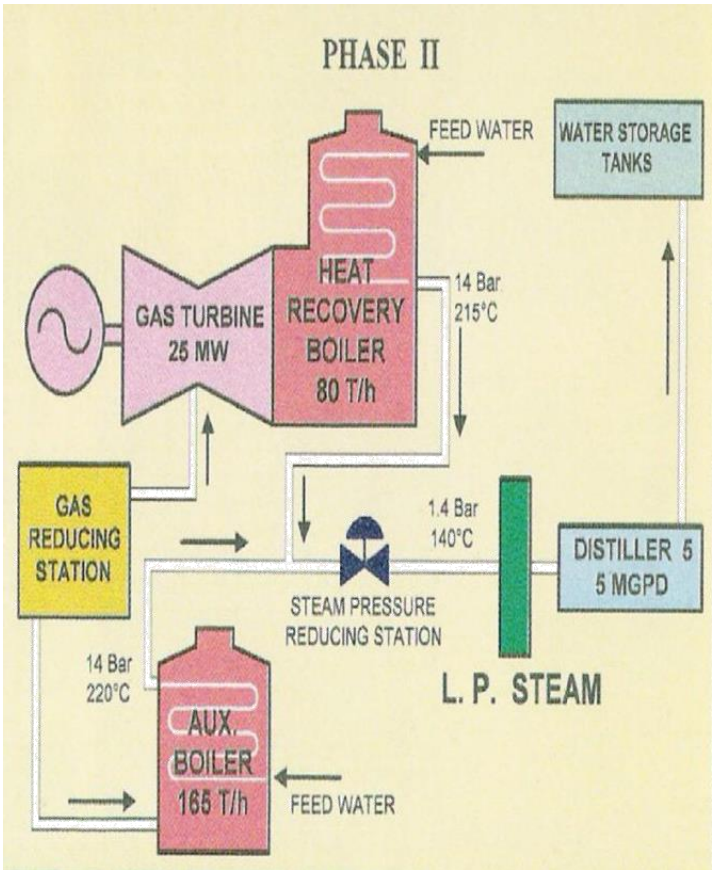


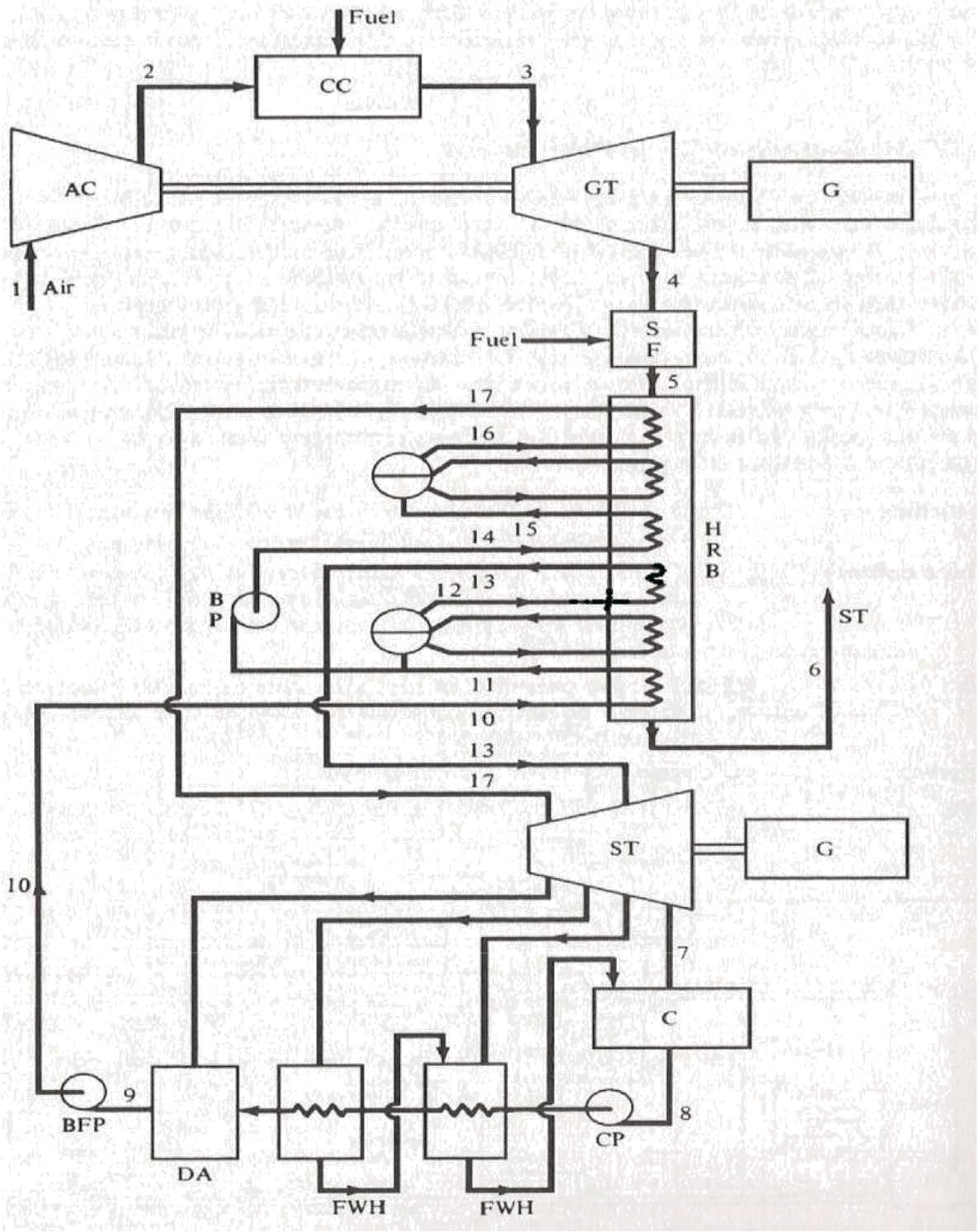
الشكل (١٨٣) دورة مركبة (ضغط أحادي مع الأشعال التكميلي أو المساعد)



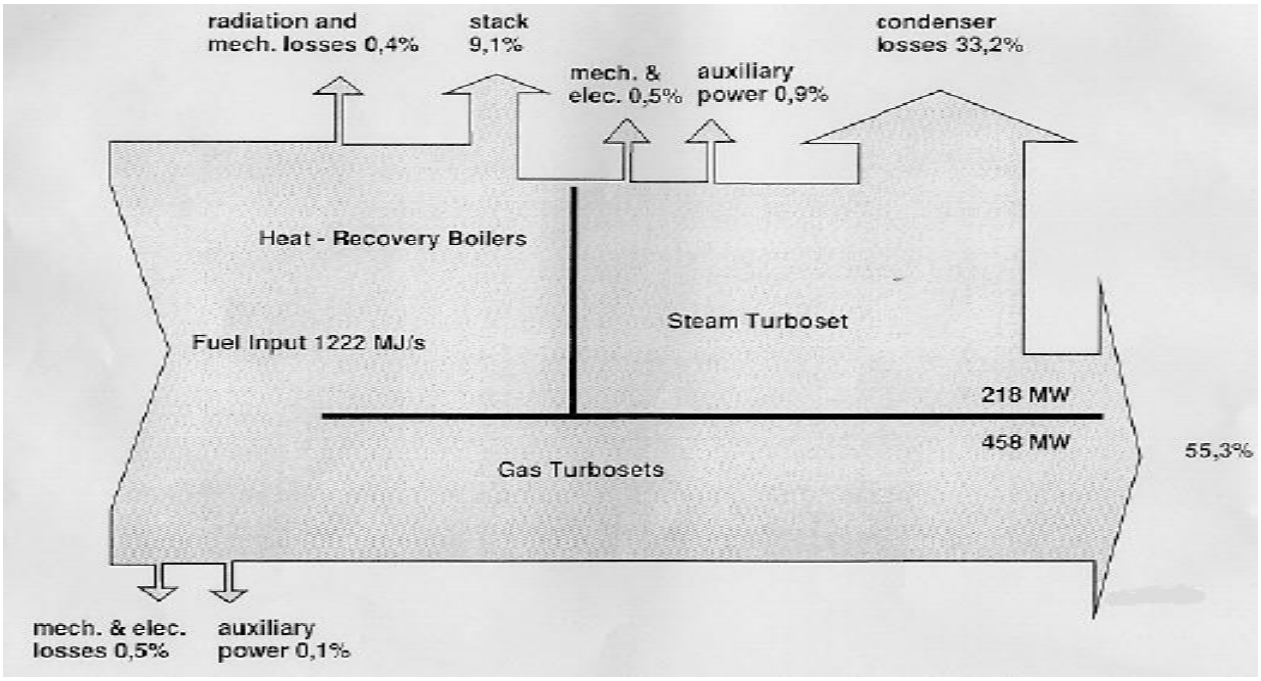
الشكل (١٨٤) الدورة المركبة – التوليد المشترك Combi-cogeneration cycle

الشكل (١٨٥)
دورة التوليد
المشترك مع مرجل
مساعد

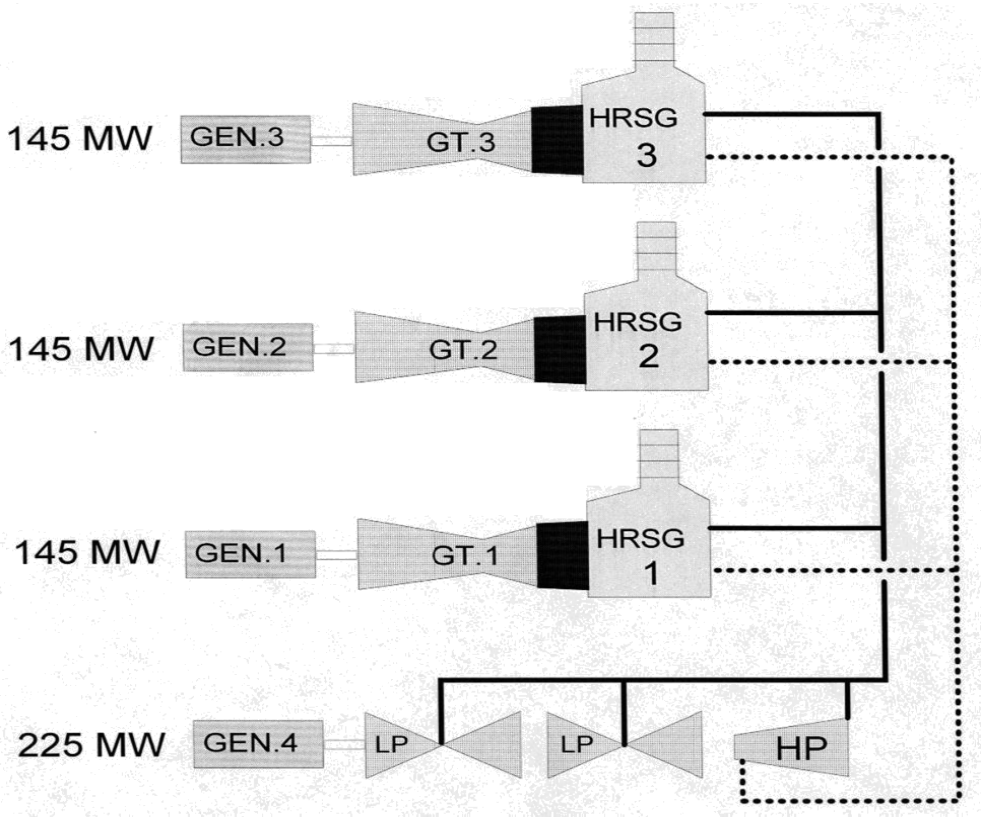




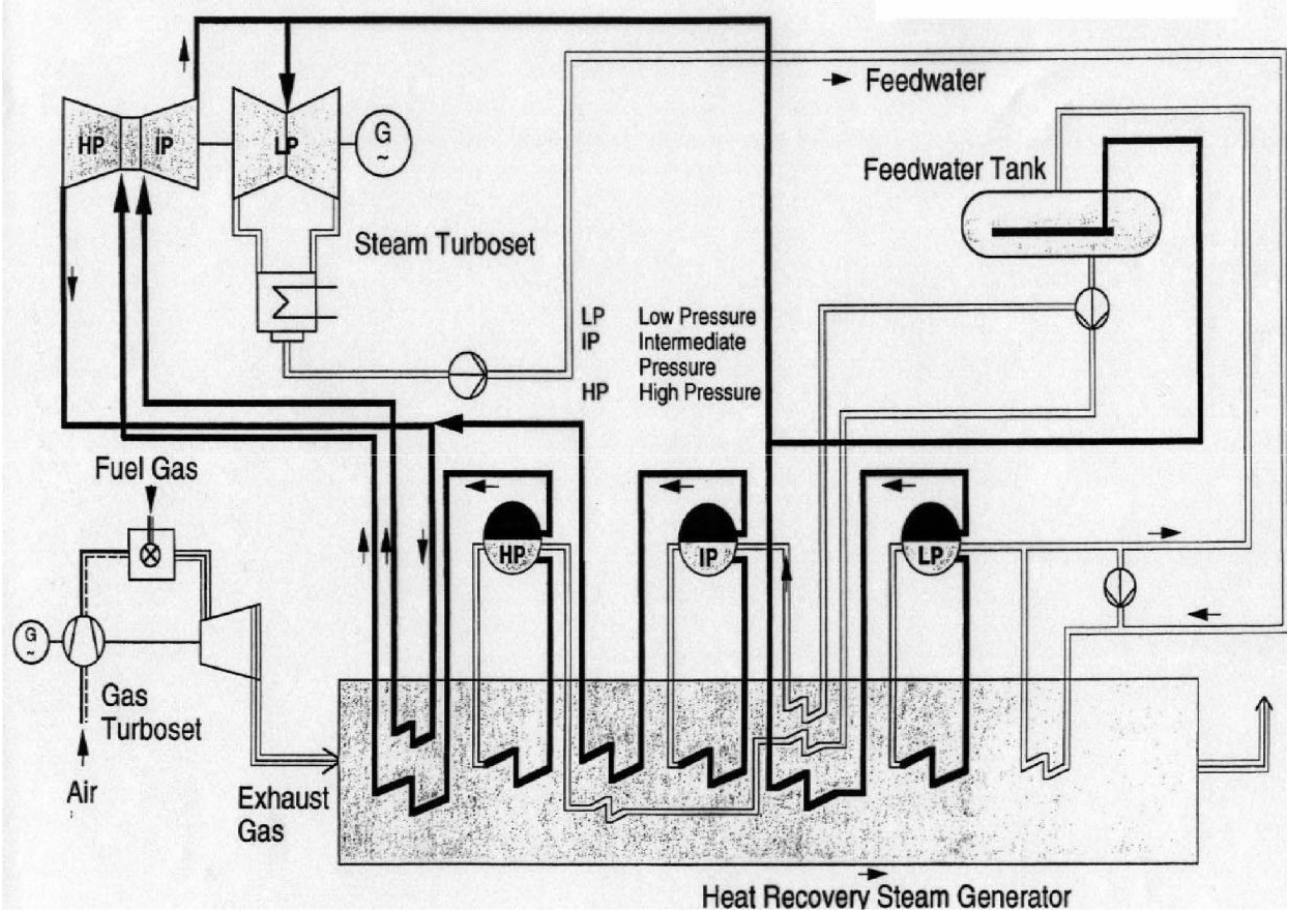
الشكل (١٨٦) دورة مركبة – ضغط ثنائي أو مزدوج مع أشعال تكميلي
Combined cycle –dual pressure with Supplementary firing



الشكل (١٨٧) مخطط سناكي Snakey diagram للدورة المركبة



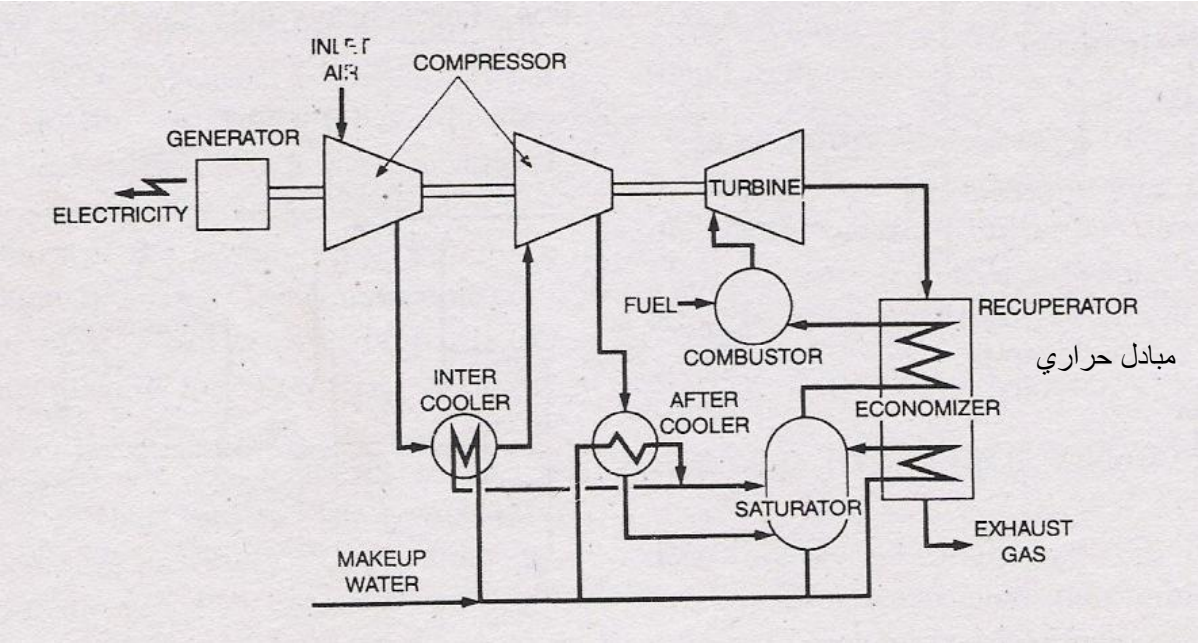
الشكل (١٨٨) في الدورة المركبة ، يكون لكل توربين غازي وحدة أسترداد حرارة خاصة به



الشكل (١٨٩) دورة مركبة ذات ضغط ثلاثي مع أعادة التسخين Triple pressure combined cycle with reheat

١٣ - دورة توربين الهواء الرطب Humid air Turbine cycle :

في هذه الدورة ، الهواء والبخار يمثلان مائع التشغيل Working fluid ، يقوم كل من المبرد البيني Intercooler والمبرد اللاحق After cooler بإسترداد الحرارة من الضاغط (يقلل من متطلبات شغل الضاغط) وينقله إلى مياه التغذية Feed water . يتم جمع مياه التغذية الحارة وهواء تصريف الضاغط Compressor discharge air في المُرطب Saturator (مثل أسطوانة البخار في المرجل Boiler steam drum) الذي ينتج خليطا من البخار والهواء (هواء رطب Humid air) ، يتم تسخين هذا المزيج في وحدة إستعادة الحرارة المفقودة Waste heat recovery unit قبل الدخول إلى غرفة الإحتراق Combustion chamber . الإختبارات على هذه الدورة تبين أن لديها كفاءة أعلى بنسبة (٤٪) من الدورة المركبة المكافئة equivalent combined cycle .



الشكل (١٩٠) دورة التوربين الغازي مع الهواء الرطب Humid air gas turbine cycle

١٤- الأخذ بنظر الإعتبار نوعية الوقود في التوربين الغازي :

منتجات الإحتراق تدخل في إتصال أو تماس مباشر مع تركيب ريش التوربين . وهذا يتطلب إستخدام الوقود الذي يحتوي على نواتج إحتراق لا تسبب تآكل حراري عالي High - temperature corrosion أو تأكسد Oxidation ، أو تعرية Erosion ، وترسب الرماد على الشفرات Deposition of ash on blades . الوقود المفضل هو الغاز الطبيعي Natural gas ، وزيوت التقطير (التكرير) Distillate oils . بينما تتطلب معظم أنواع الوقود السائل الأخرى معالجة خارجية لإزالة الفاناديوم والصوديوم Vanadium and Sodium الضار. خامس أوكسيد الفاناديوم Vanadium pentoxide وكبريتات الصوديوم Sodium sulfate هي مكونات الرماد الرئيسية التي تتكون عند درجات حرارة أعلى . هذا الرماد يلتصق بالريش وتسبب التآكل .

Technology Comparison	Diesel Engine	Gas Engine	Simple Cycle Gas Turbine	Micro Turbine	Fuel Cell	Solar Energy Photovoltic Cell	Wind	Bio Mass	River Hydro
Product Rollout	Available	Available	Available	Available	1996–2010	Available	Available	2020	Available
Size Range (kW)	20–25,000+	50–7000+	500–450,000+	30–200	50–1000+	1+	10–2500	NA	20–1000+
Efficiency (%)	36–43%	28–42%	21–45%	25–30%	35–54%	NA	45–55%	25–35%	60–70%
Gen Set Cost ($/kW)	125–300	250–600	300–600	350–800	1,500–3,000	NA	NA	NA	NA
Turnkey Cost No-Heat Recovery ($/kW)	200–500	600–1000	300–650	475–900	1,500–3,000	5,000–10,000	700–1300	800–1500	750–1200
Heat Recovery Added Cost ($/kW)	75–100	75–100	150–300	100–250	1,900–3,500	NA	NA	150–300	NA
O & M Cost ($/kWh)	0.007–0.015	0.005–0.012	0.003–0.008	0.006–0.010	0.005–0.010	0.001–0.004	0.007–0.012	0.006–0.011	0.005–0.010

ملاحظات توضيحية

-Product Rollout
تنفيذ المنتج

-Size Range
نطاق السعة

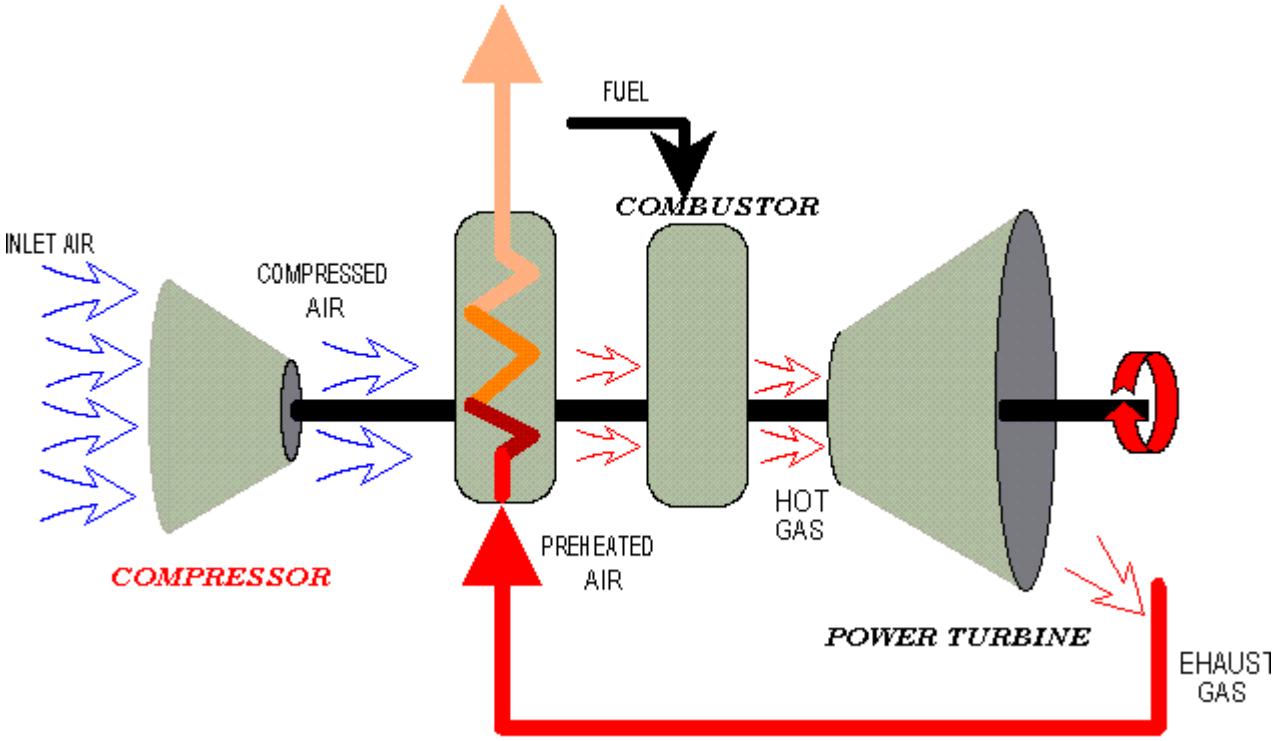
-Gen Set Cost
كلفة مجموعة المولدة

-Turnkey Cost
كلفة تسليم مفتاح (مشروع متكامل)

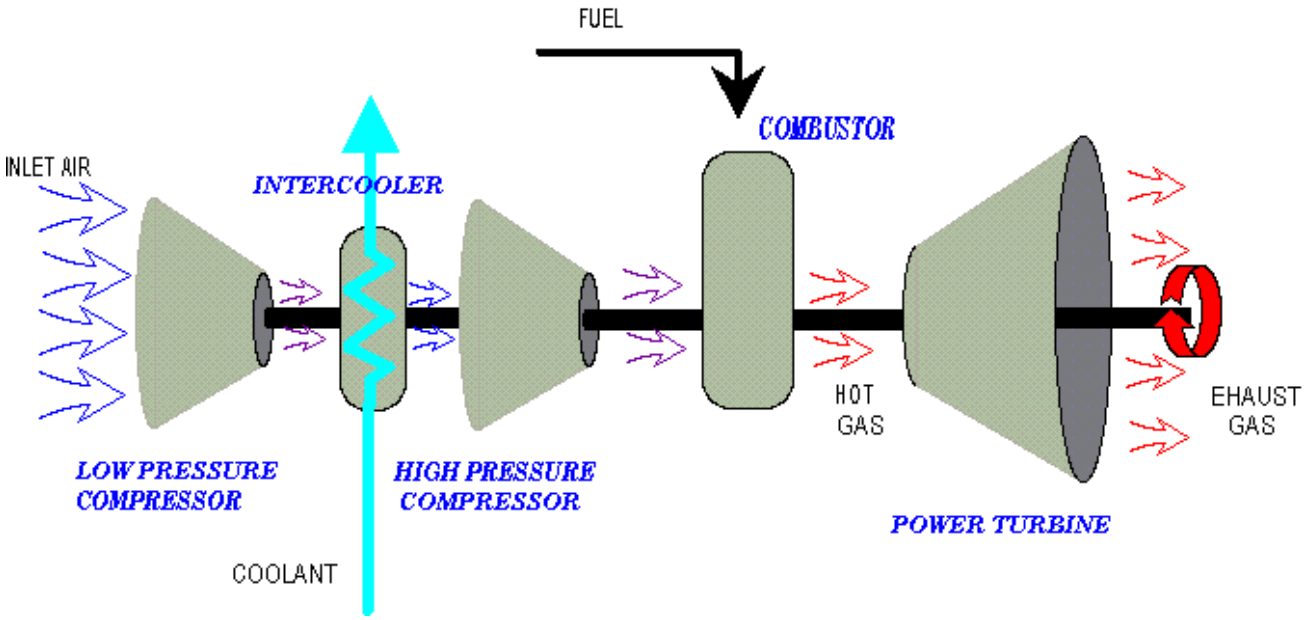
-Heat Recovery
إسترجاع الحرارة

-O & M cost
تكلفة التشغيل والصيانة

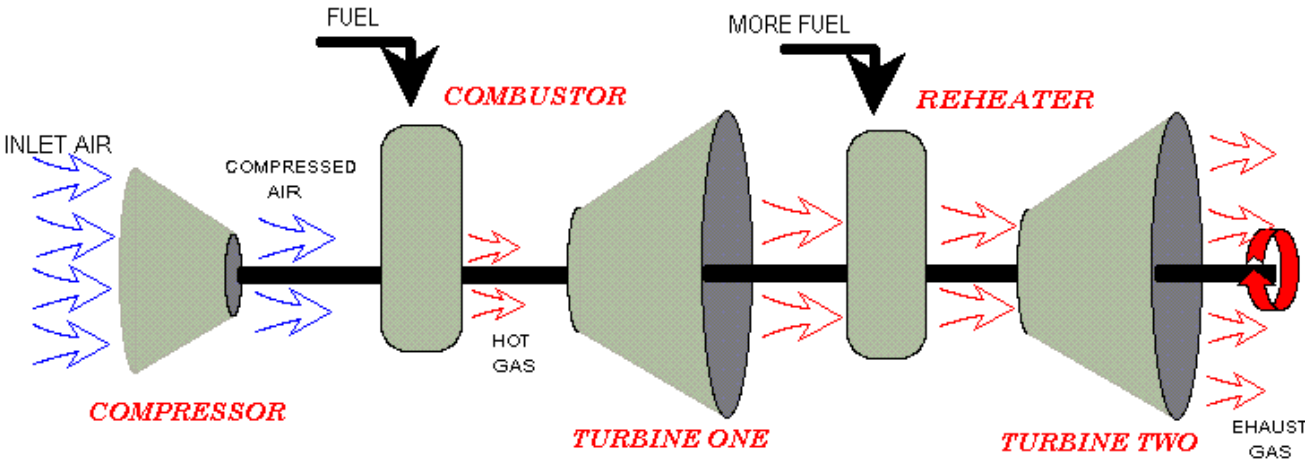
جدول مقارنة إقتصادية بين مختلف تكنولوجيات توليد الطاقة



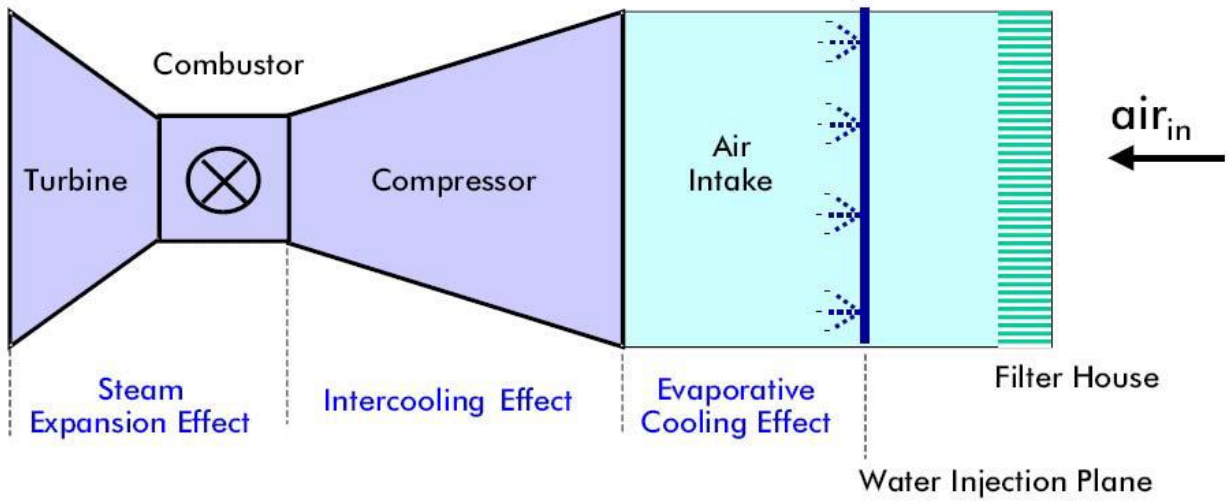
الشكل (١٩١) التوربين الغازي مع إعادة التوليد Regeneration



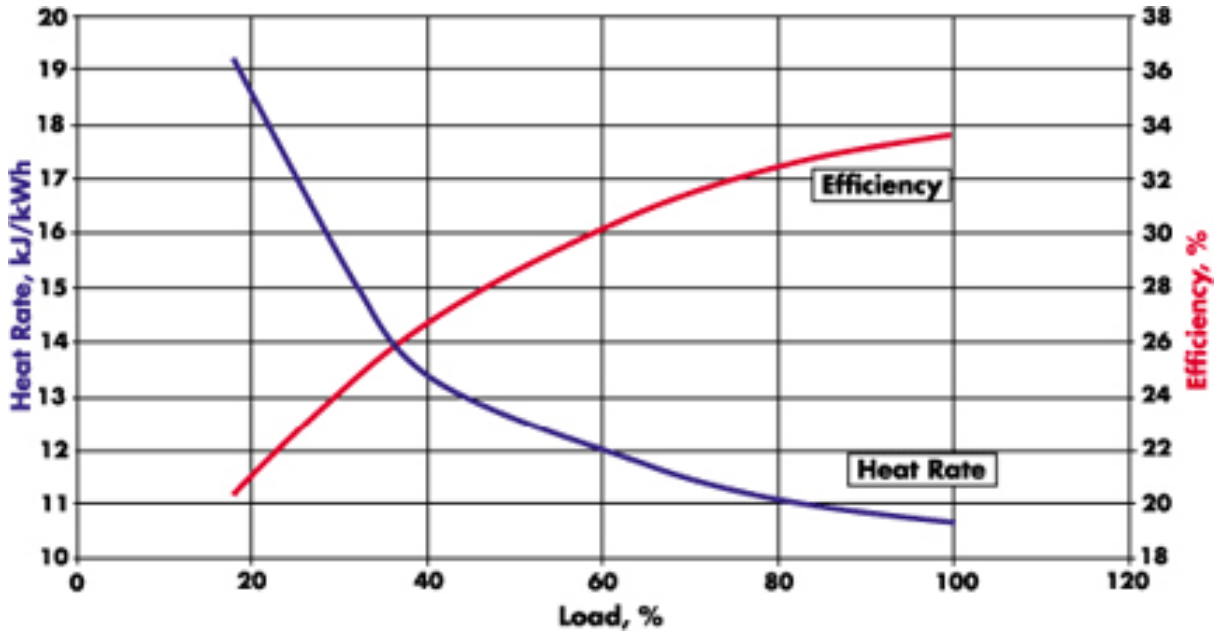
الشكل (١٩٢) التوربين الغازي مع التبريد البيني Intercooling



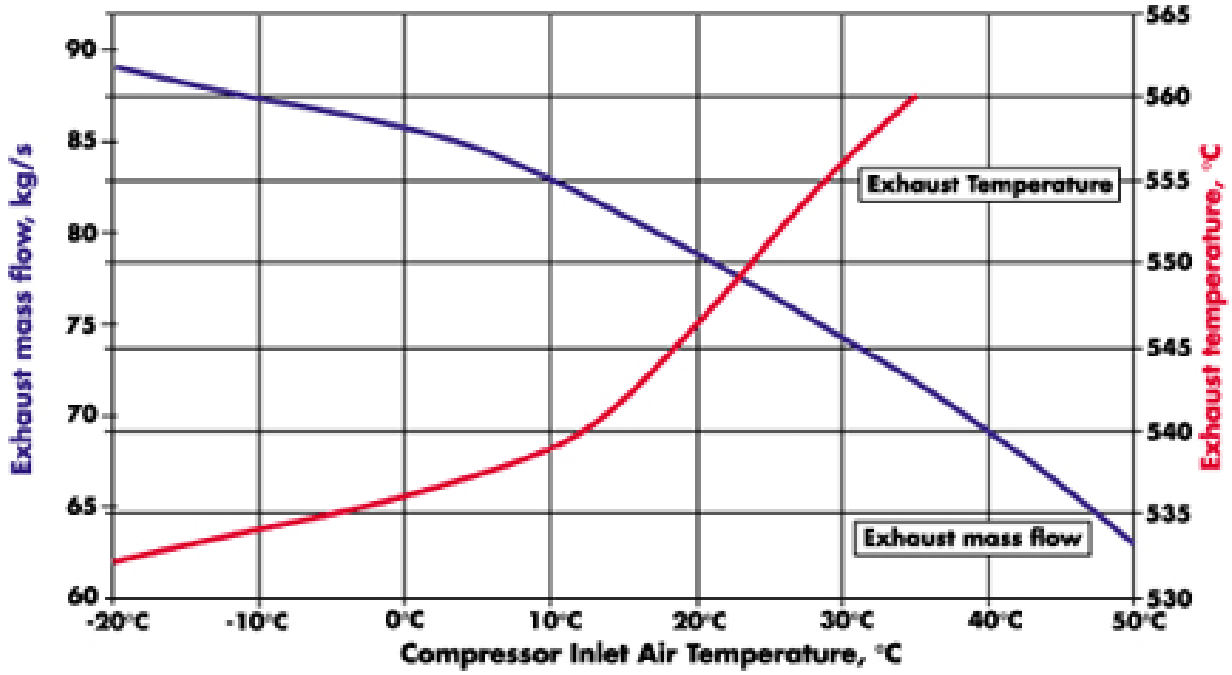
الشكل (١٩٣) التوربين الغازي مع معيد التسخين Reheater



الشكل (١٩٤) مبدأ تبريد مدخل الهواء Air Inlet Cooling Principle



الشكل (١٩٥) معدل الحرارة والكفاءة مقابل الحمل Heat rate and efficiency versus load



الشكل (١٩٦) التدفق الكتلي لغاز العادم ودرجة حرارة العادم مقابل درجة حرارة هواء مدخل الضاغط
Exhaust gas flow and exhaust temperature versus compressor inlet air temperature

APPENDIX (A) الملحق

Compressor failure signatures إشارات الفشل أو الخلل في الضاغط

الخلل Fault/Failure	التكرار Frequency	الخطورة Severity	المؤشرات Indications	أجهزة التحسس اللازمة والمطلوبة Sensors needed	قابل للتنبؤ (متوقع) Predictable
أوساخ مترسبة Fouling	متكررة جدا Very Frequent	تراجع وتدهور الأداء Performance Degradation	إنحفاض تدفق الهواء Reduced airflow	الضغط التفاضلي (فرق الضغط) لفلاتر المدخل (Inlet filter Differential Pressure) Inlet DP	نعم
			إنخفاض ضغط تصريف الضاغط Lower Compressor Discharge Pressure (CDP)	ضغط تصريف الضاغط CDP	
			إنخفاض كفاءة الضاغط Lower compressor efficiency	درجة حرارة المدخل Inlet Temperature	
				ضغط المدخل Inlet pressure	
				CDP	
				درجة حرارة عادم الضاغط Compressor Exhaust Temp	
			زيادة طفيفة في درجة حرارة عادم التوربين Slightly increased Turbine Exhaust Temperature (TET)	درجة حرارة عادم التوربين TET	
			زيادة طفيفة في درجة حرارة مسار الريش Slightly increased Blade Path Temperature (BPT)	درجة حرارة مسار الريش BPT	
تأكل (تعرية) \ قشط أو خدش Erosion/ Abrasion	لا يحدث في كثير من الأحيان ((نادر infrequent	تراجع وتدهور الأداء	تغيير في تدفق الهواء Change in airflow	Inlet DP	نعم
			إنخفاض ضغط تصريف الضاغط	CDP	
			إنخفاض كفاءة الضاغط	Inlet Temperature	
				Inlet pressure	
				CDP	
				Compressor Exhaust Temp.	
إحتكاك طرف قمة الريش Tip Rubs	متكرر Frequent	تراجع وتدهور الأداء	زيادة الاهتزاز أثناء الاحتكاك Increased vibration during rubbing	متحسسات إهتزاز المسند (الحمالة (Bearing vibration sensors	نعم
			إحتمالية زيادة تدفق الهواء بعد الأحتكاك Potential for increased airflow after rubbing	Inlet DP	
			إنخفاض ضغط تصريف الضاغط	CDP	
			ضوضاء في جهاز التدوير البطيء Noise on tuming gear		
ضرر جسم غريب على الريش / الحواجز الفاصلة Foreign Object Damage to Blades/ Diaphragms	متكرر	تراجع وتدهور الأداء \ كارثي catastrophic	إهتزاز عالي High vibration	Bearing vibration sensors	نعم
			إنخفاض ضغط تصريف الضاغط	CDP	
			تغيير في تدفق الهواء (إما زيادة أو نقصان) (Either increase or decrease)	Inlet DP	
			زيادة طفيفة في درجة حرارة عادم التوربين	TET	
			إنخفاض كفاءة الضاغط	Inlet Temperature	
				Inlet pressure	
				CDP	
				Compressor Exhaust Temp.	

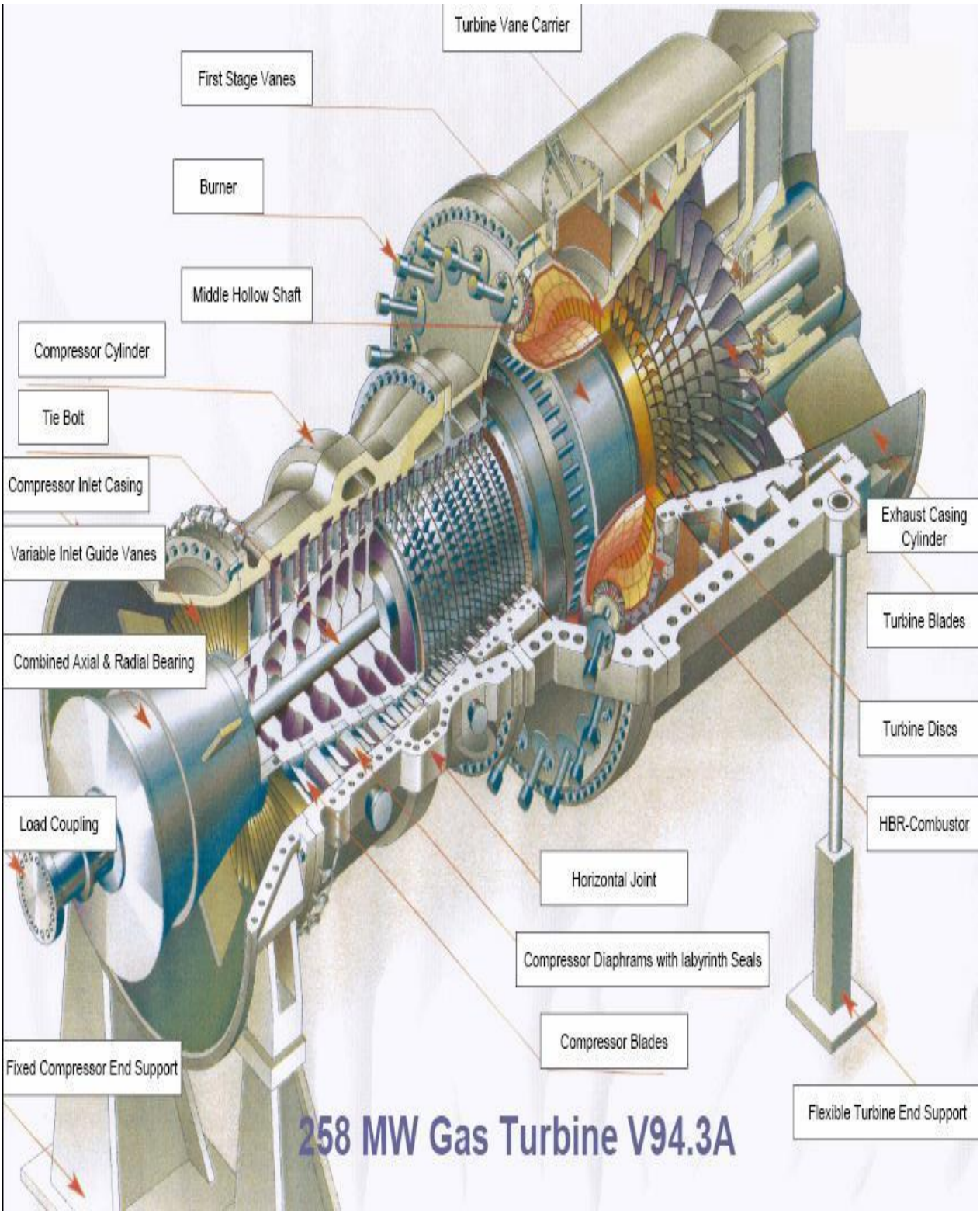
إشارات الفشل أو الخلل في التوربين Turbine failure signatures

الخلل Fault/ Failure	التكرار Frequency	الخطورة Severity	المؤشرات Indications	أجهزة التحسس اللازمة والمطلوبة Sensors needed	قابل للتنبؤ (متوقع) Predictable
ترسب أوساخ على الريش المتحركة والثابتة Blade and vane Fouling	لا يحدث في كثير من الأحيان (نادر)	تراجع وتدهور الأداء	يقل التدفق Decreased flow	Inlet DP	نعم
			تقل القدرة الناتجة Decreased output	مخرج (إنتاج) المولدة Generator output	
			يزداد معدل الحرارة Increased heat rate	Generator output	
				تدفق الوقود Fuel flow	
تعرية أسطح الريش المتحركة والثابتة \ فقدان الطلاء Blade and vane Erosion/coating loss	متكرر	تراجع وتدهور الأداء	زيادة في درجة حرارة مسار الريش Increased blade path temperature (BPT)	BPT	نعم
			زيادة في درجة حرارة عادم التوربين Increased Turbine Exhaust Temperature (TET)	TET	
			تقل القدرة الناتجة	Generator output	
			يزداد معدل الحرارة	Generator output	
				Fuel flow	
إنحراف أو إلتواء الريش الثابتة (زحف) Vane deflection (creep)	متكرر	تراجع وتدهور الأداء	زيادة في درجة حرارة مسار الريش	BPT	نعم
			زيادة في درجة حرارة عادم التوربين	TET	
			تقل القدرة الناتجة	Generator output	
			يزداد معدل الحرارة	Generator output	
				Fuel flow	
إحتكاك طرف قمة الريش	متكرر	تراجع وتدهور الأداء	يزداد الأهتزاز Increased vibration	Bearing vibration sensors	نعم
			زيادة في درجة حرارة مسار الريش	BPT	
			زيادة في درجة حرارة عادم التوربين	TET	
			تقل القدرة الناتجة	Generator output	
			يزداد معدل الحرارة	Generator output	
				Fuel flow	
إحتكاك حاد لطرف قمة الريش \ أنكسار طرف الريشة Severe Tip rubs/ tip breakage	لا يحدث في كثير من الأحيان (نادر)	كارثي	زيادة كبيرة في الأهتزاز Large Increased in vibration	Bearing vibration sensors	نعم
			زيادة في درجة حرارة مسار الريش	BPT	
			زيادة في درجة حرارة عادم التوربين	TET	
			تقل القدرة الناتجة	Generator output	
			يزداد معدل الحرارة	Generator output	
				Fuel flow	
			قد يؤدي الفشل الشديد إلى زيادة تدفق مائع التبريد Extreme failure might increase coolant flow	درجات حرارة تجويف القرص Disk cavity temperatures	
				تدفق مائع التبريد Coolant flow	

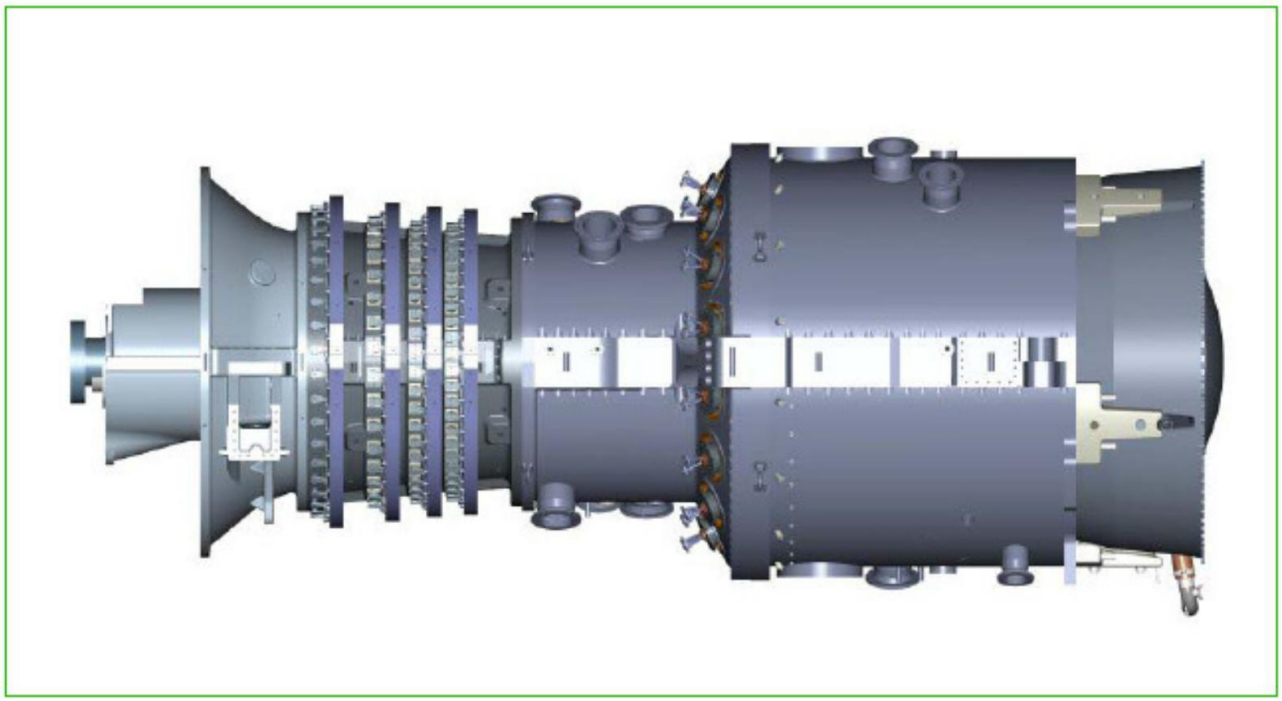
إشارات الفشل أو الخلل في غرفة الإحتراق Combustur failure signatures

الخلل Fault/ Failure	التكرار Frequency	الخطورة Severity	المؤشرات Indications	أجهزة التحسس اللازمة والمطلوبة Sensors needed	قابل للتنبؤ (متوقع) Predictable
خلل في القطعة الأنتقالية Transition Piece Failure	متكرر	إحتمالية خروج الماكينة من العمل \ كارثة Potentially take machine offline / catastrophic	إنتشار درجة حرارة مسار الريش BPT spread (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية Thermocouples الموضوعة حول المرحلة الأخيرة للتوربين الغازي)	BPT	نعم
			إنتشار درجة حرارة عادم التوربين TET spread (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة شعاعيا Radially حول عادم التوربين الغازي)	TET	
			قد يؤدي الفشل الشديد إلى زيادة تدفق مائع التبريد	Disk cavity temperatures	
				Coolant flow	
الأزيز (الطنين) أو الضوضاء Humming	متكرر	إحتمالية خروج الماكينة من العمل	عدم إنتظام عمل كاشف الأزيز (الطنين) Humming detector oscillations	كاشف الطنين Humming detector	نعم
			هبوط ضغط الحارقة المنخفض Low combustor pressure drop	ضغط هيكل الحارقة Combustor shell pressure	
				ضغط عادم الحارقة Combustor exhaust pressure	
			تقلبات الضغط ودرجات الحرارة المختلفة Various temperature and pressure oscillations	Combustor shell pressure	
				مزدوج حراري لقياس درجة حرارة الشعلة الراجعة أو المرتدة Flashback thermocouple	
			إهتزازات عالية High vibrations	Bearing vibration sensors	
			إنخفاض الحمل (بسبب نظام التحكم) Reduced load (due to control system)	Generator output	
فشل أو خلل في أجهزة ومعدات الحارقة Combustion Hardware Failure	متكرر	إحتمالية خروج الماكينة من العمل \ كارثة	زيادة تدريجية في درجة حرارة المزدوج الحراري للشعلة الراجعة Gradual increase in flashback thermocouple temperature	Flashback thermocouple	كلا
			إنتشار درجة حرارة مسار الريش (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة حول المرحلة الأخيرة للتوربين الغازي)	BPT	
			إنتشار درجة حرارة عادم التوربين (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة شعاعيا حول عادم التوربين الغازي)	TET	
			زيادة الإنبعاثات Emissions increase	نظام مراقبة الإنبعاثات المستمرة Continuous Emissions Monitoring System (CEMS)	

إنسداد فتحات فوهات الوقود Plugged fuel nozzles	لا يحدث في كثير من الأحيان (نادر)	إحتمالية خروج الماكينة من العمل \ كارثة	إنتشار درجة حرارة مسار الريش (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة حول المرحلة الأخيرة للتوربين الغازي)	BPT	نعم
			إنتشار درجة حرارة عادم التوربين (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة شعاعيا حول عادم التوربين الغازي)	TET	
			تدفق وقود غير متكافىء Uneven fuel flow		
			غالبا ما يؤدي إلى بدء أشعال بطيئ \ فشل في الأشعال slow starting / light off failure	كواشف اللهب Flame detectors	
			يتم الكشف من خلال التفتيش أو الفحص بجهاز بصري (منظار داخلي Boroscope) Detected during boroscope inspection		
فشل أنابيب نقل اللهب المتقاطعة Cross fire tube failure	لا يحدث في كثير من الأحيان (نادر)	كارثي	إنتشار درجة حرارة مسار الريش (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة حول المرحلة الأخيرة للتوربين الغازي)	BPT	نعم
			إنتشار درجة حرارة عادم التوربين (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة شعاعيا حول عادم التوربين الغازي)	TET	
			إنتشار الشعلة الراجعة أو المرتدة Flashback spread	الشعلة الراجعة أو المرتدة Flashback	
			يتم الكشف من خلال التفتيش أو الفحص بجهاز بصري (منظار داخلي Boroscope)		
مشاكل صمام الإحتراق الجانبي أو الحولي Combustion bypass valve problems	متكرر	إحتمالية خروج الماكينة من العمل	زيادة تدريجية في درجة حرارة المزدوج الحراري للشعلة الراجعة	درجة حرارة الشعلة الراجعة أو المرتدة Flashback temperature	نعم
			إنتشار درجة حرارة مسار الريش (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة حول المرحلة الأخيرة للتوربين الغازي)	BPT	
			إنتشار درجة حرارة عادم التوربين (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة شعاعيا حول عادم التوربين الغازي)	TET	
			زيادة الأنبعاثات	CEM	
رجوع أو إرتداد الشعلة Flashback	لا يحدث في كثير من الأحيان (نادر)	كارثي	زيادة كبيرة في درجة حرارة المزدوج الحراري للشعلة الراجعة Drastic increase in flashback thermocouple temperature	Flashback thermocouple	نعم
			عدم إنتظام عمل كاشف الأزيز (الطنين)	Humming detector	
			إنخفاض الضغط التفاضلي (فرق الضغط) بين عادم الضاغط وضغط الحارقة Low DP between compressor exhaust and combustor pressure	Combustor shell pressure	
				Compressor exhaust pressure	
تعرية وتقشر وتفتت الطلاء الحراري العازل Thermal Barrier Coated (TBC) Erosion, flaking	لا يحدث في كثير من الأحيان (نادر)	إحتمالية خروج الماكينة من العمل	يتم الكشف من خلال التفتيش أو الفحص بجهاز بصري (منظار داخلي Boroscope)		كلا
			إنتشار درجة حرارة مسار الريش (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة حول المرحلة الأخيرة للتوربين الغازي)	BPT	
			إنتشار درجة حرارة عادم التوربين (تفاوت كبير في القراءات بين المزدوجات الحرارية الموضوعة شعاعيا حول عادم التوربين الغازي)	TET	



الشكل (١٩٧) توربين غازي أرضي land Base Gas Turbine نوع سيمنز SIEMENS V94.3A



Design goals:	
SGT5-8000H gas turbine	
Fuel	Gas, oil
Capacity	340 MW
Efficiency	39%
Weight	440 metric tons
Length	43 ft
Diameter	17 ft
SCC5-8000H CC power plant	
Capacity	530 MW
Efficiency	60%

The capacity of an SGT5-8000H gas turbine is equivalent to that of:

- 1,100 model 911 Turbo Porsche cars
- 13 jumbo jet engines

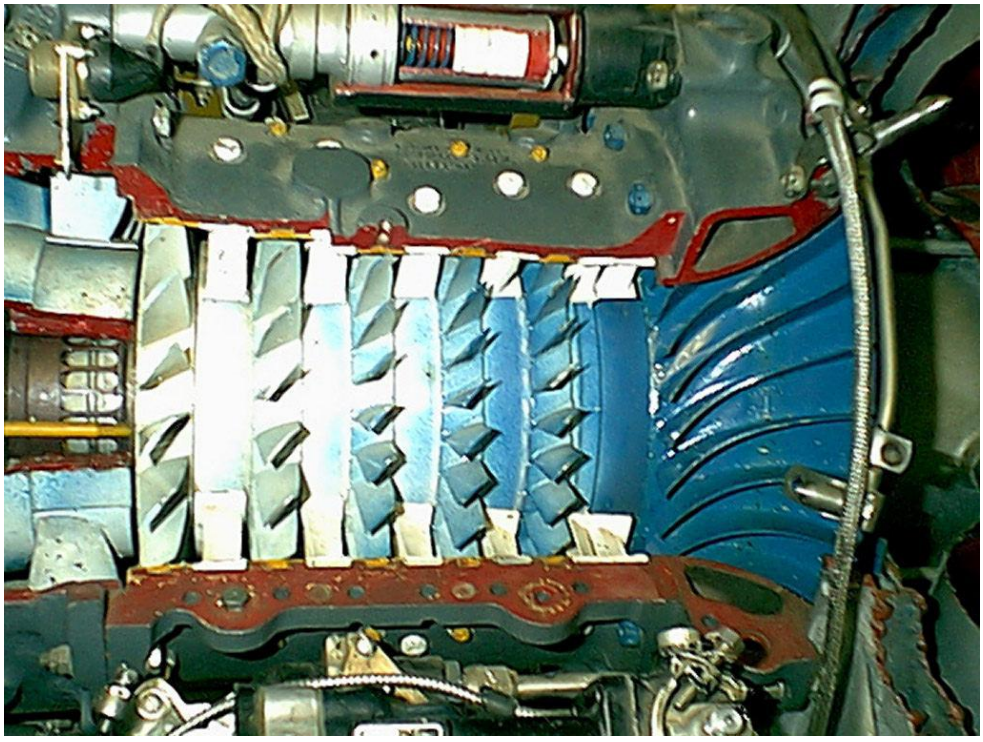
An SGT5-8000H gas can supply electricity to around 620,000 three-person households or a city the size of Tampa, Florida

الشكل (١٩٨) أكبر التوربينات الغازية في العالم من إنشاء سيمنز SIEMENS (SGT5-8000H) ذو سعة تكافىء :

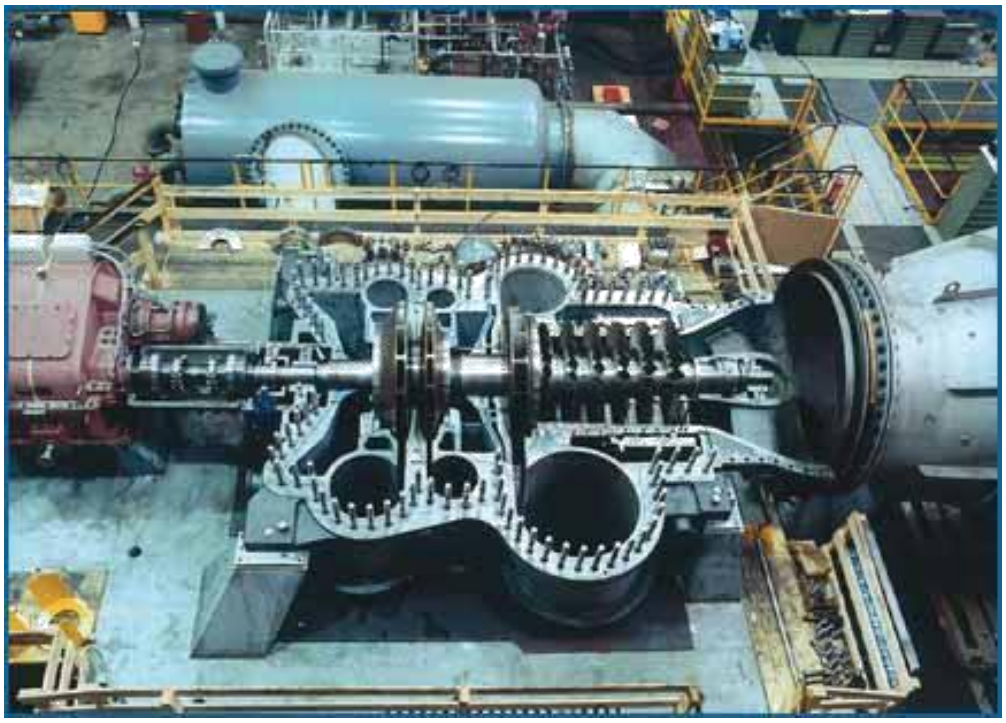
- عدد (١١٠٠) سيارة بورش بمحرك توربيني طراز (911)
- عدد (١٣) محرك نفاث ضخم Jumbo
- إمكانية توفير الطاقة الكهربائية لعدد (٦٢٠٠٠٠) أسرة تتكون من (٣) أشخاص أو لمدينة بحجم تامبا بولاية فلوريدا

A

الشكل (١٩٩) ضاغط مركب (محوري – طرد مركزي) Combined Axial & Centrifugal Compressor



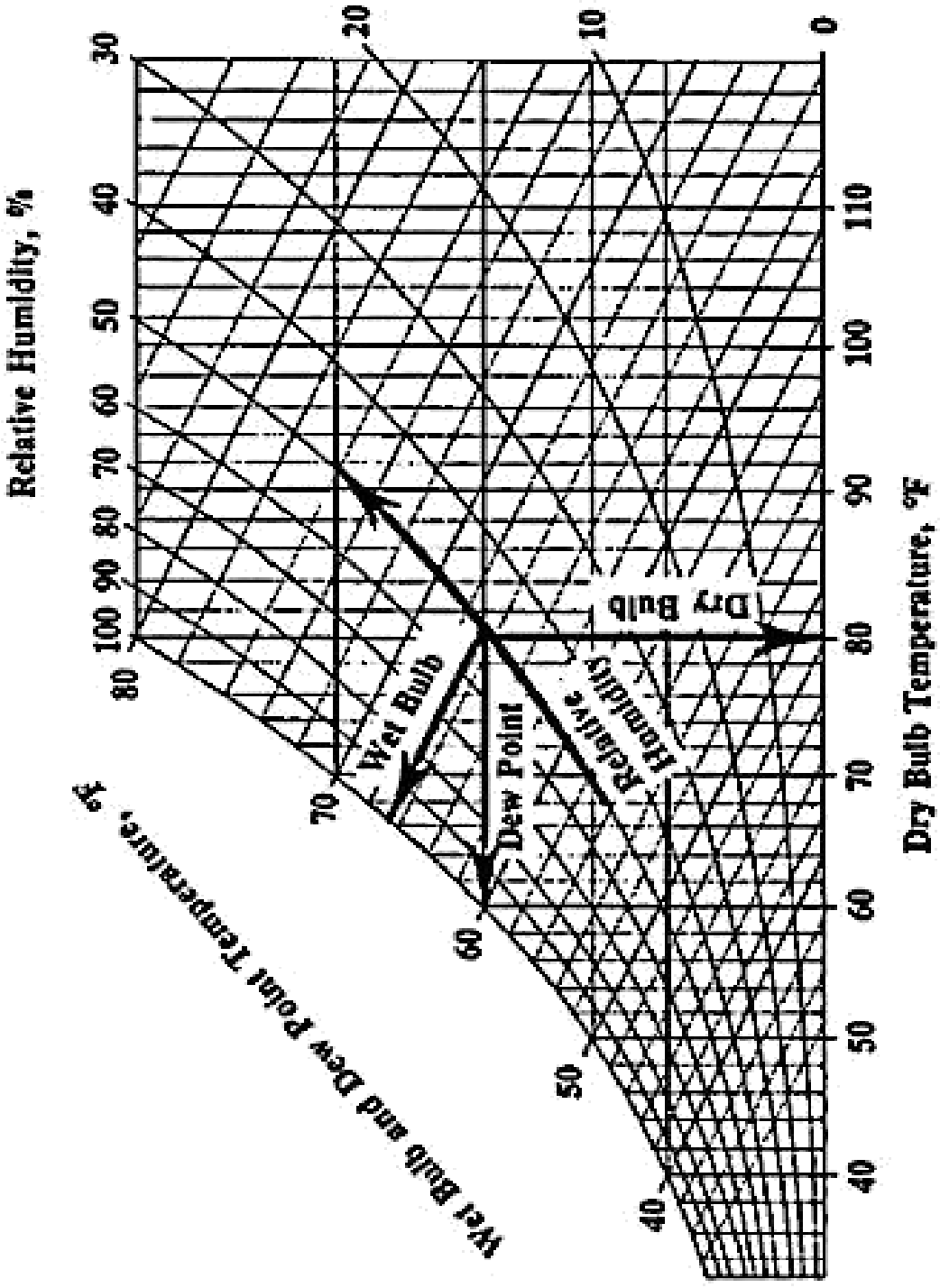
B



C

الشكل (٢٠٠) مركبة بتوربين غازي نفاث (مركبة للقيادة فوق الأراضي الوعرة) نوع Rover - Jet1

الشكل (٢٠١) دراجة نارية Motorcycle تعمل بقدرة توربين غازي



الشكل (٢٠٢) الخريطة السيكرومترية psychrometric chart

References المراجع

1- Gas Turbines design & Operation – Eng. Abdullah Zaman Al merza 20/10/2007
2- Power plant technology -M.M. ELWakil
3- Power Generation hand book -Philip Kiameh
4- Standard hand book of power plant engineering -Robert C. Elliott
5- Power plant engineering -Jeffrey M. Smith
6- The jet engine -Rolls Royce Limited
7- Gas turbine theory –H. Cohen
8- Gas turbine – Nuvo Pignone
9- thermodynamics – Yunus A. Cengel
10- Reactor fundamental -CANDU reactor
11-Combined cycle training –National Power
12-Combined cycle training – Innogy
13- Modern Power Plant Practice – P. Hampling
14- Wikipedia- the free encyclopedia ويكيبيديا ، الموسوعة الحرة
15- Dictionary of Engineering – Second Edition - McGraw-Hill
16- GAS TURBINES IN SIMPLE CYCLE & COMBINED CYCLE APPLICATIONS - Claire M. Soares , P.E.; Fellow ASME; MBA
١٧- إصدارات مجمع اللغة العربية بالقاهرة :
مجموعة المصطلحات العلمية والفنية – المجلد ٢١ سنة ١٩٧٩ والمجلد ٢٧ سنة ١٩٨٨ والمجلد ٤٢ سنة ٢٠٠٢ ، ومعجم مصطلحات الهندسة الميكانيكية – الطبعة الأولى ١٩٩٨ ، ومعجم الفيزياء ٢٠٠٩
١٨- معجم هندسة الميكانيك المصور – جلال الحاج عبد – ٢٠٠٩
١٩- معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية - أحمد شفيق الخطيب - ٢٠٠٥