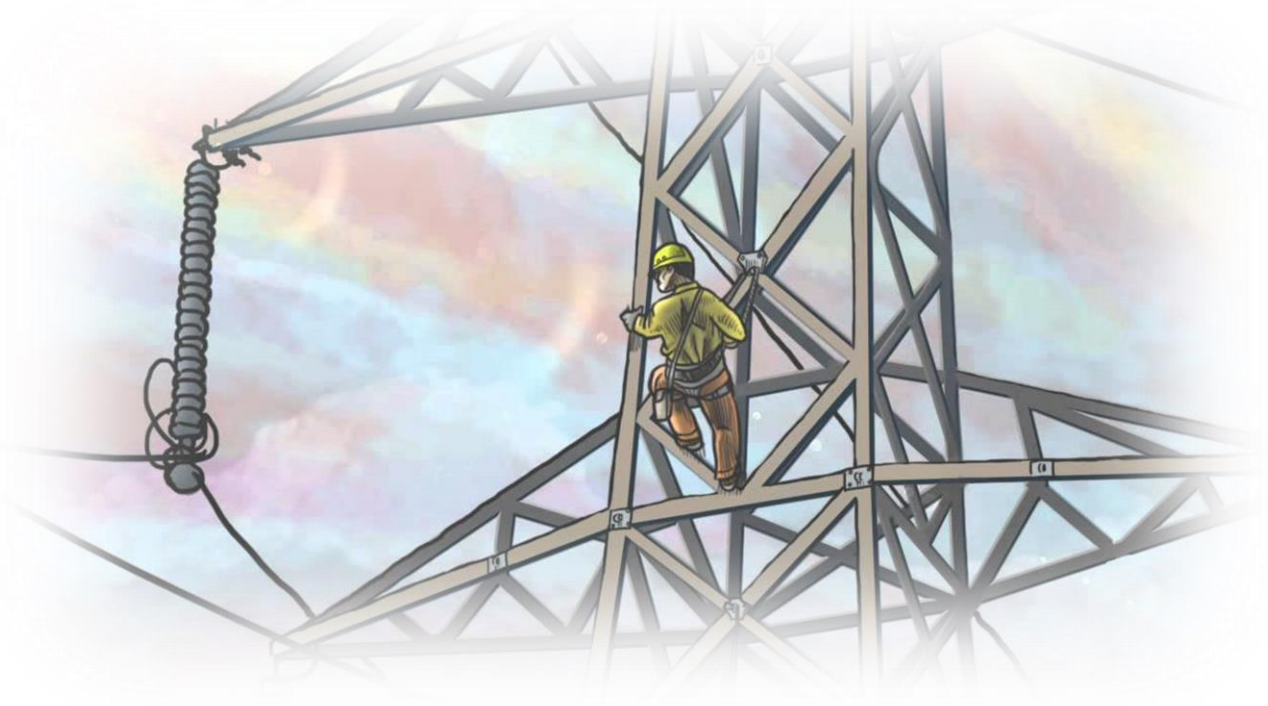
الطاقة الكهربائية

وصف عام



Electrical Energy

OUTLINE

إعداد وترجمة
المهندس عدنان بهجت جليل

جدول المحتويات Table of Content

الموضوع	الصفحة
الطاقة الكهربائية Electrical Energy أولا : تحويل الطاقة Energy conversion محطات التوربين الغازي لتوليد القدرة Gas Turbine Power Plants مبدا عمل التوربين الغازي Gas Turbine Working Principle	٤
توليد الطاقة الكهربائية Electrical Power Generation أنظمة التوربينات الغازية Turbine Configurations أنظمة بسيطة Simple Systems أنظمة دورة مركبة (مدمجة) Combined Cycle Systems أداء التوربين Performance of the turbine القدرة الناتجة Turbine Power Output كفاءة النظام System Efficiency	٥
توربينات الدورة البسيطة Simple Cycle Turbines توربينات الدورة المركبة Combined Cycle Turbines الوقود Fuel تطبيقات Applications القضايا والمشاكل البيئية Environmental Issues	٦
محطات التوربين البخاري لتوليد الطاقة الكهربائية Steam Turbine Electricity Generation Plants عمليات تحويل الطاقة The Energy Conversion Processes توليد البخار (المصادر الحرارية) Raising steam (Thermal Sources) التحول الكيميائي Chemical Transformation القدرة النووية Nuclear Power الطاقة الشمسية Solar Power	٧
الطاقة الحرارية الأرضية Geothermal Energy التوربين البخاري (المحرك الرئيسي) Steam Turbine (Prime Mover) مبادئ العمل Principles of action التوربينات الدفعية Impulse Turbines	٨
التوربينات الرد فعلية Reaction Turbines المكثف The Condenser توربينات الضغط المرتد Back-Pressure Turbines المكائن العملية Practical Machines	٩
التوربين البخاري كمحرك حراري The Steam Turbine as a Heat Engine	١٠
نقل الطاقة الكهروميكانيكية (المولدة) Electromechanical Energy Transfer (Generator) المنظومات المساعدة Auxiliary Systems	١١
إمدادات الطاقة الكهربائية التقليدية والمستدامة (الدائمية) - نظرة عامة خصائص ومقارنات Characteristics and Comparisons مصادر الطاقة الكهربائية الأولية Primary Electrical Energy Sources تحويل مصادر الطاقة إلى طاقة كهربائية قابلة للإستخدام Turning Energy Resources into Usable Electric Power	١٢
مخططات دورات توليد الطاقة الكهربائية من مختلف المصادر Schemes of power generation cycles from different sources تجهيز الطاقة الكهربائية Electricity Supply	١٣-٢٢
كفاءة الطاقة Energy Efficiency سلسلة تجهيز الطاقة The Energy Supply Chain كفاءة التوليد Generation Efficiency	٢٣

٢٤	مقارنات الكفاءة Efficiency comparisons كفاءة إستخدام المحطة Plant Utilisation Efficiency عامل السعة Capacity Factor
٢٥	عامل الحمل Load Factor الحمل الأساس Base Load أحمال الذروة Peak Loads
٢٦	هامش أو حد المحطة Plant Margin كفاءة توزيع الطاقة الكهربائية Electricity Distribution Efficiency عوامل الفقد في التوزيع Distribution Loss Factors (DLF) الموقع Location الجهد االكهربائي Voltage
٢٧	كفاءة إستخدام الطاقة Energy Usage Efficiency
٢٩-٢٨	مصادر الطاقة Energy Resources
٣٠	محتوى الطاقة الكهروكيميائية للأنواع الكيميائية Electrochemical Energy Content of Chemical Species
٣١	محتوى الطاقة لتدفقات الطاقة التي تحدث بشكل طبيعي Energy Content of Naturally Occurring Energy Flows
٣٢	مخطط توليد الطاقة الكهربائية في العالم من مختلف مصادر الطاقة (تيراواط ساعة) The scheme of generating electricity in the world from various sources of energy (terawatt hours)
٣٣	مخطط توليد الطاقة الكهربائية في العالم من مختلف مصادر الطاقة (نسبة مئوية) The scheme of generating electricity in the world of various energy sources (Percentage)
٣٤	تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية للميكاواط ساعة و للكيلواط ساعة KWh لمختلف أنواع الوقود Electricity Generating Costs per MWh and KWh for Different Fuels
٣٥	المراجع

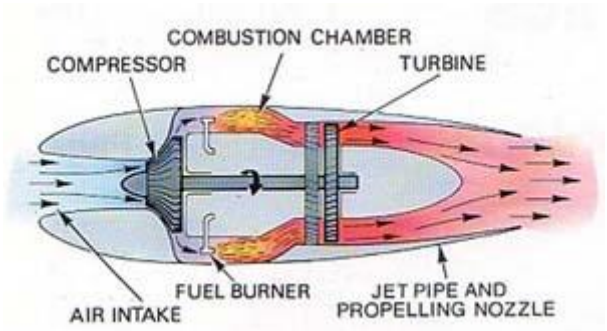
الطاقة الكهربائية Electrical Energy

أولا : تحويل الطاقة Energy conversion

محطات التوربين الغازي لتوليد القدرة Gas Turbine Power Plants

مبدا عمل التوربين الغازي Gas Turbine Working Principle

تستمد محركات التوربين الغازي قدرتها من عملية حرق الوقود في غرفة الإحتراق وإستخدام غازات الإحتراق المتدفقة بسرعة لدفع وتدوير التوربين بنفس الطريقة التي يدفع بها البخار عالي الضغط التوربين البخاري .



لكن أحد الإختلافات الرئيسية هو أن التوربين الغازي يحتوي على توربين ثاني يعمل كضاغط هواء مركب على نفس العمود . تقوم التوربينات الهوائية (ضاغط الهواء) بإلتقاط (سحب) الهواء من الجو ، وتضغطه وتغذيه بضغط عالي إلى غرفة الاحتراق مما يزيد من كثافة شدة اللهب المحترق .
إنها آلية ردود فعل إيجابية . حيث أن زيادة سرعة التوربين الغازي ، يتسبب أيضا في تسريع الضاغط الذي يؤثر في سحب ودخول المزيد من كميات الهواء إلى غرفة الإحتراق التي بدورها تزيد من معدل إحتراق الوقود والذي سينتج عنه المزيد من كميات الغازات الساخنة ذات الضغط العالي مندفعة إلى التوربين الغازي مما يزيد من سرعته . يتم السيطرة على سرعة التوربين من خلال التحكم في خط تزويد الوقود الذي يحد من كمية الوقود الذي يتم تغذيتها للتوربين مما يحد من سرعته .

تُعرف العملية الديناميكية الحرارية المستخدمة من قبل التوربين الغازي بدورة برايتون Brayton cycle. بالتناظر مع دورة كارنوت Carnot cycle التي يتم فيها زيادة الكفاءة إلى الحد الأقصى عن طريق زيادة فرق درجة الحرارة لمائع التشغيل بين مدخلات ومخرجات الماكينة ، يتم زيادة كفاءة دورة برايتون عن طريق زيادة فرق الضغط عبر الماكينة . يتكون التوربين الغازي من ثلاثة مكونات رئيسية : ضاغط ، وغرفة إحتراق ، وتوربين . يتم ضغط مائع التشغيل (الهواء) في الضاغط (ضغط ثابت الحرارة Adiabatic Compression لا كسب أو خسارة للحرارة) ، ثم يخلط بالوقود ويحترق تحت ظروف الضغط الثابت في غرفة الإحتراق (إضافة حرارة بضغط ثابت) . الغاز الساخن الناتج من عملية الإحتراق يتمدد خلال التوربين لإنتاج الشغل (تمدد بثبوت الحرارة Adiabatic Expansion) . يتم إستخدام الكثير من الطاقة المنتجة في التوربين لتشغيل وإدارة الضاغط والباقي متاح لتشغيل المعدات الإضافية (المساعدة) وإنجاز الشغل المطلوب . النظام هو نظام مفتوح حيث لا يتم إعادة إستخدام الهواء لذلك يتم حذف الخطوة أو العملية الرابعة في الدورة ، والتي يتم فيها تبريد مائع التشغيل .

تتميز التوربينات الغازية بنسبة قدرة إلى وزن عالية جدا وتكون أخف وزنا وأصغر حجما من محركات الإحتراق الداخلي لنفس القدرة . وعلى الرغم من أنها من الناحية الميكانيكية أبسط من المحركات الترددية ، فإن خصائصها الفنية مثل السرعة العالية وعملية التشغيل في ظروف درجات حرارة عالية ، كل ذلك تتطلب إستخدام مكونات عالية الدقة ومواد غريبة ونادرة في تصنيع أجزاء التوربينات الغازية مما يجعلها أكثر تكلفة في التصنيع .

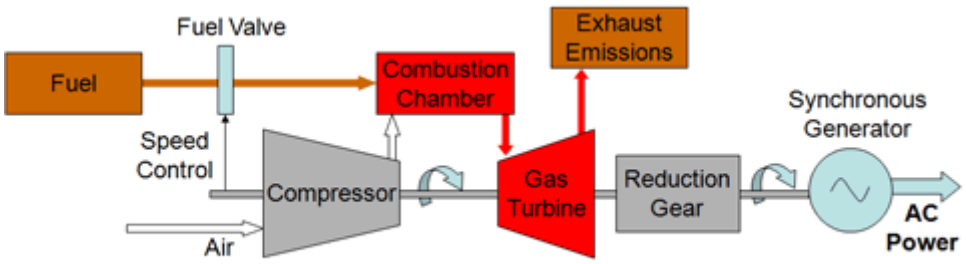
توليد الطاقة الكهربائية Electrical Power Generation

في تطبيقات توليد الطاقة الكهربائية ، يتم إستخدام التوربين لتشغيل مولد تزامني والذي يجهز القدرة الكهربائية الخارجة ولكن نظرا لأن التوربين يعمل عادة بسرعات دورانية عالية جدا تبلغ ١٢٠٠٠ دورة في الدقيقة أو أكثر ، فأنه يجب توصيله بالمولد من خلال جهاز (مسنن) تخفيض السرعة بنسبة عالية طالما تعمل المولدات بسرعة ١٠٠٠ أو ١٢٠٠ دورة في الدقيقة اعتمادا على تردد التيار المتناوب للشبكة الكهربائية .

أنظمة التوربينات الغازية Turbine Configurations

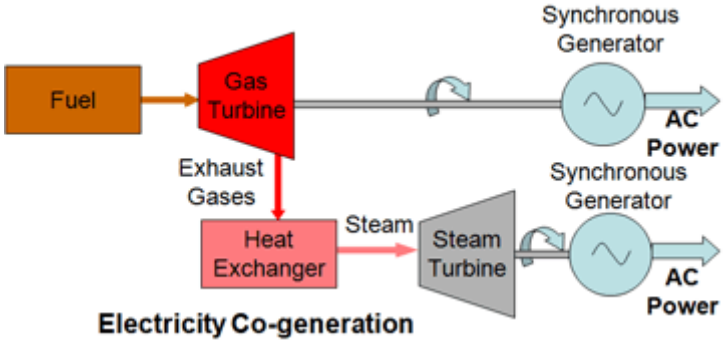
تستخدم التوربينات الغازية لتوليد القدرة في اثنين من الأنظمة الأساسية :

• **أنظمة بسيطة Simple Systems** تتكون من التوربين الغازي الذي يدير مولد الطاقة الكهربائية .



Gas Turbine Electric Power Generation

• **أنظمة دورة مركبة (مدمجة) Combined Cycle Systems** مصممة لأقصى قدر من الكفاءة التي تستخدم فيها غازات العادم الساخنة الخارجة من التوربين الغازي لتوليد البخار وإدارة التوربين البخاري مع توصيل كلا التوربينين بالمولدات الكهربائية .



Electricity Co-generation

أداء التوربين Performance of the turbine

• **القدرة الناتجة Turbine Power Output**

لتقليل حجم ووزن التوربين لقدرة ناتجة محددة ، يجب مضاعفة تدفق الهواء . يتم الحصول على هذا عن طريق زيادة تدفق الهواء من خلال التوربين الذي يعتمد بدوره على زيادة نسبة الضغط Pressure Ratio بين مدخل الهواء ومخرج العادم . العامل الرئيسي الذي يحقق ذلك هو نسبة الضغط عبر الضاغط الذي يمكن أن يصل إلى (٤٠ : ١) في التوربينات الغازية الحديثة . في تطبيقات الدورة البسيطة ، زيادة نسبة الضغط يؤدي إلى زيادة في الكفاءة عند درجة حرارة إحتراق معينة ، ولكن إلى حدود معينة لأن زيادة نسبة الضغط تعني أنه سيتم إستهلاك المزيد من الطاقة بواسطة الضاغط .

• **كفاءة النظام System Efficiency**

الكفاءة الحرارية مهمة لأنها تؤثر مباشرة على كميات إستهلاك الوقود وتكاليف التشغيل .

توربينات الدورة البسيطة Simple Cycle Turbines

يستهلك التوربين الغازي كميات كبيرة من القدرة لمجرد تشغيل الضاغط . وكما هو الحال مع جميع المحركات الحرارية الدورية ، فإن درجة الحرارة القصوى في الماكينة تعني كفاءة أعلى (قانون كارنوت Carnot's Law) ، ولكن في التوربين الغازي ، فإن ذلك يعني أيضا فقدان المزيد من الطاقة على شكل طاقة حرارية ضائعة (مهدورة) من خلال غازات العادم الساخنة التي تكون درجات الحرارة فيها عادة أعلى من ١٠٠٠ درجة مئوية . وبالتالي فإن كفاءة توربينات الدورة البسيطة تكون منخفضة جدا . بالنسبة إلى محطة ثقيلة ، تتراوح الكفاءات التصميمية بين ٣٠٪ و ٤٠٪ . (تبلغ كفاءات المحركات الهوائية Aero Engines في نطاق ٣٨ ٪ و ٤٢ ٪ في حين أن التوربينات الصغيرة ذات القدرة الواطئة Low Power Microturbines (<١٠٠كيلواط) تحقق كفاءات فقط ١٨ ٪ إلى ٢٢ ٪) . على الرغم من أن زيادة درجة حرارة الأحتراق تزيد من القدرة الناتجة عند نسبة ضغط معينة ، إلا أن ذلك يتم على حساب الكفاءة بسبب زيادة الخسائر نتيجة الحاجة ألى كميات هواء التبريد المطلوبة للحفاظ على مكونات التوربين عند درجات حرارة عمل معقولة .

توربينات الدورة المركبة Combined Cycle Turbines

من الممكن إستعادة الطاقة من الحرارة المفقودة لأنظمة الدورة البسيطة بإستخدام غازات العادم في نظام هجين لتوليد البخار وإدارة التوربين البخاري . في مثل هذه الحالات ، يمكن خفض درجة حرارة العادم إلى ١٤٠ درجة مئوية ، مما يتيح تحقيق كفاءة تصل إلى ٦٠٪ في أنظمة الدورة المركبة .

في تطبيقات الدورة المركبة ، يكون للزيادات في نسبة الضغط تأثير أقل وضوحا على الكفاءة نظرا لأن معظم التحسينات تأتي من الزيادات في الكفاءة الحرارية لدورة كارنوت Carnot الناتجة عن الزيادات في درجة حرارة الأحتراق .

وبالتالي يتم تحقيق كفاءة الدورة البسيطة عن طريق زيادة نسب الضغط . بينما يتم الحصول على كفاءة الدورة المركبة مع نسب ضغط معتدلة أعتيادية ودرجات حرارة أحتراق أعلى .

الوقود Fuel

إحدى المزايا الجيدة للتوربينات الغازية هي المرونة في إستخدام أنواع مختلفة من الوقود . حيث يمكن تصميمها لإستخدام أي غاز قابل للإشتعال تقريبا أوالمشتقات النفطية الخفيفة مثل البنزين (البترول) والديزل والكيروسين (الكاز أو زيت البارافين) التي تكون متوفرة محليا ، وعلى الرغم من أن الغاز الطبيعي هو الوقود الأكثر إستخداما . فأنه يمكن إستخدام النفط الخام والزيوت الثقيلة الأخرى لتغذية التوربينات الغازية إذا تم تسخينها أولا لتقليل لزوجتها إلى مستوى مناسب للإحتراق في غرف الإحتراق .

تطبيقات Applications

يمكن إستخدام التوربينات الغازية لتوليد الطاقة على نطاق واسع . ومن الأمثلة على ذلك ، التطبيقات التي تقدم ٦٠٠ ميكاواط أو أكثر ناتج من توربين غازي بقدرة ٤٠٠ ميكاواط مركب مع توربين بخاري بقدرة ٢٠٠ ميكاواط في نظام التوليد المركب أو المشترك Co-generating . هذه الأنظمة لا تستخدم عادة لتوليد الكهرباء كحمل أساسي Base Load ، ولكن لجلب القدرة إلى المواقع البعيدة مثل حقول النفط والغاز . ومع ذلك ، فإنها تستخدم في شبكات الكهرباء الرئيسية عند تطبيقات أحمال الذروة لتوفير طاقة الطوارئ .

يمكن إستيعاب مجموعات أو وحدات التوربينات الغازية منخفضة القدرة التوليدية ذات السعات حتى ٥ ميكاواط في حاويات متنقلة Mobile Units لتوفير إمدادات الطاقة الكهربائية في حالات الطوارئ والتي يمكن توصيلها بالشاحنات إلى منطقة الحاجة .

القضايا والمشاكل البيئية Environmental Issues

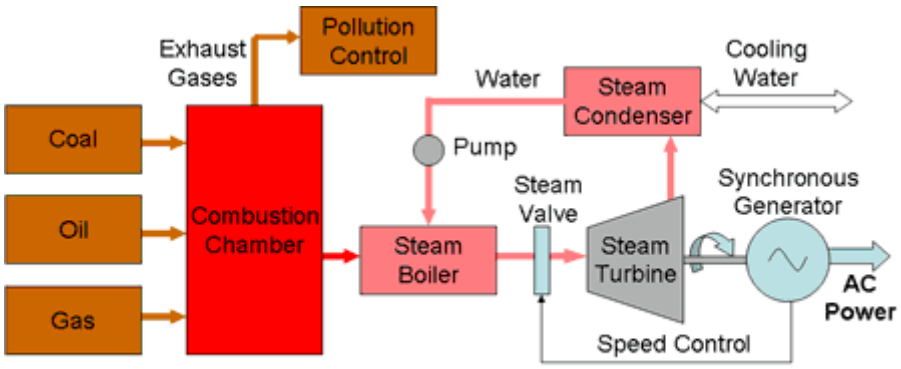
تقريبا جميع محطات التوربينات الغازية تستخدم الوقود الأحفوري Fossil Fuels .

محطات التوربين البخاري لتوليد الطاقة الكهربائية
Steam Turbine Electricity Generation Plants

تم تصميم وتصنيع أول منظومة عملية لتوليد الكهرباء بإستخدام التوربين البخاري من قبل تشارلز بارسونز Charles Parsons في عام ١٨٨٥ وأستخدمت لإضاءة معرض في مدينة نيوكاسل . ومنذ ذلك الحين ، وبغض النظر عن التوسع ، لم يتغير تصميم التوربينات ، ولم يكن تصميم بارسونز الأصلي يبدو مختلفا كثيرا عن تصاميم اليوم . على الرغم من إدخال العديد من التقنيات البديلة في السنوات الـ ١٢٠ المتداخلة ، ما زال أكثر من ٨٠ بالمائة من كهرباء العالم تولد عن طريق التوربينات البخارية التي تقود المولدات الدوارة .

عمليات تحويل الطاقة The Energy Conversion Processes

يتضمن توليد الطاقة الكهربائية بإستخدام التوربينات البخارية ثلاثة تحويلات للطاقة حيث يتم إستخراج الطاقة الحرارية Thermal Energy من الوقود وإستخدامها في تسخين الماء لإنتاج البخار ، ثم تحويل الطاقة الحرارية للبخار إلى طاقة حركية Kinetic Energy في التوربين وأخيرا يتم إستخدام مولد دوار لتحويل الطاقة الميكانيكية Mechanical Energy للتوربين إلى طاقة كهربائية Electrical Energy .



Fossil Fuel Powered Steam Turbine Electricity Generation

توليد البخار (المصادر الحرارية) Raising steam (Thermal Sources)

يتم توليد البخار في الغالب من مصادر الوقود الأحفوري ، ثلاثة منها موضحة في المخطط أعلاه ولكن يمكن إستخدام أي مصدر مناسب للحرارة .

التحول الكيميائي Chemical Transformation

في محطات الوقود الأحفوري يتم توليد أو إنتاج البخار عن طريق حرق الوقود (ومعظمه من الفحم ولكن أيضا النفط والغاز) في غرفة الاحتراق . وقد تم إستكمال هذه الأنواع من الوقود مؤخرا بكميات محدودة من الوقود الحيوي (البيولوجي) المتجدد والمخلفات أو النفايات الزراعية .

العملية الكيميائية لإحتراق الوقود تطلق الحرارة عن طريق التحول الكيميائي (الأكسدة Oxidation) للوقود . عملية التحول هذه لا يمكن أبدا أن تكون مثالية . فبسبب الشوائب الموجودة في الوقود سيكون الإحتراق غير كامل في غرفة الاحتراق والمرجل وبالتالي حدوث خسائر في الحرارة والضغط ، وعادة ما تصل هذه الخسائر إلى حوالي ١٠٪ من الطاقة المتاحة في الوقود .

القدرة النووية Nuclear Power

يمكن إنتاج البخار لغرض تدوير التوربين عن طريق الحرارة الناتجة عن الانشطار النووي الخاضع للرقابة والسيطرة . وسيتم مناقشة ذلك بشكل كامل في القسم الخاص بالقدرة النووية .

الطاقة الشمسية Solar Power

وبالمثل ، يمكن استخدام الطاقة الحرارية للشمس Solar Thermal Energy لإنتاج البخار ، على الرغم من أن هذا أقل شيوعا .

الطاقة الحرارية الأرضية Geothermal Energy

كما تستخدم إنبعاثات البخارمن طبقات المياه الجوفية التي تحدث بشكل طبيعي لتشغيل وحدات توليد الطاقة من التوربينات البخارية .

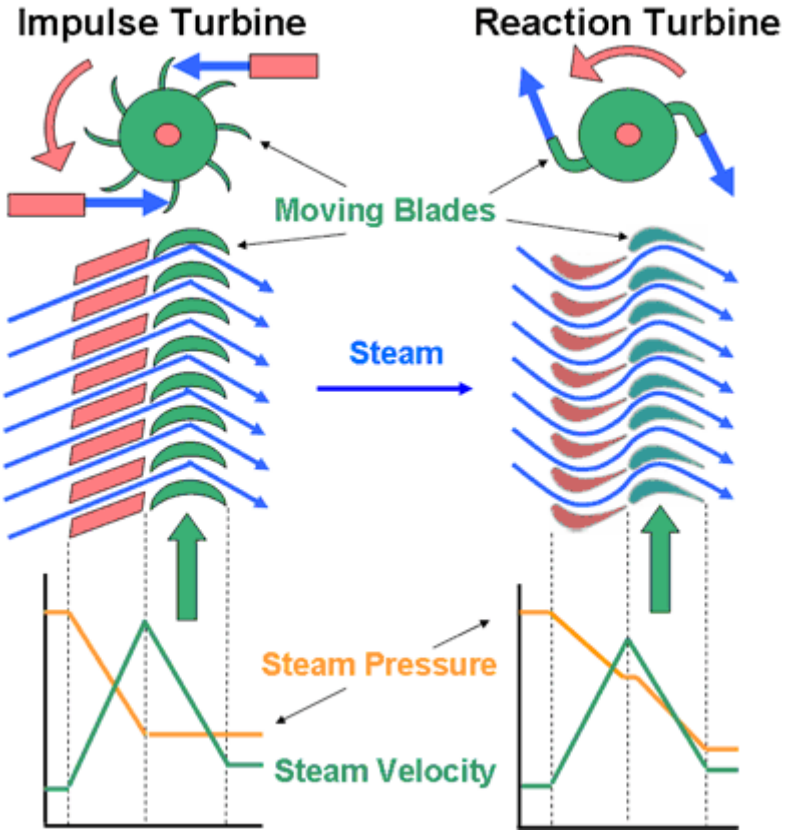
التوربين البخاري (المحرك الرئيسي) Steam Turbine (Prime Mover)

مبادئ العمل Principles of action

يتم تغذية بخار الضغط العالي للتوربين ومروره على طول محور التوربين من خلال صفوف متعددة من الريش الثابتة والمتحركة بالتعاقب . من مدخل التوربين إلى نقطة العادم ، يتوسع ويكبر حجم الريش وتجويف التوربين بشكل تدريجي للسماح بتمدد البخار .

تعمل الريش الثابتة كفوهات Nozzles يتمدد فيها البخار ويتزايد سرعته ولكن بضغط منخفض ، (مبدأ برنولي Bernoulli للحفاظ على الطاقة - زيادة الطاقة الحركية مع انخفاض طاقة الضغط) . عندما يؤثر البخار على الريش المتحركة ، فإنه ينقل بعضا من طاقته الحركية إليها .

هناك نوعان أساسيان من التوربينات البخارية ، التوربينات الدفعية (النبضية) Impulse Turbines وتوربينات الرد فعلية Reaction Turbines ، والتي صممت ريشها للتحكم في سرعة وإتجاه وضغط البخار أثناء مروره خلال التوربين .



التوربينات الدفعية Impulse Turbines

يتم توجيه النفثات البخارية (تيارات سريعة وقسرية من البخار) Steam Jets إلى ريش المحور التي تكون على شكل دلو حيث يؤدي الضغط الذي تمارسه النفثات إلى تدوير محور التوربين Rotor و تقليل سرعة البخار حيث أنه ينقل طاقة حركته إلى الريش والتي بدورها تقوم بتغيير إتجاه تدفق البخار ، ومع ذلك يظل ضغط البخارثابتا أثناء مروره من خلال ريش التوربين ، نظرا لأن المقطع العرضي للفجوة (الحجرة) بين الريش يكون ثابتا . لذلك تُعرف التوربينات الدفعية بتوربينات الضغط الثابت .

تعكس السلسلة التالية من الريش الثابتة إتجاه تدفق البخار قبل أن يمرر إلى الصف الثاني من الريش المتحركة .

التوربينات الرد فعلية Reaction Turbines

تتشكل ريش المحور الدوار للتوربين الرد فعلي بشكل أشبه بسطوح أنسيابية (مقطع جناحي) ، مرتبة بحيث يتناقص المقطع العرضي للحجرات (الفجوات) الموجودة بين الريش الثابتة إبتداءا من جانب المدخل نحو جانب العادم من الريش . وتشكل الحجرات بين ريش المحور بشكل أساسي فتحات أو فوهات Nozzles بحيث يتقدم البخار عبر الحجرات فتزداد سرعته بينما ينخفض ضغطه في نفس الوقت ، كما هو الحال في الفوهات التي تشكلها الريش الثابتة . وبالتالي ينخفض الضغط في كل من الريش الثابتة والمتحركة . عندما ينبثق البخار في منفث من بين ريش المحور الدوار ، فإنه يُحدث قوة رد فعل على الريش التي بدورها تُحدث عزم دوران على المحور الدوار للتوربين ، تماما كما في محرك هيرو البخاري Hero's steam engin ، (قانون نيوتن الثالث Newton's Third Law - لكل فعل يوجد رد فعل مساوي ومعاكس) .

ملاحظة توضيحية : هيرو (أو هيرون) السكندري Heron of Alexandria (عاش في منتصف القرن الأول للميلاد) هو رياضي وفيزيائي ومهندس يوناني . اشتهر بدراساته في الميكانيك والخصائص الميكانيكية للغازات . و محرك هيرو البخاري هو توربين بخاري شعاعي بسيط بدون ريش يدور عندما يتم تسخين الحاوية المركزية للمياه . يتم إنتاج عزم الدوران بواسطة طائرات بخارية تخرج من التوربين و يتم إنتاج عزم الدوران بواسطة منافث بخارية تخرج من التوربين .

المكثف The Condenser

يتم تكثيف بخار العادم من توربين الضغط المنخفض إلى الماء في داخل المكثف حيث تُستخرج الحرارة الكامنة للتبخير Latent heat of Vaporization من البخار . وهذا يتسبب في أن يصل حجم البخار إلى الصفر ، وأنخفاض الضغط بشكل كبير إلى ظروف الفراغ Vacuum Conditions تقريبا ، وهكذا فإن زيادة هبوط الضغط عبر التوربين يُتيح أستخراج أكبر كمية طاقة من البخار . ثم يتم ضخ البخار المتكثف مرة أخرى ألى المرجل كمياه تغذية Feed-Water لإستخدامها مرة أخرى .

وغني عن القول أن أنظمة التكثيف تحتاج إلى إمدادات ثابتة وكافية من مياه التبريد التي يتم توفيرها في دورة منفصلة من برج التبريد Cooling Tower الذي يقوم بتبريد مياه تبريد المكثف عن طريق التلامس المباشر مع الهواء وتبخير جزء من مياه التبريد في برج مفتوح .

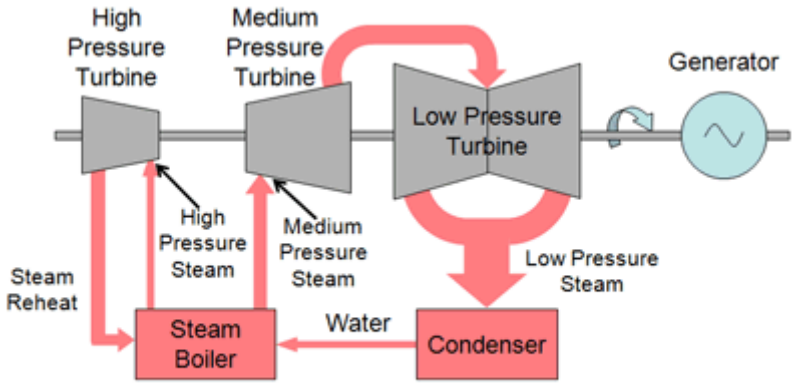
إن بخار الماء الذي يُشاهد متصاعدا من محطات توليد الطاقة هو تبخر مياه التبريد ، وليس مائع التشغيل Working fluid .

توربينات الضغط المرتد Back-Pressure Turbines

تُستخدم في الغالب لتوليد الكهرباء في العمليات الصناعية ، ولا تستخدم المكثفات مع هذه التوربينات . لذلك تُسمى أيضا التوربينات الهوائية أو غير المتكثفة Atmospheric or Non- Condensing Turbines ، فهي لا تهدر الطاقة الموجودة في البخار الخارج من عادم التوربين ، ولكن بدلا من ذلك يتم تحويلها للإستخدام في التطبيقات التي تتطلب كميات كبيرة من الحرارة مثل معامل التكرير (المصافي) ومصانع الورق ومحطات تحلية المياه ووحدات التدفئة المناطقية . وقد تُستخدم هذه الصناعات أيضا البخار المتاح أو المتوفر لتشغيل المحركات الميكانيكية للمضخات والمراوح ومناولة المواد Materials handling . وبالطبع يجب أن يكون كل من المرجل والتوربين يعملان في طاقتهما الأنتاجية القصوى من أجل التعويض عن الطاقة المحولة للإستخدامات الأخرى .

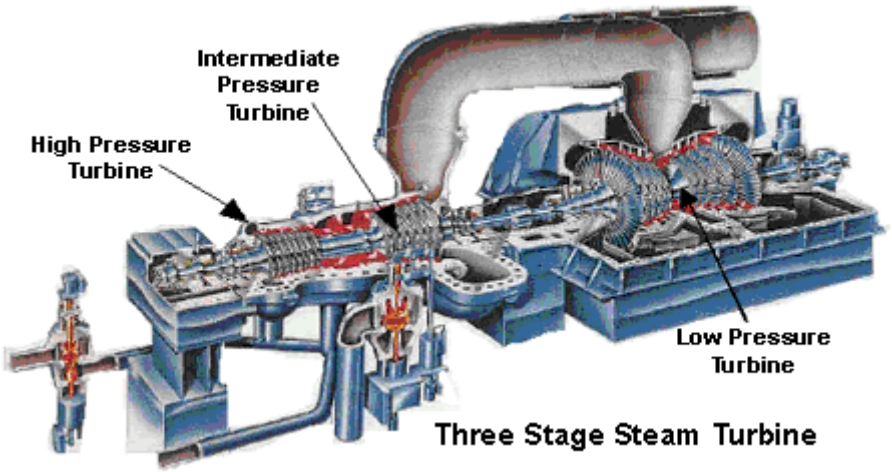
المكائن العملية Practical Machines

التوربينات البخارية تأتي في العديد من التكوينات والتصاميم . عادة ما يتم بناء المكائن والآلات الكبيرة بمراحل متعددة Multiple stages لزيادة نقل وتحويل الطاقة من البخار .



Multi Stage Steam Turbine Generator

لتقليل القوى المحورية Axial Forces على محامل محور التوربين Turbine rotor bearings ، يمكن تغذية البخار إلى داخل التوربين عند منتصف النقطة على طول المحور لكي يتدفق في إتجاهين متعاكسين بإتجاه كل طرف من المحور ، وبالتالي يتم موازنة الحمل المحوري .



Three Stage Steam Turbine

Source: Government of Australia

تُعد القدرة الناتجة من التوربينات التي تبلغ ١٠٠٠ ميكاواط أو أكثر نموذجية لمحطات توليد الكهرباء .

التوربين البخاري كمحرك حراري The Steam Turbine as a Heat Engine

تُعد أنظمة التوربينات البخارية في الأساس محركات حرارية لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية عن طريق تبخير مائع التشغيل وتكثيفه خلال عمليات متعاقبة في نظام مغلق Closed System يُعرف بأسم دورة رانكين Rankine Cycle . هذه دورة ديناميكية حرارية عكسية يتم فيها أضافة حرارة ألى مائع التشغيل في المبخر ، لغرض تبخيره ، ثم لزيادة درجة حرارته وضغطه . يتم تغذية البخار ذو درجة الحرارة العالية إلى محرك حراري (توربين) ، حيث يتم نقل طاقته إلى ريش محور التوربين مما يتسبب في دوران المحور بسبب تمدد Expansion البخار مع هبوط ضغطه ودرجة حرارته . ثم يتم تكثيف البخار الخارج من التوربين وضخه في شكل سائل مغذي للمبخر .

في هذه الحالة يكون مائع التشغيل عبارة عن ماء ويكون البخار بخارا ولكن المبدأ ينطبق على موائع التشغيل الأخرى مثل الأمونيا Ammonia الذي يمكن إستخدامه في تطبيقات درجة الحرارة المنخفضة مثل الأنظمة

الحرارية الأرضية Geothermal Systems . وبالتالي فإن مائع التشغيل في دورة رانكين يتبع دورة مغلقة ويتم إعادة إستخدامه بإستمرار .
تتحدد كفاءة المحرك الحراري فقط بفارق درجات الحرارة لمائع التشغيل بين مدخل ومخرج المحرك Input and Output of the Engine (قانون كارنوت Carnot's Law) .

أظهر كارنوت أن أقصى كفاءة متاحة تساوي ($\mathbf{1 - T_c / T_h}$) حيث أن Th (بوحدة درجة كلفن K) هي درجة حرارة مائع التشغيل في أسخن حالاته (بعد إضافة الحرارة له) و Tc (بوحدة درجة كلفن K) هي درجة حرارته في أبرد حالاته (بعد أن تم إزالة الحرارة منه) .
لزيادة الكفاءة ، يمكن أن تصل درجة حرارة البخار المغذي للتوربين إلى (٩٠٠ درجة مئوية °C) ، في حين يستخدم المكثف عند مخرج التوربين لتقليل درجة حرارة وضغط البخار إلى أقل قيمة ممكنة وذلك بتحويله مرة أخرى إلى ماء . يعتبر المكثف مكونا أساسيا ضروريا لزيادة كفاءة المحرك البخاري عن طريق زيادة الفرق في درجة حرارة مائع التشغيل في الماكينة إلى أقصى حد .
بإستخدام قانون كارنوت لمنظومة توربين بخاري نموذجي مع درجة حرارة دخول البخار تبلغ (٥٤٣ درجة مئوية) (٨١٦ كلفن) ودرجة حرارة الماء المتكثف تبلغ (٢٣ درجة مئوية) (٢٩٦ كلفن) ، يمكن حساب الكفاءة النظرية القصوى على النحو التالي :
Carnot efficiency = (816 - 296) / 816 = 64% كفاءة كارنوت

ولكن هذه الكفاءة لم تأخذ في نظر الإعتبار الحرارة و الإحتكاك و خسائر الضغط في المنظومة . لذل فأن القيمة الأكثر واقعية لكفاءة التوربين البخاري ستكون حوالي ٥٠٪ . وهكذا فإن المحرك الحراري مسؤول عن معظم خسائر تحويل الطاقة في المنظومة .
ملاحظة : هذه الكفاءة تشمل فقط كفاءة تحويل الطاقة الحرارية في البخار إلى طاقة ميكانيكية على محور التوربين . ولا تشمل خسائر الكفاءة في غرفة الإحتراق والمرجل الذي لا يتم فيها تحويل الطاقة الكيميائية للوقود إلى طاقة حرارية في البخار وكذلك لا تشمل خسائر الكفاءة التي تحدث في المولد إذا تم استخدام التوربين البخاري لتوليد الكهرباء . ومع أخذ هذه الخسائر في الحسبان ، فإن الكفاءة الكلية لتحويل الطاقة الكيميائية للوقود إلى الطاقة الكهربائية في محطات تستخدم الفحم والنفط كوقود تشغيلي ، عادة ما تكون حوالي ٣٣٪ .

نقل الطاقة الكهروميكانيكية (المولدة) Electromechanical Energy Transfer (Generator)
يقود التوربين البخاري المولدة ، لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية . عادة المولدة ستكون آلة تزامن ذو مجال دوار Rotating Field Synchronous Machine . يمكن أن تصل كفاءة تحويل الطاقة لهذه المولدات ذات السعة العالية High capacity إلى ٩٨٪ أو ٩٩٪ لآلة أو ماكينة كبيرة جدا .
ملاحظة : هذا يعني أن مولدة ذات سعة (١٠٠٠ميكاواط) يجب أن تبدد ٢٠ ميكاواط من الحرارة المهدورة Waste heat وتتطلب مثل هذه المولدات تقنيات تبريد خاصة .

المنظومات المساعدة Auxiliary Systems
بصرف النظرعن محطة أنتاج البخار وتوليد الكهرباء ، هناك العديد من منظومات التحكم الأوتوماتيكية الأساسية و المنظومات المساعدة الإضافية Ancillary systems الضرورية للحفاظ على تشغيل المحطة بأمان وعند سعتها المثلى Optimum capacity. وتشمل هذه المنظومات :
- مطابقة إنتاج الطاقة بالقياس إلى الطلب ، التحكم والسيطرة على التيار الكهربائي .
- الحفاظ على جهد (فولتية) وتردد النظام System Voltage and Frequency .
- الحفاظ على مكونات المحطة ضمن الحدود التشغيلية من ضغط ودرجة حرارة وسرعة .
- منظومات التزييت Lubrication Systems .
- تغذية الوقود إلى غرفة الإحتراق وإزالة الرماد .
- مضخات الماء ومراوح الهواء .

• التلوث Pollution ، السيطرة - وفصل المواد (نواتج الإحتراق) الضارة من إنبعاثات غازات العادم .
• تبريد المولدة .
• معدات نقل الطاقة الكهربائية ، وتشمل المحولات Transformers و معدات وأجهزة الجهد العالي للتحويل والعزل والتوصيل High voltage switching .
• حماية التحميل الزائد (فرط التحميل) Overload Protection ، التوقف الأضطراري Emergency Shut down وأيقاف وتخفيض الحمل Load Shedding .

إمدادات الطاقة الكهربائية التقليدية والمستدامة (الدائمية) - نظرة عامة

Conventional and Sustainable Electrical Energy Supply - Overview

خصائص ومقارنات Characteristics and Comparisons

مصادر الطاقة الكهربائية الأولية Primary Electrical Energy Sources

تتوفر الطاقة من مصادر عديدة ، ومع ذلك فإن معظم الطاقة المستخدمة لتلبية الطلب العالمي المتزايد على الكهرباء لا تزال مستمدة من الوقود الأحفوري Fossil Fuels . هناك مشكلتين في إستمرار الإعتماد على الوقود الأحفوري وهي :

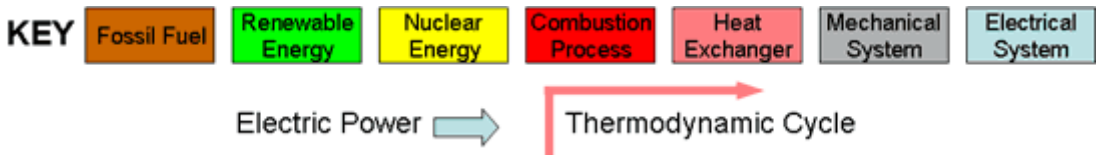
• في المستقبل سوف تنفد الإمدادات المحدودة من الوقود الأحفوري .
• يؤدي حرق الوقود الأحفوري إلى ظهورغازات الإحتباس الحراري Greenhouse Gases التي تسبب إرتفاع درجة حرارة الكرة الأرضيّة (دفء كوني) Global Warming مع مشاكلها المتعلقة بالتغير المناخي .

يُظهر القسم الخاص بمصادر الطاقة العديد من مصادر الطاقة البديلة التي يمكن إستخدامها لتوليد الكهرباء بالإضافة إلى محتوى الطاقة المرتبط بها ، ويشير إلى الإستخدام الفعلي لهذه المصادر . تلخص هذه الصفحة الطرق المختلفة التي يمكن بها إستخدام المصادر لغرض توليد الكهرباء .

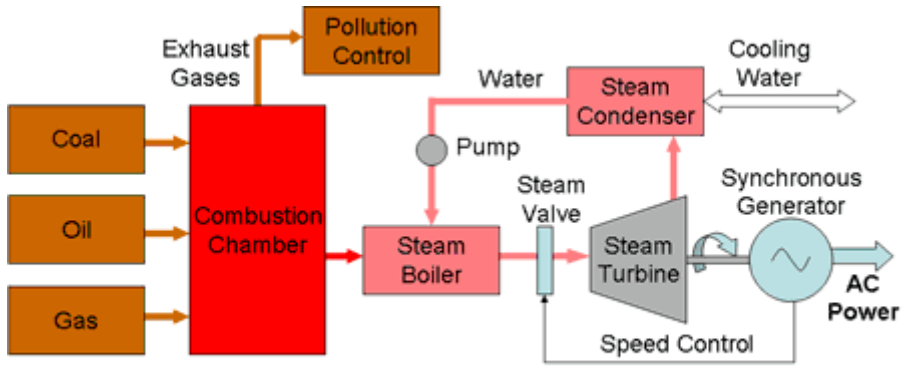
تحويل مصادر الطاقة إلى طاقة كهربائية قابلة للإستخدام

Turning Energy Resources into Usable Electric Power

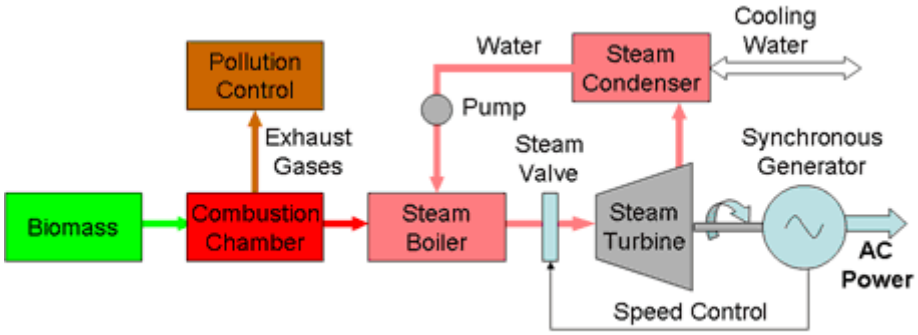
يتم توليد معظم الطاقة الكهربائية بإستخدام معدات دوارة لقيادة المولد ولكن هناك العديد من الإحتمالات الأخرى المخططات أدناه توضح ٢٩ طريقة أساسية لتوليد الطاقة الكهربائية ولكن هناك العديد من المتغيرات على كل من هذه الطرق . يشير المفتاح إلى التقنيات المعنية .



Conventional Steam Turbine Plants

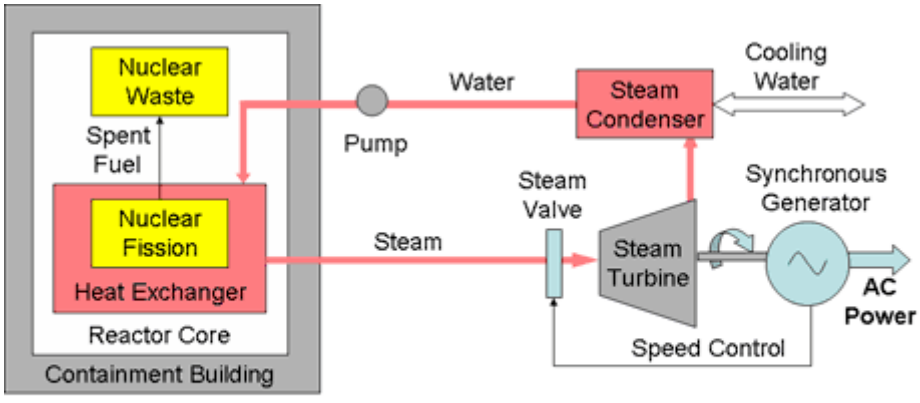


Fossil Fuel Powered Steam Turbine Electricity Generation



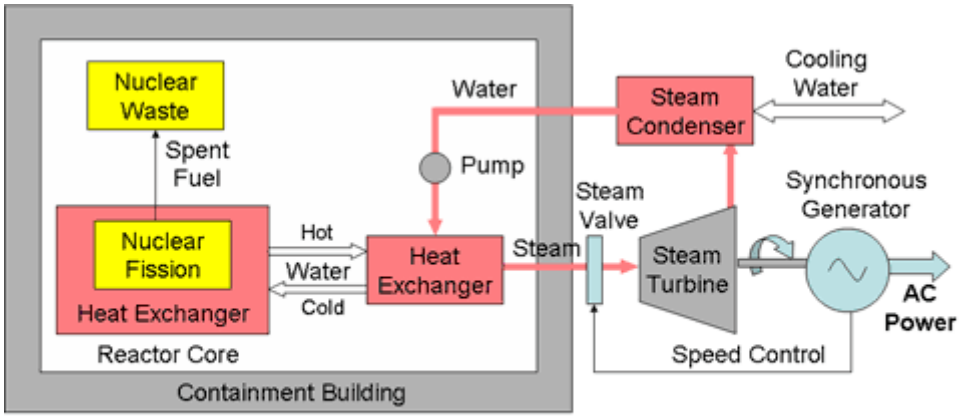
Electricity Generation Powered by Biomass

Nuclear Power



Boiling Water Reactor (Single Stage Heat Transfer)

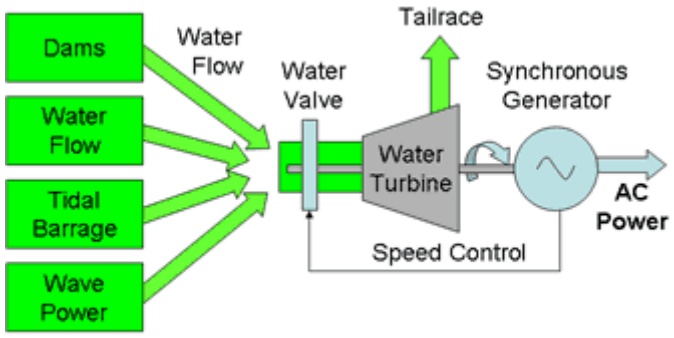
Electricity Generation by Nuclear Power



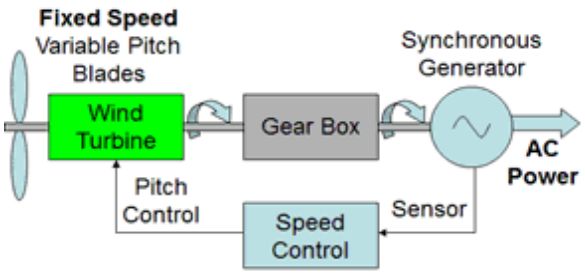
Pressurised Water Reactor (Two Stage Heat Transfer)

Electricity Generation by Nuclear Power

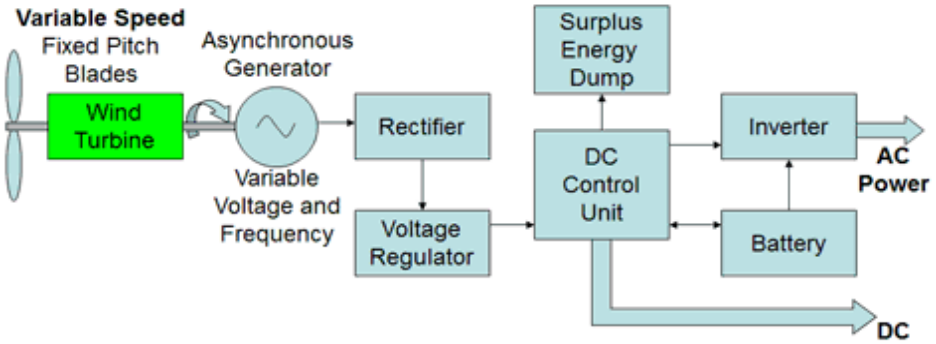
Harvesting Natural Energy Flows



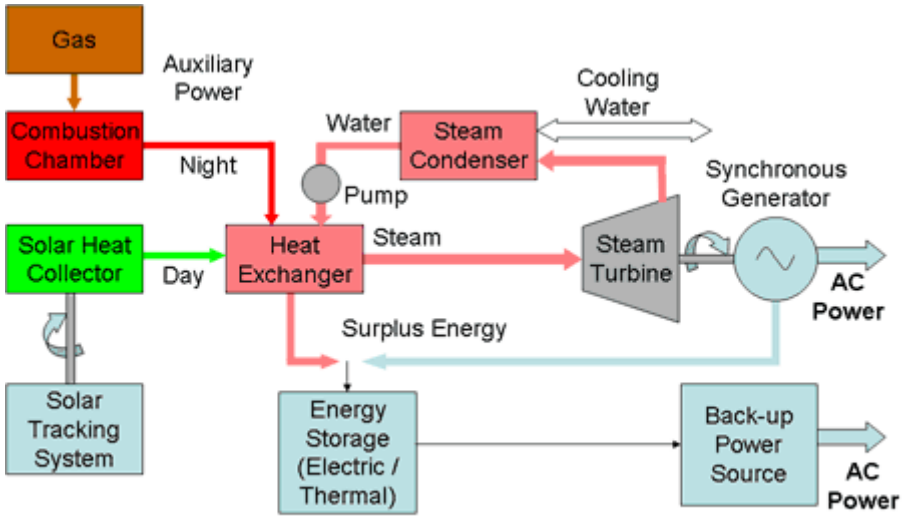
Hydro Electric Power Generation



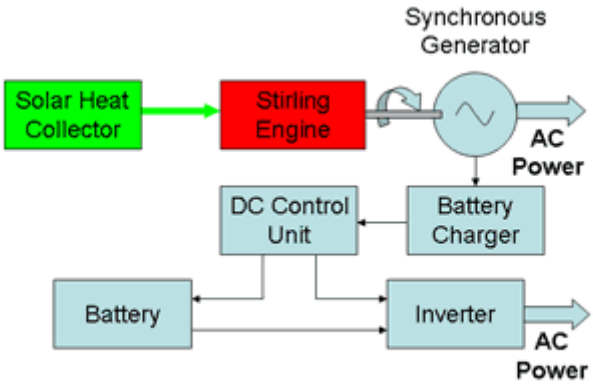
Large Scale Wind Power (Grid Systems)



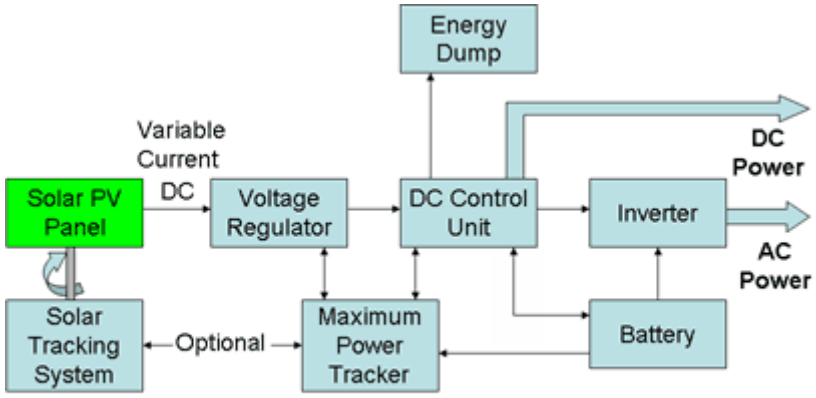
Small Scale Wind Power (Domestic Systems)



Large Scale Electric Power from Solar Thermal Energy

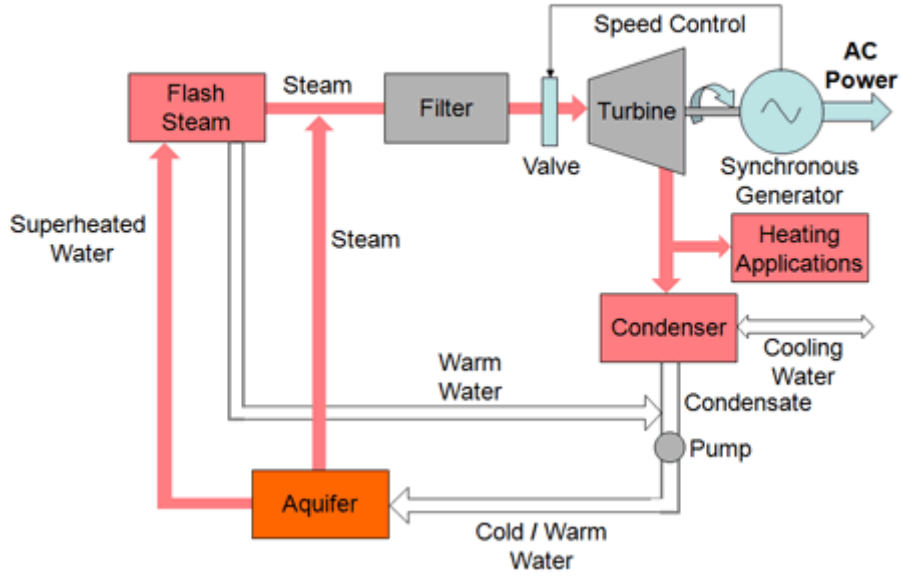


Small Scale Electric Power from Solar Thermal Energy

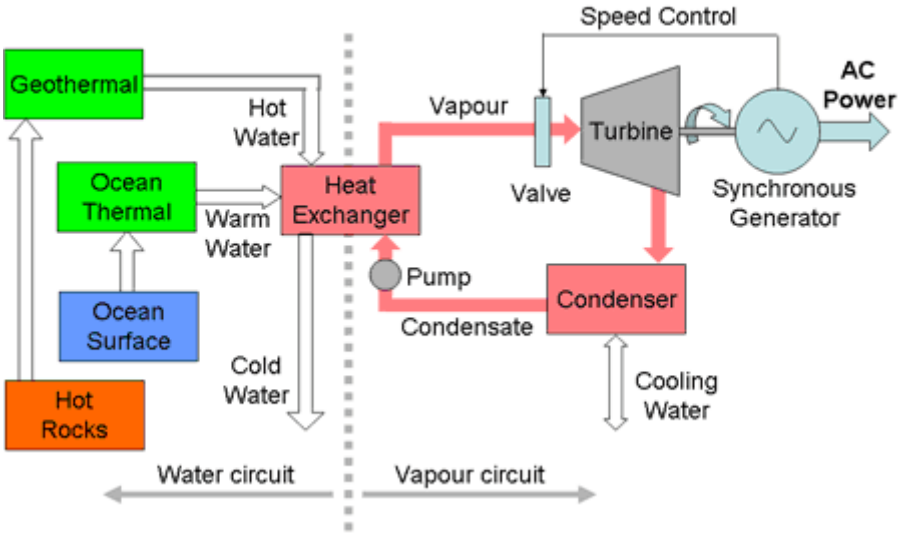


Photovoltaic Electric Power Generation

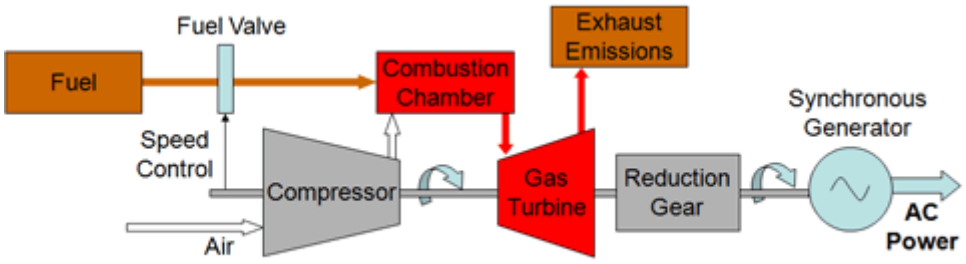
Geothermal Electric Power Generation
Dry Steam and Flash Steam Systems



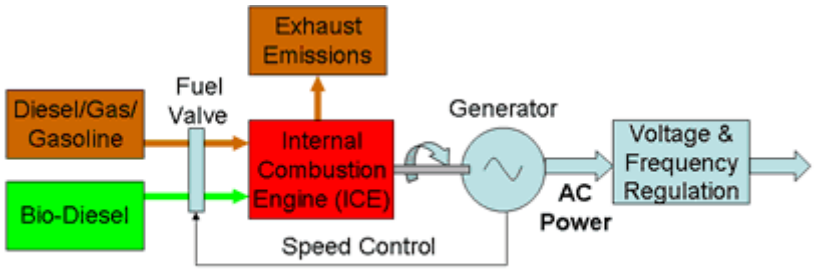
Geothermal Electric Power Generation (Binary System)



Emergency and Remote Power Plants

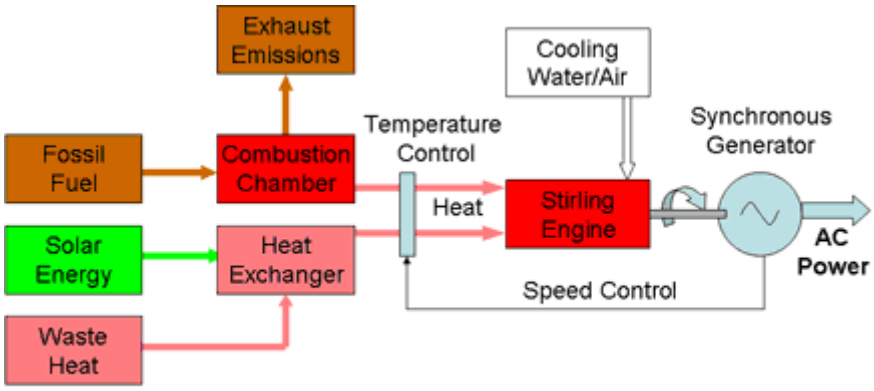


Gas Turbine Electric Power Generation



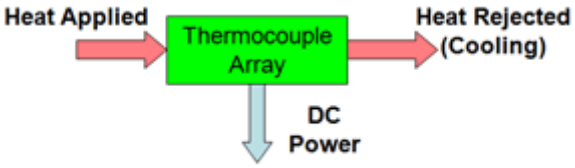
Electric Power Generation by Internal Combustion Engine (ICE)

The Stirling Engine

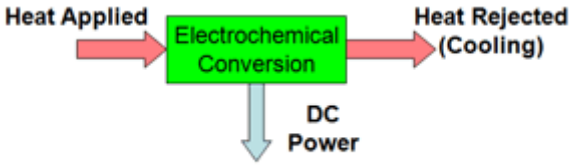


Electric Power Generation by External Combustion Engine

Direct Heat to Electricity Conversion - Thermoelectric Generators (TEG)

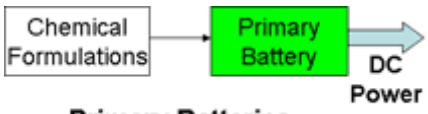


Thermocouple Electric Generators (TEGs)

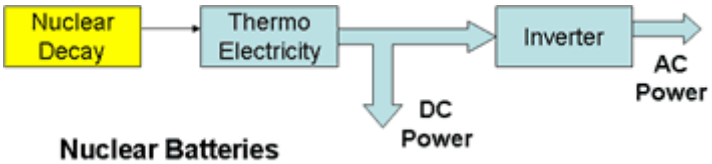


Alkali Metal Thermal Electric Converter (AMTEC)

Electrochemical Energy

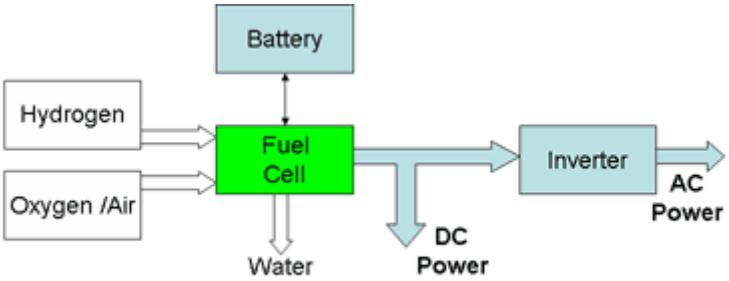


Primary Batteries

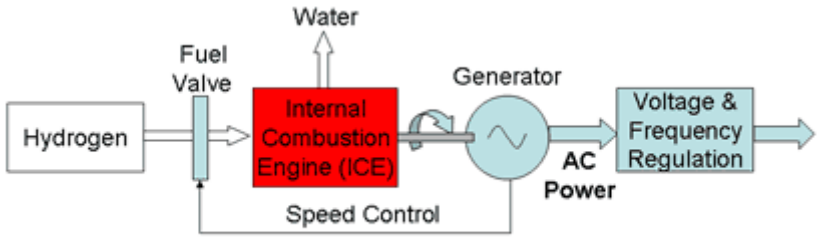


Nuclear Batteries

Hydrogen Fuelled Electricity Generation

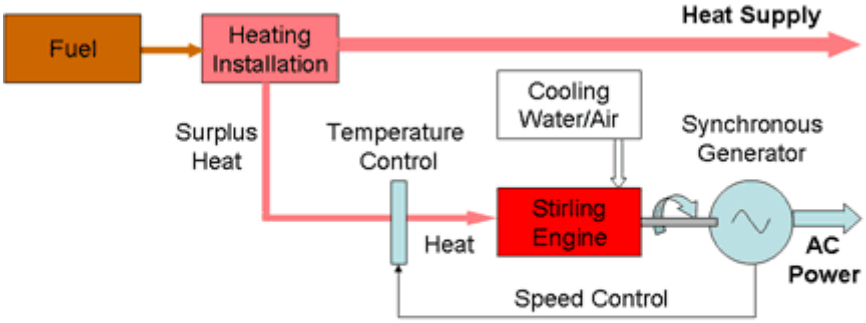


Fuel Cells

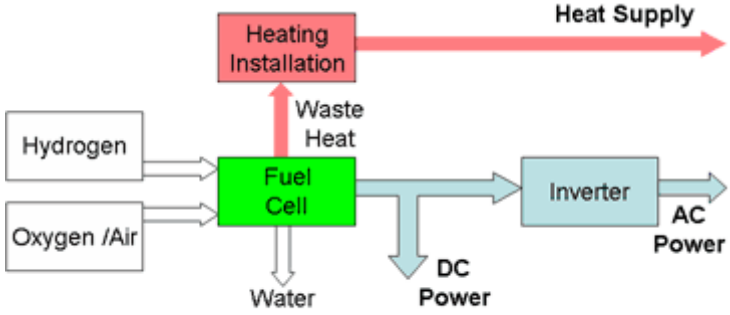


Hydrogen Powered Internal Combustion Engine (ICE) Generator

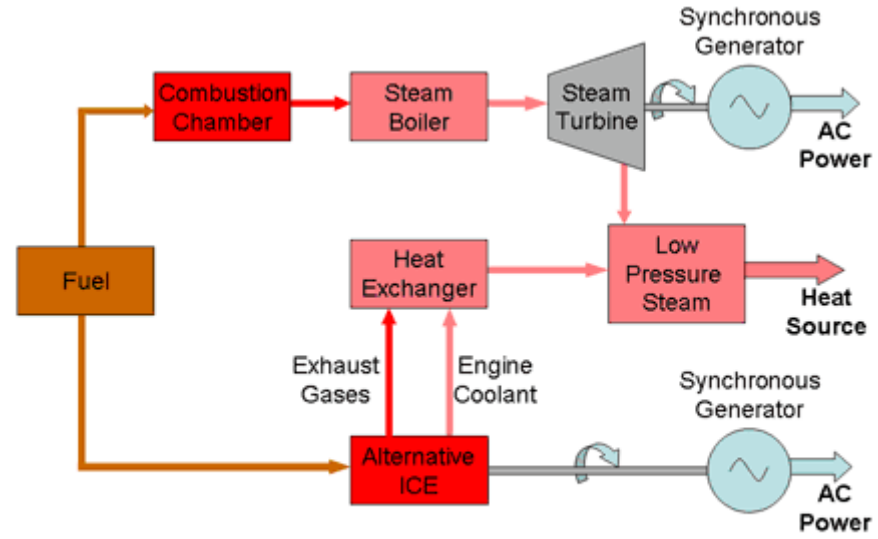
Hybrid Systems



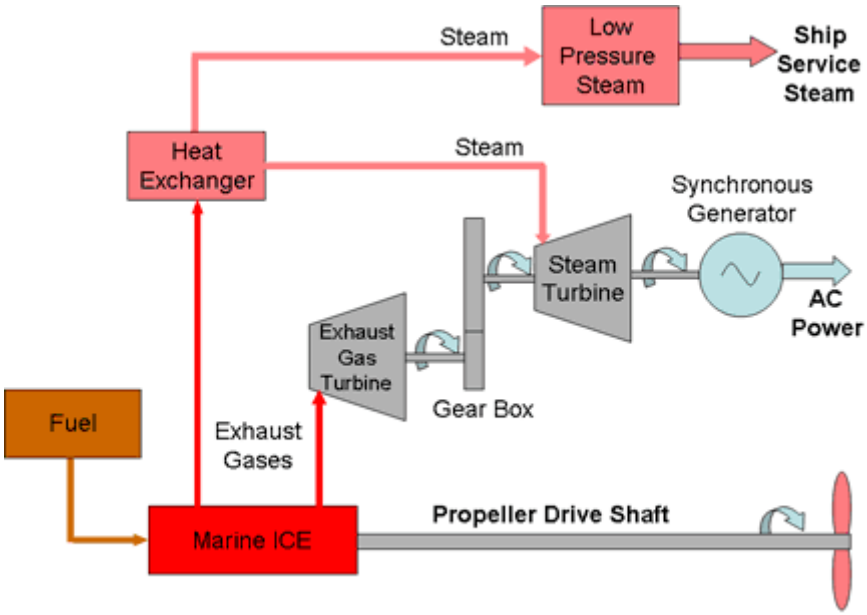
Combined Heat and Power (CHP)
Using Surplus or Waste Heat to Generate Electricity



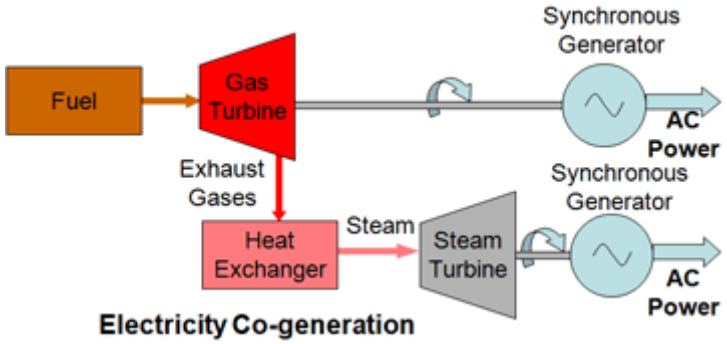
Fuel Cells used in CHP Applications



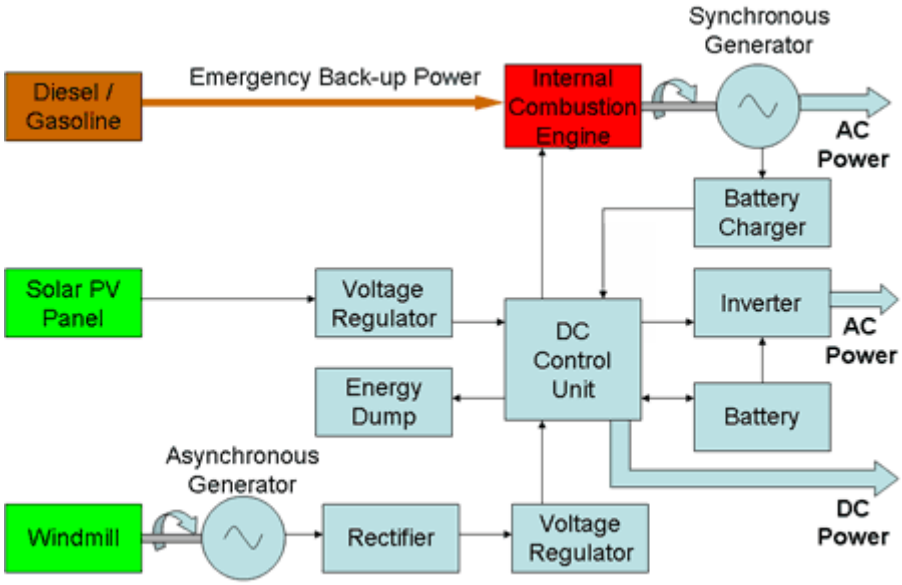
Combined Heat and Power (CHP)
Alternative Schemes for Capturing Waste Heat from Electricity Generation



Marine - Combined Heat and Power (CHP) Hybrid System

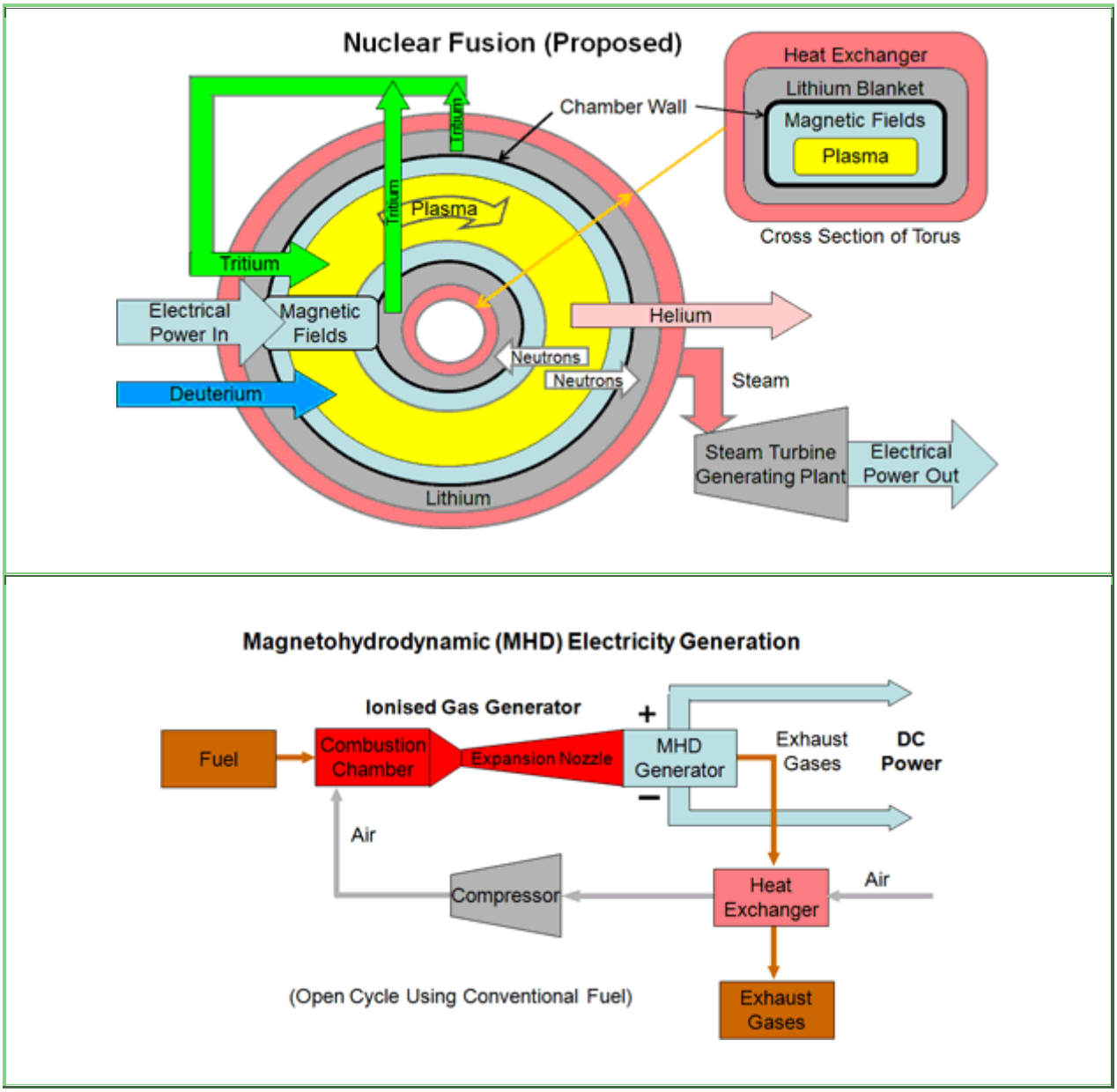


Electricity Co-generation



Remote Area Power Systems (RAPS)

Energy Futures



تجهيز الطاقة الكهربائية Electricity Supply

تم إجراء تقديرات مختلفة حول كميات الطاقة الكهربائية المتولدة سنويا في العالم . بعض الأرقام لعام ٢٠٠٤ موضحة هنا :

- 15,406 تيراواط . ساعة (كتاب حقائق العالم للمخابرات الأمريكية The World Factbook by CIA) .
  1 تيراواط . ساعة (TWh) = 10^9 كيلواط . ساعة (kWh) أو وحدات (Units)

- 16,600 تيراواط . ساعة (أدارة معلومات الطاقة الأمريكية EIA)
- 17,400 تيراواط . ساعة (منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية OECD Organisation for Economic Co-operation and Development)

هذه التقديرات تظهر فقط إستهلاك أو توليد الطاقة الكهربائية . وهي لا تُظهر مقدار الطاقة المستهلكة داخليا (ذاتيا) في توليد الكهرباء ولا من أين جُهزت ، ولا تُظهر الطاقة المستهلكة والتي لا يتم تحويلها إلى كهرباء مثل تلك المستخدمة للنقل أو التدفئة .

يتم توليد (٨٢ %) من كهرباء العالم بإستخدام أنظمة التوربينات البخارية . بعبارة بسيطة ، يتم إستخدام مرجل لتوليد البخار الذي يدير التوربين البخاري ، والمعروف أيضا بأسم المحرك الرئيسي Prime mover ، ويقوم التوربين البخاري بدوره بإدارة مولد كهربائي . يتم توليد البخار لإدارة هذه التوربينات عن طريق حرق الوقود الأحفوري Fossil fuels (٦٦ ٪) أو الطاقة النووية Nuclear power (١٦ ٪) . يتم التوازن في توليد الطاقة الكهربائية بواسطة الأنظمة المائية Hydro systems (١٧٪) مع الطاقة الشمسية Solar وطاقة الرياح Wind والكتلة الحيوية Biomass التي تشكل أقل من ٢٪ من الإجمالي .
المصدر - إدارة معلومات الطاقة الأمريكية EIA (2003) .

إن محطات التوليد البخارية المستخدمة لتوفير الحمل الأساسي للشبكة Grid's Base Load قابلة للتطبيق فقط كمنشآت واسعة النطاق تتطلب إحتياطات خاصة بسبب حجمها المادي الكبير والجهد العالي (الفولتيات العالية) High Voltages والتيارات المتضمنة .
تستخدم الأنظمة الصغيرة النطاق مجموعة متنوعة من مخططات التوليد البديلة التي يمكن أيضا تصميمها للأستخدام المحلي أو الداخلي Domestic use . ومن المفارقات أن محطات توليد الكهرباء الصغيرة النطاق يمكن أن تكون أكثر تعقيدا من محطة الطاقة العالية التي تزود الحمل الأساسي للشبكة الوطنية National Grid .
وبإستثناء الطاقة الكهرومائية والطاقة النووية ، فإن معظم محطات توليد الطاقة تقع بالقرب من المناطق التي تحتاج إلى الطاقة الكهربائية لغرض تقليل خسائر التوزيع Distribution Losses .

كفاءة الطاقة Energy Efficiency

سلسلة تجهيز الطاقة The Energy Supply Chain

يضيع الكثير من محتوى الطاقة لمصادر الطاقة المتاحة بسبب عدم كفاءة عمليات تحويل وتوزيع الطاقة . وبالنظر إلى الإضاءة الكهربائية المنزلية كمثال نموذجي ، فإن أقل من نسبة ١٪ من الطاقة المستهلكة لتوفير الكهرباء تتحول في النهاية إلى طاقة ضوئية . وتضيع أو تفقد النسبة الأخرى وهي ٩٩ ٪ الأخرى في سلسلة التحهيز . وبإستخدام المحطات التقليدية للتوليد التي تستخدم الوقود الأحفوري ، تكون الخسائر كما يلي :

- (١٠ %) من محتوى الطاقة للوقود تفقد في عملية الإحتراق Combustion ويتم نقل (٩٠ %) فقط من المحتوى الحراري Calorific Content إلى البخار .
- تُحدد كفاءة التوربين البخاري في تحويل محتوى الطاقة في البخار إلى طاقة ميكانيكية Mechanical Energy إلى حوالي (٤٠٪) . (قانون كفاءة كارنوت Carnot's Efficiency Law) .
- المولدات الكهربائية الدوارة تكون فعالة جدا وعالية الكفاءة بالمقارنة . حيث يمكن أن تصل كفاءة التحويل لمولدة كبيرة إلى (٩٨٪) أو (٩٩٪) .
- أنتقال الطاقة الكهربائية عبر شبكة التوزيع Distribution Grid بين محطة توليد الطاقة والمستهلك Consumer ينتج عنه فقدان للطاقة بنسبة (١٠٪) ويرجع ذلك أساسا إلى مقاومة الكابلات الكهربائية Electrical Cables .
- يتم فقدان طاقة إضافية بسبب كفاءة تحويل الطاقة للجهاز الموجود عند المستخدم (المستفيد) النهائي . الإضاءة المتوهجة غير فعالة بشكل خاص حيث تحول (٢ ٪) فقط من الطاقة الكهربائية إلى ضوء .

يتم النظر في الخسائر بمزيد من التفصيل أدناه.

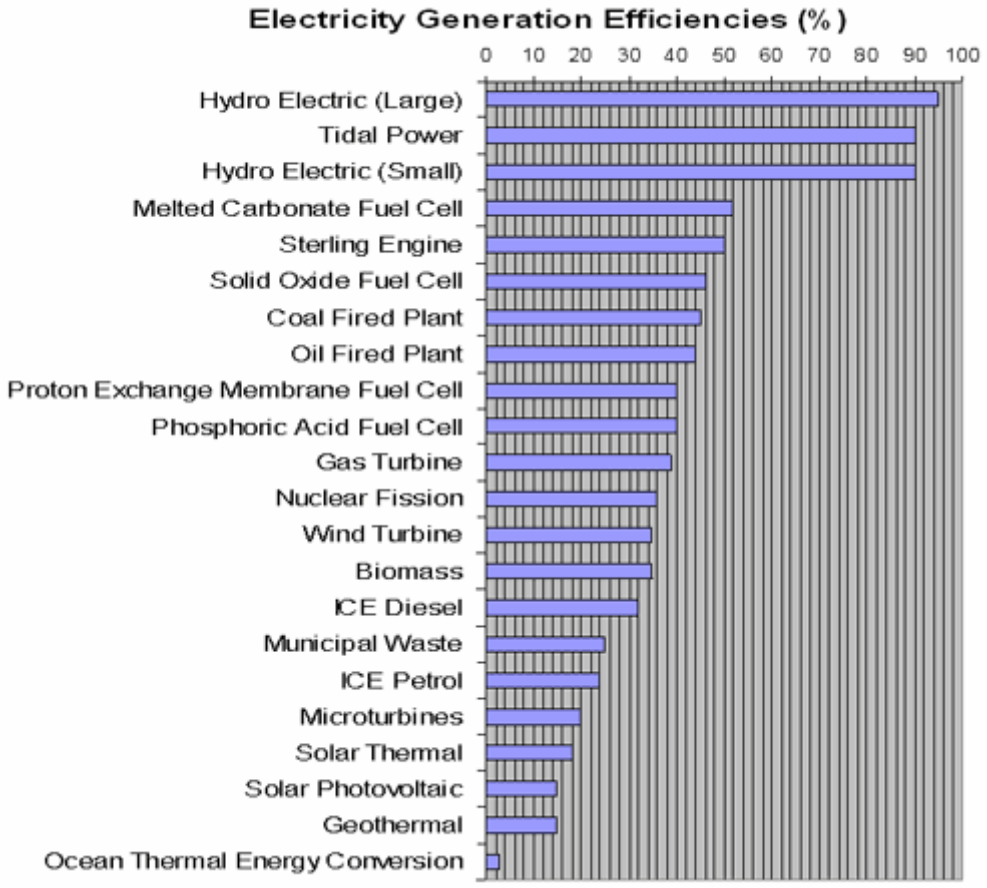
كفاءة التوليد Generation Efficiency

تُعرَّف كفاءة محطة توليد الطاقة الكهربائية (η) بأنها النسبة بين الطاقة الكهربائية المفيدة الناتجة من وحدة التوليد Useful Electricity Output ، في زمن محدد ، وقيمة الطاقة لمصدر الطاقة التي يتم تجهيزها للوحدة في نفس الفترة الزمنية .
لتوليد الكهرباء بإستخدام التوربينات البخارية يتم إهدار (٦٥ ٪) من جميع الطاقة الأولية المحهزة كحرارة .

يتم تعريف الحد الأقصى لكفاءة الطاقة النظرية بمزيد من التفصيل بواسطة دورة رانكين Rankine Cycle . بالنسبة للأنظمة العملية الحديثة فإن هذه النسبة تقارب (٤٠٪) ولكنها أقل بالنسبة لمحطات التوليد الأقدم .
أن الكفاءة ستنخفض أكثر من ذلك إذا تم أستخدام أنواع الوقود ذات المحتوى المنخفض من الطاقة مثل الكتلة الحيوية Biomass لتشغيل المحطة .

مقارنات الكفاءة Efficiency comparisons

يوضح الجدول أدناه الكفاءة النظرية لتحويل مختلف مصادر الطاقة من خلال طرق متنوعة إلى طاقة كهربائية مفيدة ..



المصدر : رابطة صناعة الكهرباء الأوروبية European Electricity Industry Association (Eurelectric)

كفاءة إستخدام المحطة Plant Utilisation Efficiency

من الناحية العملية ، نادرا ما تقدم أو تحقق منشآت توليد الطاقة الكهربائية سعتها النظرية على أساس كامل الوقت بسبب التغيرات في الطلب على الكهرباء والحاجة إلى إيقاف عمل المعدات Shut Down من وقت لآخر لغرض تنفيذ الصيانات المخططة لها أو الإصلاحات الطارئة Planned Maintenance or Emergency Repairs .
يتم إستخدام العوامل **Factor**s التالية للإشارة إلى فعالية محطات التوليد في إدارة قدرتها أو سعتها التوليدية من الطاقة الكهربائية :

عامل السعة Capacity Factor

عامل السعة هو مقياس لكفاءة التشغيل Operating Efficiency الذي يبين قدرة محطة التوليد على تحقيق سعتها الكاملة . إنه ببساطة يمثل الطاقة الفعلية المنتجة للمولد لفترة محددة مقسوما على الطاقة النظرية للمولد

إذا كانت تعمل بكامل طاقتها المقدرة و لنفس الفترة المحددة . وهو مؤشر غير مباشر على موثوقية التجهيز Reliability of Supply .

يخضع عامل السعة لمحطة طاقة تقليدية Conventional Power Plant تعمل بالوقود النووي Nuclear أو الفحم Coal للتحكم الإداري وقد يكون أكثر من (٨٠٪) ، في حين أن عامل السعة لمحطات الرياح أو محطات الطاقة الشمسية يعتمد على عناصر طبيعية Elements وعادة ما يكون أقل من (٤٠٪) ومع (٢٥٪) لا يُعتبر إستثنائي . هذا يعني أنه من المتوقع ، في أحسن الأحوال ، أن لا ينتج عن التوربينات الريحية Wind-Turbine التي تبلغ قدرتها (١٠٠٠ كيلو واط) إلا كمية من الطاقة في غضون عام واحد كقدرة (٥٠٠ كيلواط) من محطة توليد طاقة تعمل بالفحم ، وربما أقل من ذلك بكثير .

عامل الحمل Load Factor

عامل الحمل هو مقياس لإستخدام المحطة الذي يشير إلى مدى فعالية مطابقة قدرة المحطة مع طلب المستهلك في وقت حمل الذروة Peak Load . هي نسبة متوسط الحمل Average Load إلى حمل الذروة خلال فترة زمنية محددة . عامل الحمل الضعيف يشير إلى الإستخدام غير الفعال للمحطة ولرأس المال Capital .

الحمل الأساس Base Load

تعمل أنواع مختلفة من المولدات ضمن نطاق من عوامل الحمل المخطط لها والتي تحددها سياسات شركات التوليد العامة . عادة ما يتم تخطيط و جدولة محطات ذات كفاءة عالية لتوصيل الحمل الأساس للشبكة ، وهكذا يتم تشغيلها على أساس عامل حمل عالي جدا .

في المملكة المتحدة خلال عام ٢٠٠٤ ، كان لمحطات توليد الطاقة التي تعمل بالفحم عامل حمل حوالي ٦٢ % ومحطات توليد تعمل بالغاز بنسبة ٦٠ % ومحطات توليد تعمل بالطاقة النووية Nuclear Power Plants بنسبة ٧١ % ومحطات كهرومائية Hydroelectric Plants بنسبة ٣٧ % ومحطات التوليد المائية التي تستخدم ضخ المخزون المائي Pumped Storage Hydro Plants[1] بنسبة ١٠ % . وخلال نفس الفترة الزمنية ، بلغ متوسط إجمالي عامل الحمل لإجمالي الشبكة الكهربائية في المملكة المتحدة حوالي ٥٥ % .

المصدر: ملخص إحصاءات الطاقة في المملكة المتحدة Digest of UK Energy Statistics (DUKES) 2005

ملاحظة توضيحية [1] :

هناك نوع آخر من محطات الطاقة الكهرومائية ، تسمى محطة ضخ المياه المخزونة Pumped-storage plant . في محطة الطاقة الكهرومائية التقليدية ، يتدفق الماء من الخزان Reservoir عبر المحطة والمخارج وينساب بإستمرار إلى الأسفل . تحتوي محطة ضخ المياه المخزونة على خزانين :

الخزان العلوي - مثل محطات الطاقة الكهرومائية التقليدية ، يُحدث السد Dam خزانا . المياه في هذا الخزان تتدفق من خلال محطة الطاقة المائية لغرض توليد الكهرباء .

الخزان السفلي - تتدفق المياه الخارجة من محطة توليد الطاقة الكهرومائية إلى خزان منخفض بدلا من إعادة دخولها النهر وتدفقها في اتجاه مجرى النهر Downstream .

وبإستخدام التوربين القابل للإنعكاس Reversible turbine ، يمكن للمحطة ضخ المياه مرة أخرى إلى الخزان العلوي . يتم ذلك في وقت دون الذروة Off-peak hours . أساسا ، الخزان الثاني يعيد ملء الخزان العلوي . عن طريق ضخ المياه مرة أخرى إلى الخزان العلوي ، وبالتالي يكون هنالك المزيد من المياه لتوليد الكهرباء خلال فترات ذروة الإستهلاك Peak consumption

أحمال الذروة Peak Loads

عادة ما يكون لمحطات التوليد التي تجهز أحمال الذروة عامل حمل ضعيف جدا ، وغالبا ما يتم تحديد محطات قديمة وأقل كفاءة لهذا الغرض .

هامش أو حد المحطة Plant Margin

إن أستخدام الشبكة الكهربائية و بضمنها الوحدات التوليدية سيكون عن قصد أقل من السعة الكلية وذلك لضمان أمن التجهيز حتى عندما تكون بعض وحدات التوليد خارج الخدمة أو في حالة حدوث زيادات غير متوقعة في طلب العملاء (المستهلكين) .

تُعرف السعة الزائدة أو الفائضة المخططة Planned Excess Capacity بهامش أو حد المحطة .

هامش المحطة هو مؤشر على أمن التجهيز . وهو الكمية الذي تتجاوز بها السعة التصميمية على طلب الذروة المتوقعة ويتم التعبير عنها كنسبة مئوية . يعتبر هامش المحطة الذي لا يقل عن (٢٠٪) ضروريا لتجنب انقطاع التيار الكهربائي (التعتيم) Blackout والتحميل الزائد المحتمل على الشبكة الكهربائية . وهكذا ينتج عن هامش المحطة المرتفع عامل حمل منخفض Low load factor .

كفاءة توزيع الطاقة الكهربائية Electricity Distribution Efficiency

عوامل الفقد في التوزيع Distribution Loss Factors (DLF)

تؤدي مقاومة الكابلات لسريان التيار بين محطة التوليد ومباني المستخدم النهائي (المستهلك) إلى مزيد من الفقد في الكفاءة بسبب تسخين جول Joule Heating (I² R Losses) [2] لكابلات الطاقة المترابطة .

ملاحظة توضيحية [2] : تسخين جول نسبة إلى قانون جول للعالم جيمس جول ، المعروف أيضا باسم التسخين الأومي Ohmic Heating أو التسخين المقاوم Resistive Heating ، وهي العملية التي بواسطتها يتم إنتاج حرارة أثناء مرور تيار الكهربائي خلال موصل Conductor .

(I² R Loss) هو فقدان الطاقة في جهاز كهربائي ، (مثل المحول أو الكابل) والذي يحدث بسبب تدفق التيار الكهربائي(I) من خلال المقاومة (R) . يزداد فقد القدرة مع مربع شدة التيار ، ويسمى ذلك الفقد الأومي .

هناك نوعان من العوامل الرئيسية المؤثرة :

- **الموقع Location** :

تزداد مقاومة الكابلات مع المسافة بحيث تكون الخسائر عادة (٥٪) للإمدادات الكهربائية إلى مواقع حضرية قريبة من مصدر الطاقة (موقع المحطة) ولكنها تصل إلى (١٠٪ - ٢٠٪) للمواقع الريفية البعيدة . المتوسط العام في الولايات المتحدة الأمريكية هو (٧٪ - ٨٪) .

- **الجهد االكهربائي Voltage** :

بما أن خسائر تسخين جول تتناسب مع مربع التيار ، يمكن تقليل خسائر التوزيع عن طريق نقل القدرة بتيار منخفض قدر الإمكان بإستخدام جهد إرسال عالي Higher transmission voltages (فولتية خطوط النقل) . يتم ضبط الحد الأعلى للفولتية عن طريق انهيار العازل الهوائي بين كابلات القدرة والأرضي ، أو على الأرجح عبر العوازل Insulators التي تحمل الكابلات من أبراج النقل Transmission towers .

مع أنظمة نقل الجهد العالي (الفولتية العالية) هناك أيضا خسائر إضافية للنحاس Copper و الحديد Iron في المحولات Transformers ، على الرغم من أنها ثانوية ، مما يؤدي إلى تكثيف ورفع الفولتية في محطة التوليد وتخفيضها مرة أخرى عند نقطة الإستهلاك ، بسبب مقاومة الملفات و التخلفية المغناطيسية Hysteresis [3] . وخسائر التيار الدوامي Eddy Current Losses [4] في قلب المحولات Transformer core.

ملاحظة توضيحية [3] : التخلفية أو الهيستريا‌س هي نزعة المادة الممغنطة إلى البقاء في حالة مغناطيسية (الظاهرة التي تتخلف فيها قيمة الخاصية الفيزيائية عن التغييرات في التأثير الذي يسببها ، على سبيل المثال عندما يكون الحث المغناطيسي Magnetic induction متأخرا عن القوة الممغنطة) . بتعبير آخر هي خاصية للنظم تتمثل في تأخر إستجابة النظام للقوى المؤثرة عليه ، وتعتمد إستجابة هذه النظم على القوى التي أثرت عليها سابقا ، وتطرأ عليها تغيرات في بنيتها لا تختفي تماما بعد إبعاد المؤثر عنها ، أي تعتمد صفاتها على تاريخ معالجاتها .

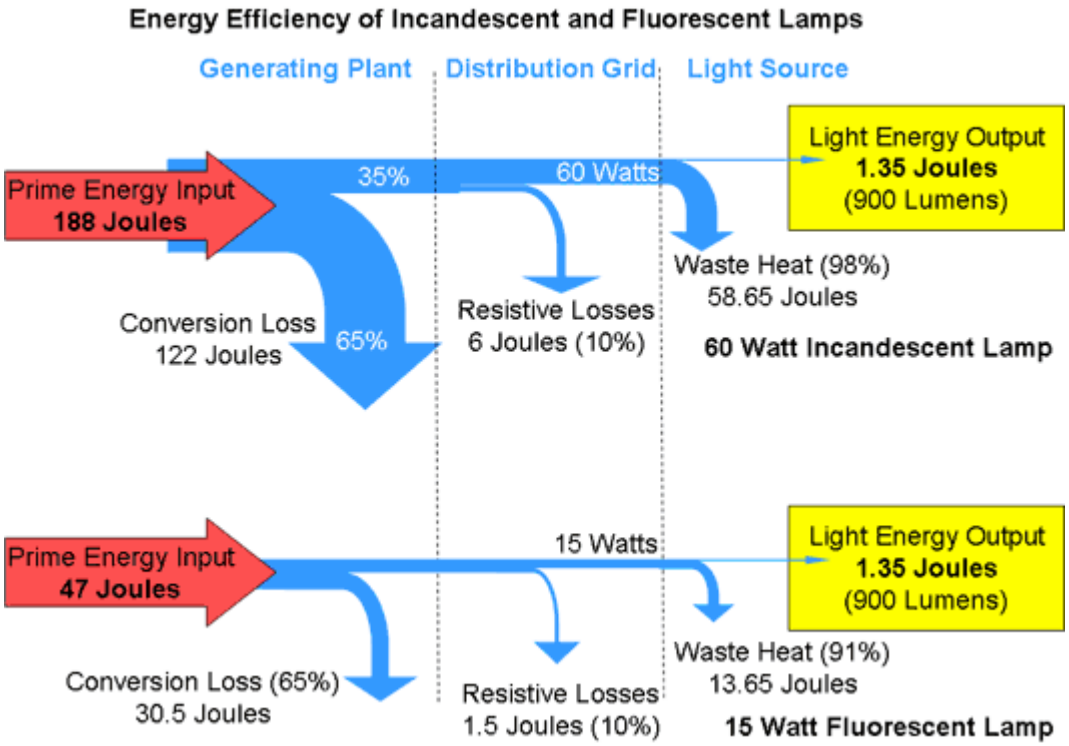
ملاحظة توضيحية [4] : التيارات الدوامية هي التيارات التي تسري بشكل دوائر متحدة المركز وتسبب ارتفاع حرارة المادة الموصلة التي تسري فيها وتسبب خسائر بالطاقة تدعى خسائر التيارات الدوامة . تنشأ هذه التيارات عندما يحث اي مجال مغناطيسي متغير المادة الموصلة التي لها عادة خصائص مغناطيسية جيدة مسببا تولد تيار كهربائي في المادة . ويكون إتجاه التيار بمستوى عمودي على إتجاه المجال المغناطيسي . وأشهر المواد التي ينشا فيها هذا التيار هو حديد المحولات الذي للتغلب على هذه

المشكلة فيه يتم تقطيعه على شكل شرائح رقيقة وعزل الشرائح بطلاء عازل لزيادة مقاومة صفيحة الحديد ومن ثم التقليل من قيمة هذا التيار .

كفاءة إستخدام الطاقة Energy Usage Efficiency

يوضح المثال التالي عدم الكفاءة الذي ينطوي عليها تحويل مصدر طاقة أولي إلى ناتج إضاءة مفيد . مصباح نموذجي متوهج بقدرة (٦٠ واط Watt) ينتج إضاءة تبلغ حوالي (١٥ لومينز لكل واط lumens / Watt) [5] من الطاقة الكهربائية المجهزة . وبالتالي ، يبلغ إجمالي الناتج الضوئي من المصباح (٩٠٠ لومينز) ، وهو ما يعادل حوالي (١,٣٥ واط) أو (١,٣٥ جول \ الثانية Joules / second) من الطاقة الضوئية المشعة ، وكفاءة التحويل تبلغ (٢,٢٥٪) . يتم فقدان باقي الطاقة الكهربائية المجهزة كحرارة . مع الأخذ في نظر الاعتبار أن الكفاءة النموذجية لمحطة توليد كهرباء هي (٣٥ ٪) و خسائر تسخين جول (١٠ ٪) في شبكة التوزيع ، كفاءة تحويل الطاقة الأولية إلى طاقة ضوء هي فقط (٠,٧ ٪) .

ملاحظة توضيحية [5] **:** (لومينز \ واط lumens / Watt) هي وحدة قياس مدى جودة مصدر الضوء للضوء المرئي . هي نسبة تدفق الضوء إلى القدرة ، مقاسة بوحدة اللومن لكل واط في النظام الدولي للوحدات (SI) . كلمة lumens مقتبسة من كلمة Luminous التي تعني اللمعان أو السطوع أو الإشراق وهي مقياس للكمية الإجمالية للضوء المرئي (للعين البشرية) من المصباح أو مصدر الضوء . مزيد من لومينز يعني أنه ضوء أكثر إشراقا ، عدد أقل من لومينز يعني أنه ضوء باهت .



للمقارنة ، ينتج المصباح الفلوري المدمج Compact Fluorescent Lamp (CFL) بين (٥٠ - ٦٠ لومينز\ واط) . باستخدام مصابيح الفلورسنت بدلا من المصابيح المتوهجة ، يمكن تقليل إستهلاك الطاقة للمصابيح من (٦٠ واط) إلى (١٥ واط) لنفس ناتج الضوء . ببساطة سيوفر المستهلك (٤٥ جول في الثانية) ، ولكن إستهلاك الطاقة الرئيسي أو الأولي بالمقابل يقل بنسبة (١٤١ جول في الثانية) .

يُستنتج مما ورد في أعلاه ستة نقاط جديرة بالإهتمام وهي :

- إستخدام المصابيح المتوهجة هي طريقة غير فعالة للغاية لتوفير الإضاءة .
- يتطلب تشغيل مصباح إضاءة متوهج أو ساطع بقدرة (٦٠ واط) لمدة عام واحد ما بين (٢٠٠) إلى (٣٠٠) كغ من الفحم Coal عالي الجودة .

• بالنظر إلى مليارات المصابيح المتوهجة المستخدمة حول العالم اليوم ، يتم إهدار كمية هائلة ومبالغ فيها من الطاقة لأغراض الإضاءة .
• بدائل توفير الطاقة متاحة Energy Saving Alternatives .
• لا تقتصر أهمية أجهزة توفير الطاقة على توفير أموال المستهلك فحسب ، بل يتم تضخيم أو توسيع وفورات الطاقة أثناء مرورك راجعا بسلسلة التجهيز . في هذه الحالة النموذجية ، يؤدي توفير (١ جول) من قبل المستخدم النهائي إلى تقليل أكثرمن (٣ جول) في إجمالي الطاقة الكهربائية المستهلكة .
• ينطبق عامل تضخيم وفورات الطاقة Energy Savings Amplification Factor أيضا على أية وفورات في الطاقة يتم إجراؤها من قبل المستخدم النهائي مثل خفض درجة الحرارة على منظمات الحرارة Thermostats أو إيقاف تشغيل جهاز التحكم عن بعد Appliance remote Control ووضع الإستعداد Standby Function .

ملاحظة توضيحية : طاقة الإستعداد وتسمى الطاقة الماصة أو الحمل الكهربائي الخفي أو الكهرباء المتسربة تشير إلى الطاقة الكهربائية المستهلكة من الأجهزة الكهربائية والإلكترونية عندما تكون مطفأة (ولكنها مصممة لتسحب القليل من الطاقة) أو عندما تكون في وضع الإستعداد .

مصادر الطاقة Energy Resources

على الرغم من التطورات المستمرة للطاقة الشمسية Solar وطاقة الرياح والطاقة المائية Wind and Hydro power ، ما زال أكثر من (٨٠ ٪) من الكهرباء في العالم مستمدة من مصادر الحرارة . تسرد الجداول أدناه بعض المصادر الرئيسية للطاقة المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية مع محتوى الطاقة في المصدر.
للحصول على وصف للكيفية التي يتم بها توليد الطاقة الكهربائية من هذه المصادر والخسائر الناتجة عن التحويل ، أقرأ موضوع **(نظرة عامة على الطاقة الكهربائية)** الصفحة (١٠) .

محتوى الطاقة الحرارية للوقود والمواد الكيميائية
Calorific Energy Content of Fuels and Chemicals

عادة ما يشير محتوى الطاقة في مواد (مصادر) مختلفة ، (ولكن ليس دائما) ، إلى الطاقة الحرارية التي يمكن إستخلاصها من المادة ، عادة عن طريق حرقها وإستخدام الحرارة بطريقة ما لتوليد الطاقة الكهربائية .

Energy Sources:

Key	Fossil Fuel	Green Energy	Explosives المتفجرات	Nuclear Fuel	Thermal	ElectroChemical	Kinetic

Generation Process	Fuel	Thermal Energy (Calorific Content) kWh/Kg [1]
Thermal	Brown Coal (Lignite)	2.8
	Coking (Black) Coal	8.3
	Oil	12.5
	Natural Gas (North Sea) [2]	10.8
	Liquefied Petroleum Gas (LPG) is a mixture of Propane and Butane	13.8
	Propane	13.9
	Butane	13.7
	Kerosene (Paraffin Oil)	13.0
	Petrol (Gasoline)	13.0
	Diesel	12.9
	Bio diesel	10.9
	Ethanol	8.3
	Methanol	6.4
	Dry Wood	4.4
	Green Wood	2.5
	Agricultural Crop Residues	2.5 - 5.0
	Municipal Waste	2.0 - 2.5
	Gunpowder	0.83
	TNT	1.16
	Dynamite	2.0
	Uranium 235 (Nuclear Fission)	22,500,000
	Deuterium - Tritium (40 / 60) (Nuclear Fusion)	93,600,000
	Hydrogen [3]	39.4
	Candy Bar (Mars Bar) قالب الحلوى (نوع الشوكولاته الأمريكية مارس)	5.55

المصادر :

١- المختبرات الفيزيائية الوطنية في المملكة المتحدة UK National Physical Laboratories (NPL)

٢- قسم البيئة والأغذية والشؤون الريفية بالمملكة المتحدة .

UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA)

٣- الوزارة الهندية لمصادر الطاقة غير التقليدية .

Indian Ministry of Non-conventional Energy Resources (MNER)

ملاحظات توضيحية :

(1) كيلواط ساعة (KiloWatthour (kWh ≡ 3.6 ميكاجول (MegaJoules (MJ .

(2) يتكون الغاز الطبيعي Natural Gas أساسا من غاز الميثان Methane (٧٠ إلى ٩٠٪) ولكنه يحتوي على كميات كبيرة من الإيثان Ethane (٥ إلى ١٥٪) ، والبيوتان Butane ، والبروبان Propane ، وثاني أكسيد الكربون Carbon dioxide ، والنيتروجين Nitrogen ، والهليوم Helium وكبريتيد الهيدروجين Hydrogen sulfide .

(3) الهيدروجين Hydrogen ليس مصدر طاقة رئيسي . نحتاج إلى (٥٠ كيلواط ساعة) من الكهرباء لإنتاج (١ كغم) من الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي Electrolysis .

من المثير للدهشة أن الوقود الأحفوري Fossil Fuels وحتى حزمة قوالب الحلوى Candy bars pack يحوي طاقة أكثر من أي من المتفجرات Explosives . وذلك لأن المتفجرات ، بحكم تعريفها ، تحتوي على كل من الوقود والمؤكسد Oxidizer ، في حين أن الوقود الأحفوري لا يحتوي على مؤكسد ويستخدم الهواء للإحتراق Combustion . وعادة ما يكون الحجم الكبير من مادة المؤكسد اللازم للإحتراق الكامل أثقل بكثير من الوقود نفسه ، كما أن أخذ الوزن المركب للوقود بالإضافة إلى مؤكسده في الحسبان من شأنه أن يقلل بشكل كبير من كثافة طاقتها Energy Density [6] (كيلواط ساعة \ كغم KWh / Kg) إلى أقل من تلك الخاصة بالمتفجرات .

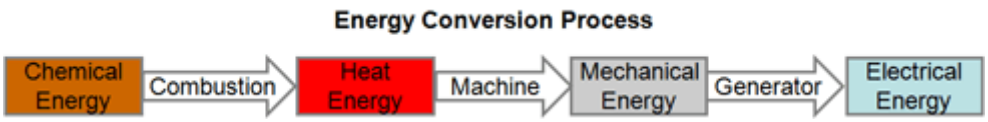
يحدث رد الفعل العنيف للمتفجرات بسبب خلط المادة المتفجرة بمؤكسدها وإحتراق حجمها بشكل كامل ، في حين أن الوقود الأحفوري يمكن أن يحترق فقط عند السطح لحظة تماسها مع المؤكسد .

ملاحظة توضيحية [6] : كثافة الطاقة هي كمية الطاقة التي يمكن تخزينها في كتلة معينة من المادة أو النظام . وكلما ارتفعت كثافة الطاقة لنظام أو مادة ، كلما زادت كمية الطاقة المخزنة في كتلتها . يمكن تخزين الطاقة في العديد من الأنواع المختلفة من المواد والأنظمة .

محتوى الطاقة الكهروكيميائية للأنواع الكيميائية

Electrochemical Energy Content of Chemical Species

إستخدام محتوى الطاقة الحرارية للمواد الكيميائية المختلفة لغرض توليد الكهرباء ينطوي على ثلاث عمليات تحويل طاقة كل منها تكون غير فعالة ١٠٠% .



ومع ذلك ، فإن العناصر الكيميائية تحتوي على طاقة كهروكيميائية جوهرية كامنة مرتبطة بطاقة الإلكترونات في غلاف الإلكترون الخارجي أو نطاق التكافؤ Valence Band [7] ويتم تحويل هذه الطاقة مباشرة إلى طاقة كهربائية قابلة للإستخدام في البطاريات . يوضح الجدول التالي كمية الطاقة المتاحة من هذه المصادر عند استخدامها في الأجهزة العملية .

ملاحظة توضيحية [7] : نطاق التكافؤ Valence Band هو نطاق الإلكترونات الموجودة في أغلفة التكافؤ (آخر المستويات الإلكترونية) للذرة ، والتي تميل لأن تشارك في التفاعلات الكيميائية عن طريق الترابط مع الذرات أو الجزيئات أو الأيونات الأخرى .

Generation Process	Cell Chemistry	Electrical Energy kWh/Kg
Electrochemical	Primary Battery (Alkaline)	0.175
	Rechargeable Battery (Lead Acid)	0.04
	Rechargeable Battery (NicKel Cadmium)	0.05
	Rechargeable Battery (Nickel Metal Hydride)	0.08
	Rechargeable Battery (Lithium Ion)	0.14

محتوى الطاقة لتدفقات الطاقة التي تحدث بشكل طبيعي
Energy Content of Naturally Occurring Energy Flows

مصادر الطاقة المتجددة المثالية Ideal Renewable Energy Sources هي تدفقات طاقة تحدث بشكل طبيعي . وهي مجانية ، ولكن إستخدامها قد يكون مكلفا للغاية . يوضح الجدول التالي بعض تلك المصادر :

Source	Natural Energy Flows Providing 1 kW of Available Power	
Wind Turbine	Wind speed 12.5 m/s	Turbine swept area 0.85 m^2
	Wind speed 4 m/s	Turbine swept area 31.84 m^2
Hydro Turbine	Water flow 1 m^3/s	Head of water 0.1 metres
	Water flow 100 litres/sec	Head of water 1.0 metres
Solar PV (Electromagnetic Radiation)	Surface perpendicular to the sun's rays at noon with sun directly overhead	Surface area 1m^2
	For an hourly average of 1kW taken over a day	Surface area 2.5 $m^2$to 5 m^2 depending on location
Geothermal	(Ocean) Temperature	Water flow rate 10.8

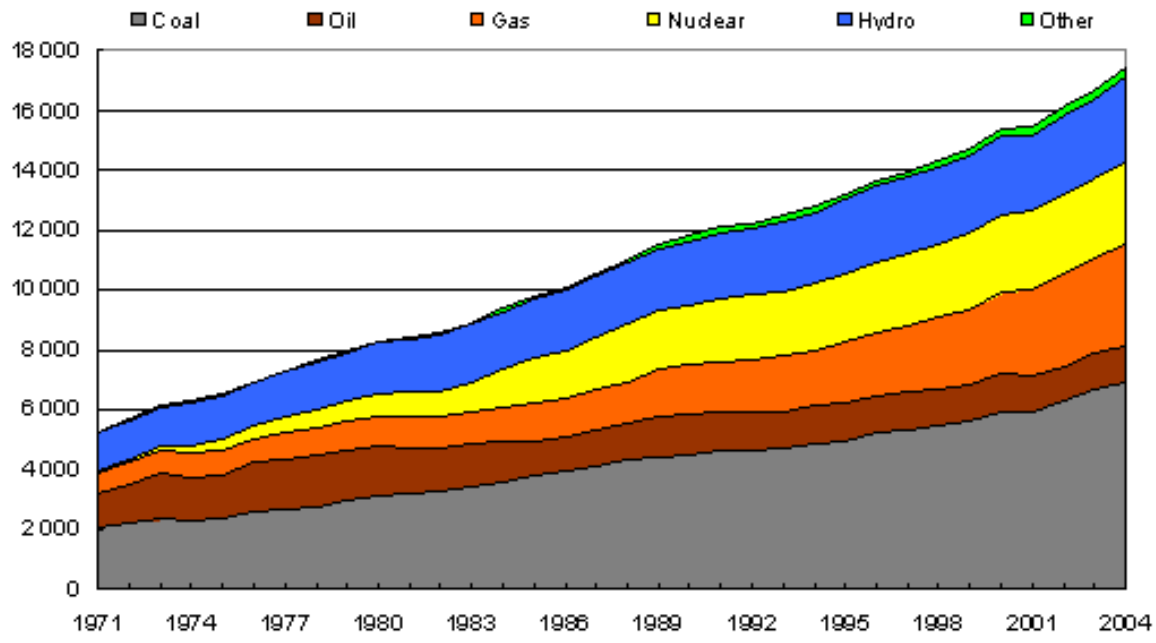
	difference 20°C	litres/min *
	(Hot rocks) Temperature gradient 40°C/km, Area 1 km^2, Depth 3.5 km	Water flow rate 0.2 litres/min *
	(Aquifers) Temperature gradient 30°C/km, Area 1 km^2, Depth 3.0 km	Water flow rate 0.24 litres/min *

المصدر : ***** After Garnish J. D. (1976) - Geothermal Energy (HMSO)

مخطط توليد الطاقة الكهربائية في العالم من مختلف مصادر الطاقة (تيراواط ساعة)

The scheme of generating electricity in the world from various sources of energy

Terawatt hours (TWh)



المصدر : كتاب حقائق منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية ٢٠٠٧

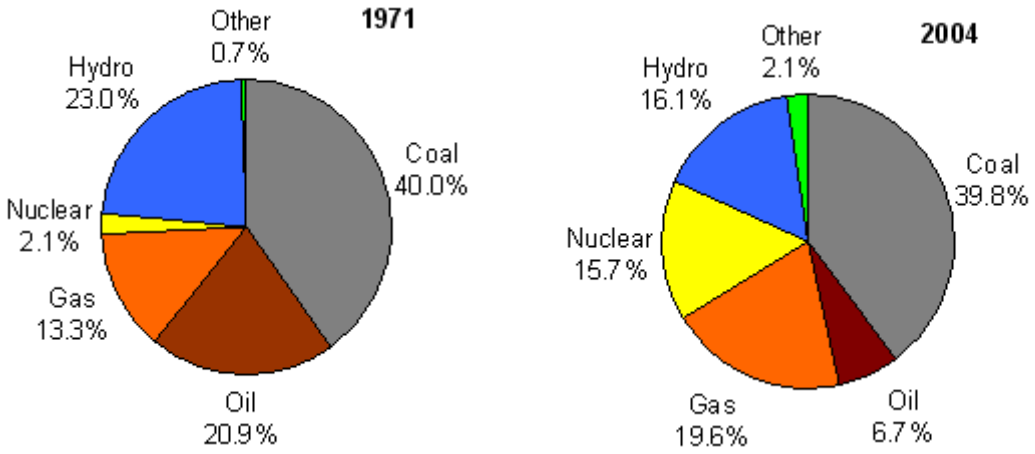
Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD Factbook 2007)

لاحظ أن إستهلاك الطاقة الكهربائية قد تضاعف أكثر من ثلاث مرات من (٥,٢٠٠) إلى (١٧,٤٠٠) تيراواط ساعة خلال ٢٣ عاما .

وخلال الفترة نفسها ، يُلاحظ أن حصة الطاقة المتولدة من القدرة النووية Nuclear power أعظم نموا وتوسعا بالمقارنة مع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى ، لكن غالبية الطاقة الكهربائية في العالم لا تزال تُنتج من الفحم .

مخطط توليد الطاقة الكهربائية في العالم من مختلف مصادر الطاقة (نسبة مئوية)

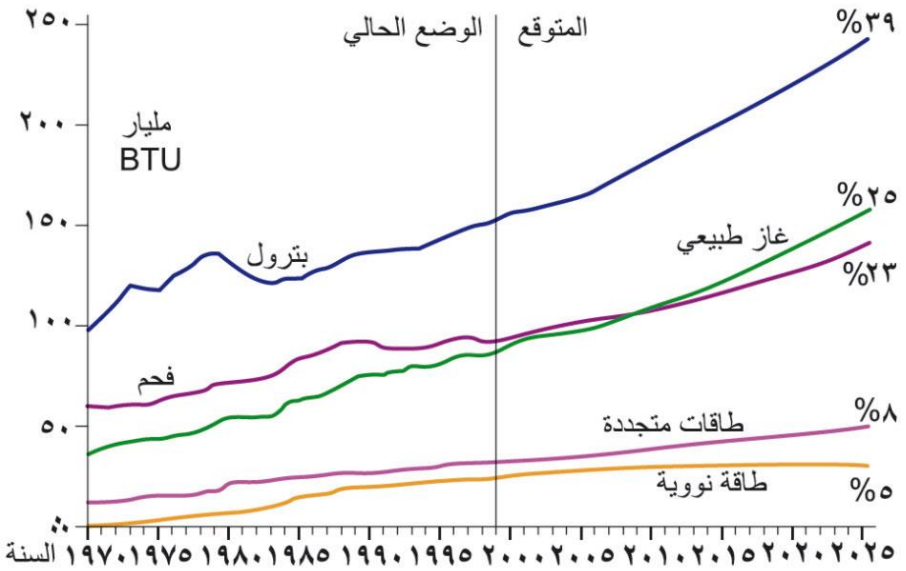
The scheme of generating electricity in the world of various energy sources (Percentage)



المصدر : كتاب حقائق منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية ٢٠٠٧

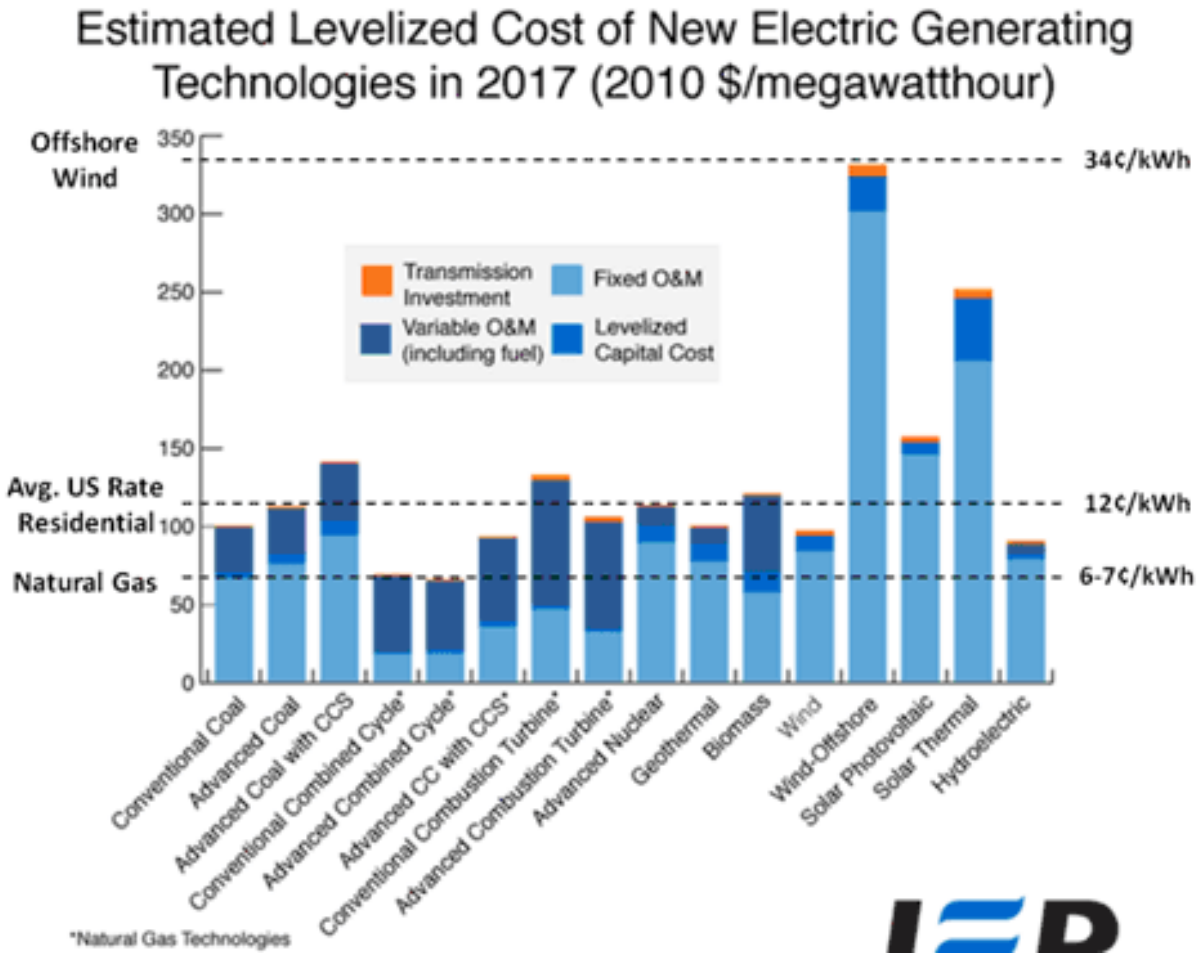
Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD Factbook 2007)

يُظهر الشكل أدناه تزايد معدل إستهلاك الطاقة العالمي حتى عام ٢٠٠١ ، وكذلك التزايد المتوقع بعد ذلك حتى عام ٢٠٢٥ ، حيث يُقدر أن مصادر توليد الطاقة ستكون ٣٩% من البترول و٢٥% من الغاز و٢٣% من الفحم و٨% من الطاقات المتجددة و٥% من الطاقات النووية .



ملاحظة توضيحية : وحدة حرارية بريطانية (British Thermal Unit (BTU = 0.00000029 ميكاواط ساعة .
مليار وحدة حرارية بريطانية = 293.071 ميكاواط ساعة .

تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية للميكاواط ساعة و للكيلواط ساعة KWh لمختلف أنواع الوقود
Electricity Generating Costs per MWh and KWh for Different Fuels



المصدر : معهد أبحاث الطاقة (IER) و توقعات الطاقة السنوية لإدارة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA) لعام ٢٠١٢ .
Source: The Institute for Energy Research (IER) and the US Energy Information Administration (EIA) annual energy outlook 2012 .

تمثل التكاليف المستقرة Levelised costs القيمة الحالية للتكلفة الإجمالية لبناء وتشغيل محطة توليد Generating plant على مدى عمرها المالي ، وتحويلها إلى دفعات سنوية متساوية وإطفاءها على أساس التوليد السنوي المتوقع على أساس دورة عمل أو خدمة مفترضة .
لا تتضمن التكاليف ، تكلفة إنهاء الخدمة والتفكيك أو إيقاف التشغيل Decommissioning .
في حالة المصادر المتقطعة مثل الطاقة الشمسية والرياح Solar and wind ، يجب إضافة تكاليف صيانة وإستخدام القدرة الاحتياطية (طاقة الإستعداد) Standby capacity .
بلغ متوسط تكلفة إنتاج الكهرباء في عام ٢٠٠٥ للطاقة النووية (١,٧٢ سنت لكل كيلواط ساعة) ، وللمحطات التي تعمل بالفحم (٢,٢١ سنت / كيلو اط في الساعة) ، وللنفط (٨,٩٠ سنت / كيلواط ساعة) ، وللغاز الطبيعي Natural gas (٧,٥١ سنت / كيلوات ساعة) .
(المصدر - معهد الطاقة النووية Nuclear Energy Institute NEI).

References المراجع

1- www.mpoweruk.com
2- The Electropaedia
3- Wikipedia- the free encyclopedia ويكيبيديا ، الموسوعة الحرة
4- Dictionary of Engineering – Second Edition - McGraw-Hill
٥- 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
٦- معجم المصطلحات العلمية والفنية والهندسية - أحمد شفيق الخطيب - ٢٠٠٥