# الدورة المزدوجة

## كفاءة عالية لانتاج الكهرباء وتحلية المياه

د . عبد الحى بن عمران

**منافسة الغاز الطبيعى لغيره منْ أنواع الوقود المستعمل فى توليد الكهرباء تكون واضحة وجليه عندما يستخدم الغاز كوقود للتوربينات الغازية فى محطات التوليد البسيطة أو فى محطات التوليد المزدوج ( كهرباء وحرارة ) حيث زاد الطلب على استخدام توربينات الغاز فى محطات الكهرباء على مدى الثلاث سنوات الاخيرة اما لاغراض طاقات اضافية متزايدة او لاستبدال محطات قديمة ، اذ تشكل توربينات الغاز نسبة تقارب 50 بالمائة من اجمالى محطات الكهرباء الجديدة سواء لاغراض التوليد البسيط او المزدوج ، ومرد ذلك للاسباب التالية :**

- أعمال البحث والتطوير التى تركزت على أداء توربينات الغاز فى السنوات الاخيرة حققت تقدما ملحوظا فى كفاءة التوربينة وتحسين أدائها وأهم عامل ساهم فى تحسين كفاءة التوربينات الغازية هو ازدياد درجة حرارة الايقاد حيث كانت هذه الدرجة خلال الستينات محصورة ما بين 700 الى 800درجة مئوية أما اليوم فقد تم التوصل الى زيادتها بحيث أصبحت محصورة مابين 1000 ، 1200درجة مئوية .

  والوصول الى هذا المدى من درجات الحرارة يتطلب تقدما فى علوم المواد وكذلك تبريد ريش ومراوح التوربينة .
- كفاءة التوربينة الغازية فى محطات التوليد المزدوج أعلى منها فى محطات التوليد البسيط اذ تصل الكفاءة الصافية فى التوليد المزدوج الى ما يقارب 50 بالمائة مقارنة بكفاءة صافية فى التوليد البسيط تفوق قليلا 30 بالمائة
- تتميز المحطات المزدوجة بتوربينات الغاز بتدنى التكاليف الرأسمالية .
- وفرة الغاز الطبيعى بأسعار تنافسية مقارنة بالطاقة النووية أو الفحم أوالنفط بعند الاخذ بالأعتبارات البيئية .

- الانبعاثات البيئية الملوثة للبيئة والناجمة عن معدات وقودها غاز طبيعى منخفضة اذ تصل ثلث نظيرتها المنبعثة من الفحم ونصف نظيرتها المنبعثة من الفحم النظيف المحول الى غاز ( الفحم المغوز ) او زيت الوقود الثقيل .
- التركيب والتشييد الكامل للمحطة ذات الدورة المزدوجة يتراوح من 24 شهرا الى 30 شهرا .
- التوربينات الغازية بالامكان تجهيزها للتشغيل بعد مدة تتراوح مابين 12 ، 18 شهرا .
- تدنى كلفة التشييد والتركيب .
- تدنى كميات المياه المطلوبة للتبريد حيث تصل الى نصف ما تحتاجه الأنواع الأخرى .
- توفر لشركات الكهرباء مرونة قيمة فى ادارة الطلب على الكهرباء اذ يمكن خيار الدورة المزدوجة من تلبية الطلب ارتفاعا أو انخفاضا .
- تكاليف نقل الغاز أقل كلفة من نقل الكهرباء وخطوط نقل الغاز أقل ضررا بالبيئة مقارنة بخطوط نقل الكهرباء .
- ذات اتاحية عالية .

وتوربينات الغاز يمكن استخدامها اما فى توليد الكهرباء فقط أو فى الانتاج المزدوج للكهرباء والحرارة والتى تحتاج

محطة مزدوجة
850 ميجاوات

اليها الصناعة أو القطاع المنزلى والتجارى .

ومحطات التوليد المزدوج عادة ما تعمل لانتاج كمية محددة من الحرارة تقتضى اعتماد مخرجات الكهرباء على حمل هذه الحرارة .

وتوربينات الغاز يتم تركيبها فى محطات الكهرباء ذات الدورة المزدوجة حيث تتواجد مع توربينات البخار ، والغاز الساخن الخارج من توربينة الغاز ـ عادة ما يكون فى درجة حرارة تقارب 500 مئوية ـ يستخدم لرفع درجة البخار فى غلاية الحرارة المهدورة والبخار الناتج يستخدم فى دفع توربينة البخار .

ومحطة الكهرباء ذات الدورة المزدوجة بامكانها انتاج إما الكهرباء فقط أو الكهرباء والحرارة معا [1]

## أهمية التوليد المزدوج للكهرباء والحرارة

كمثال بسيط على اهمية اتباع أسلوب التوليد المزدوج للكهرباء والحرارة ، نفترض أن أحد المبانى المشغولة كمكاتب يحتاج الى ( 1 ) ميجاوات كهرباء ، ولتلبية ذلك فان مثل هذا المبنى يحتاج الى ( 3 ) ميجاوات من الغاز الطبيعى لتوفير ( 1 ) ميجاوات كهرباء .

واذا ما افترضنا أن نفس المبنى يحتاج ايضا الى ( 1 ) ميجاوات من الغاز الطبيعى لتدفئته فان مجموع استهلاك الطاقة فى هذا المبنى يمثل ( 4 )ميجاوات من الغاز الطبيعى .

أما فى حالة اتباع أسلوب التوليد المزدوج فانه سيتم توفير ( 3 ) ميجاوات من الغاز الطبيعى لتوليد ( 1 )ميجاوات كهرباء وكذلك ( 1 )ميجاوات حرارة ولذا فان الاستهلاك الاجمالى للطاقة سيكون ( 3 ) ميجاوات بدلا من ( 4 )ميجاوات اذ عندما يتم توليد الكهرباء فاننا نحصل على حرارة مهدورة وهذه الحرارة المهدورة تذهب فى الهواء أو فى الانهار والبحار أما اذا كان هنالك توليد مزدوج فان تلك الحرارة تستخدم داخل المبنى للتدفئة بطريقة التدوير .

ان الانتاج الحالى للطاقة الكهربية غير كفء فبأية طريقة يتم بها انتاج الكهرباء فان الحرارة المهدورة تنتج فى نفس الوقت .

وفى معظم محطات الكهرباء كما فى المثال السابق عند استخدام ( 3 ) ميجاوات من النفط أو الفحم أو الغاز لتوليد الكهرباء يتم انتاج ( 1 ) ميجاوات من الكهرباء ، ( 2 ) ميجاوات من الحرارة وفى معظم محطات الكهرباء فان الحرارة الناتجة لايستفاد بها وبكل بساطة يتم اهدارها .

وعندما يستخدم ( 3 ) ميجاوات من الوقود لانتاج واحد ميجاوات كهرباء فقط فان العملية فى هذه الحالة تشكل كفاءة بنسبة 30 بالمائة ، وبعض محطات الكهرباء تستفيد بالحرارة أو بالبخار لانتاج مزيد من الكهرباء حيث تصل كفاءتها فى هذه الحالة الى ما يقارب 45 بالمائة ، كما يمكن أن تصل الكفاءة الى حوالى 80 بالمائة بعملية التوليد المزدوج للحرارة والكهرباء [2] حيث توفر منشآت اضافية فى محطات الكهرباء لتعظيم إنتاج الكهرباء والطاقة الحرارية فى صورة حرارة أو بخار من مصدر وقود واحد ، عندها تستخدم منشآت التوليد المزدوج الحرارة او البخار لتشغيل توربينة أخرى لانتاج كهرباء اضافية ، وفى بعض منشآت التوليد المزدوج فان الطاقة الحرارية اما أن تستخدم كمصدر للتسخين أو ترسل الى عمليات تصنيعية تحتاج الى بخار ( كمعمل تكرير مثلا ) واستعادة الطاقة الحرارية لانتاج كهرباء اضافية هو ما يجعل عملية التوليد المزدوج كفؤة والتوليد المزدوج يستخدم من قبل مؤسسات صناعية كبرى فى الصناعات الكيميائية والبتروكيماوية وفى التكرير والصناعات التعدينية والمعدنية والغذائية وصناعة الورق نظرا لان مثل هذه الصناعات تحتاج الى كميات كبيرة من الحرارة والكهرباء والجدول رقم ( 1 ) يبين الطاقة اللازمة فى بعض الصناعات الكبرى معبرا عنها بطن مكافىء من النفط [3]

جدول رقم ( 1 )
الطاقة الداخلة فى بعض الصناعات الكبرى

| اسم الصناعة | الطاقة اللازمة طن مكافىء نفط لكل طن منتج |
|---|---|
| الألومنيوم | 6 . 1 |
| النحاس | 3 . 4 |
| السيارات | 2 . 2 |
| الدائن | 2 . 8 ـ 1 . 9 |
| الحديد والصلب | 1 . 2 |
| الزجاج | 0 . 7 |

## ميزات أخرى لأسلوب التوليد المزدوج للكهرباء والحرارة

بالاضافة الى تميز عملية التوليد المزدوج بالكفاءة العالية فان هذه

العملية لها مزايا أخرى تتفوق بها على عمليات انتاج الكهرباء بالطرق التقليدية ممثلة فيما يلى :-

1 - التوليد المزدوج يحافظ على الطاقة فبنفس كمية الوقود يمكن انتاج ضعف كمية الطاقة التى تنتجها المنظومات التقليدية وهذا يعنى استهلاكا أقل لمصادر الوقود الأحفورى غير المتجدد ، كما أن التكاليف الاجمالية للوقود تكون متدنية ، يضاف الى ذلك الاستخدام الامثل للاستثمارات الرأسمالية فى صورة منشآت ومرافق انتاج فعلية .

2 - التوليد المزدوج يسهم فى زيادة كمية الطاقة المنتجة من خلال استرجاع الحرارة المهدورة والاستفادة منها .

3 - للتوليد المزدوج مزايا بيئية هامة حيث يستهلك وقودا أقل مما يسهم فى انقاص انبعاث غازات التلوث المسببة لظاهرة البيت الاخضر مثل غاز ثانى أوكسيد الكربون ، وعندما يستخدم وقود نظيف الاحتراق كالغاز الطبيعى فى منشآت التوليد المزدوج للحرارة والكهرباء لانتاج الكهرباء بدلا من المحطات التقليدية الشغالة بالفحم يقل انبعاث غاز ثانى اوكسيد الكربون الى الثلث وينتج ضعف الكهرباء بنفس المدخل الغازى .

وتتميز منشآت التوليد المزدوج للحرارة والكهرباء بتزايد الاستثمارات نظرا لما تتطلبه وحدات الاستفادة من الحرارة المهدورة من استثمارات اضافية .

فتحسين الكفاءة فى هذه المحطات يتطلب تخصيص استثمارات اضافية وفى الحقيقة فان توليد الكهرباء يتم بواسطة أرخص وأوسخ وقود ( الفحم مثلا أو النفايات ) وسعر الكهرباء المنتجة يرتبط بالتسعير المنخفض جدا لمثل هذا الوقود ، الا أن اختيار أنظف وقود وهو الغاز الطبيعى لتوليد الكهرباء انما بقصد التوليد المزدوج وليس لاغراض التوليد التقليدى البسيط للكهرباء حيث الكفاءة متدنية ، كما أن تسعير الغاز الطبيعى كوقود لمحطات التوليد المزدوج يجب أن ينظر اليه فى اطار الاستثمارات الاضافية اللازمة للاستفادة من الحرارة المهدورة لزيادة ادرار انتاج الكهرباء وبالنسبة للجماهيرية الليبية العظمى فقد صدر قرار اللجنة الشعبية العامة بتاريخ 04 / 06 / 1992 م بتوحيد سعر الغاز الطبيعى لجميع مستهلكيه ( كهرباء وصناعة ) على مسار خط الغاز الساحلى البريقة - مصراتة - الخمس على أساس 208 دراهم للمليون وحدة حرارية ( أى ما يقارب 75 سنتا للمليون وحدة حرارية ) وهذا التسعير يشكل لقطاعى الكهرباء والصناعة ( مجمع الحديد والصلب ومعامل الاسمنت ) حافزا كبيرا فى الاستفادة القصوى من الحرارة المهدورة أثناء توليد الكهرباء وفى تقليل كمية الطاقة اللازمة لانتاج وحدة معينة من الانتاج وذلك بتركيب الوحدات اللازمة للاستفادة من هذه الحرارة فى زيادة الكهرباء وما لم يتبع هذا الاسلوب لرفع الكفاءة فى قطاع الكهرباء فان القضية تصبح استخدام أنظف وأثمن وقود لانتاج أدنى كمية من الكهرباء مما يعد اهدارا للطاقة بصورتيها الفنية والاقتصادية فى الوقت الذي يمكن فيه استخدام هذا الوقودالأنظف بكميات أقل وبكفاءة أعلى علما بأن الدول الصناعية فى خياراتها للغاز الطبيعى كوقود للدورة المزدوجة تؤسس اقتصادياتها على أسعار للغاز الطبيعى تتراوح ما بين 4 ، 5 دولارات لكل مليون وحدة حرارية [4] .

## دورات البخار والغاز

دورة البخار معروفة منذ القرن التاسع عشر وهى تستخدم توربينات بخارية وقد ثبت الاعتماد عليها وفعالية كلفتها ومرونتها الا أن تقنيتها قد وصلت مرحلة النضج بحيث أصبحت قادرة فقط على ادخال تحسينات مستقبلية متواضعة من ناحية الكفاءة ، وتقنية توربينة البخار لتوليد الطاقة الكهربية تطورت من كفاءة أقل من 1 بالمائة الى ما يربو على 40 بالمائة ، أما تقنية توربينة الغاز فهى تحت التطور منذ عام 1940 وأول توربينة للغاز ركبت لكى تستخدم فى توليد الكهرباء كانت بطاقة 5 . 3 ميجاوات واستخدمت غاز العادم لتسخين مياه التغذية لوحدة توربينة بخارية بقدرة 5 . 3 ميجاوات وهذه المنظومة بدأت العمل فى عام 1949 لشركة الكهرباء والغاز بولاية أوكلاهوما الامريكية وفى تلك الايام فان عادم توربينة الغاز أستعمل كهواء احتراق لغلاية فى محطة كهرباء بخارية تقليدية وقد أدى التقدم المضطرد فى تقنية انتقال الحرارة الى دخول مولدات بخارية مصممة خصيصا لاسترجاع الحرارة وبينما تم صنع توربينات غازية كبيرة فى السبعينات فقد تم احراز نمو سريع فى تقنية الدورة المزدوجة لاسترجاع الحرارة وتطبيقها فى محطات الكهرباء وكذلك دخول توربينات الغاز ذات الدورة البسيطة لاغراض الذروة ( للتزود فقط عندما يكون الطلب فى قمته ) وكفاءة الدورات المزدوجة تحسنت باضطراد بسبب الاداء الجيد لتوربينة الغاز الناجم فى معظمه من

درجات حرارة الايقاد العالية ، واليوم فان الدورات المزدوجة التى تتسم توربيناتها الغازية بدرجات حرارة الايقاد العالية مع مولدات البخار غير الموقدة لاسترجاع الحرارة . تمثل أعظم كفاءة متوفرة حاليا فى توليد الطاقة ( أنظر الجدول رقم 2 ) [4] والتصميمات ذات التقنية المجربة لتوربينة الغاز بقدرة تفوق 150 ميجاوات حققت مستويات جديدة لكفاءة المحطة ذات الدورة المزدوجة من 50 الى 52 بالمائة كما أن توربينات جديدة ستدخل السوق قريبا بقدرة تتجاوز 200 ميجاوات .

وبحلول عام 2010 فان الكفاءة الحرارية الصافية من التوربينات الغازية ذات الدورة المزدوجة بامكانها أن تصل الى 60 بالمائة .

وتوربينات الغاز تؤدى عملا جيدا مع الوقود النظيف وسهل الاحتراق والغاز الطبيعى هو الوقود الامثل ، والخيار بكل وضوح سيكون لأي وقود متوفر تحت كلفة منخفضة الا أن مثل هذه المرونة ليست حتى الآن مجدية .

والوقود الاخر المناسب يشمل سوائل الغاز الطبيعى ، وغاز البترول المسيل والغاز الاصطناعى بوحداته الحرارية البريطانية المنخفضة والعالية ، وزيت الغاز والمقطرات ، وسوائل وغازات معامل التكرير ، وغازات أشغال الحديد والصلب ، ومناجم الفحم ، وزيت الوقود الثقيل ، وهذا الاخير يتطلب معالجة خاصة لازالة ملوثات الصوديوم والفناديوم ذات التأثير التآكلى .

ونظرا لان معامل التكرير تنشد المنتجات البيضاء من برميل النفط تاركة البقايا الثقيلة ذات النسبة العالية فى الكبريت والملوثات الاخرى يضاف إلى ذلك صرامة القيود البيئية على الانبعاثات فإن الدورة المزدوجة تتمتع بميزة عند استخدامها هذا المصدر المتوفر من الوقود بينما يكون المزيج من مستحلب هذه البقايا وقودا بديلا ، وهذه الانواع من الوقود يمكن تغويزها لانتاج غاز وحداته الحرارية البريطانية

جدول رقم ( 2 ) البدائل الموسعة لتوربينة الغاز[ 4 ]

| أسم المصنع | موديل توربينة الغاز | الحجم ميجاوات | تدفق الحرارة كيلوجول لكل كيلووات ساعة | التدفق الكتلى كيلوجرام لكل ثانية | درجة حرارة الدخول مئوية | درجة حرارة العادم مئوية |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - جنرال الكتريك | 9 هـ | 157 | 10,880 | 404 | 1,104 | 529 |
| - جنرال الكتريك / السثوم سيمنز / كى دبليويو | 9 م | 212 | 10،542 | 610 | 1,260 | 583 |
| | ڤى 94 | 153 | 10,610 | 560 | 1,250 | 545 |
| - براون بوفارى - وستنجهاوس / ميتسوبيشى | 13 هـ | 150 | 10,242 | 501 | 1,100 | 516 |
| | 501م | 150 | 10,272 | 424 | 1,250 | 570 |

بدائل مختارة لمحطات الدورة المزدوجة

| أسم المصنع | موديل توربينة الغاز | التشكيلة توربينة غاز : توربينة بخار | حجم الدورة المزدوجة الغازية ميجاوات | معدل الحرارة كيلوجول/ كيلووات ساعة | + الكفاءة % ( القيمة الحرارية الصافية ) |
|---|---|---|---|---|---|
| - براون بوفارى - جنرال الكتريك / السثوم | 13 هـ | 1 : 2 | 429 | 7,085 | 50.8 |
| | 9 م | 1 : 1 | 320 | 7,005 | 51.4 |
| | | 1 : 2 | 642 | 6,980 | 51.6 |
| - سيمنز / كى دبليويو - وستنجهاوس / ميتسوبيشى | ڤى 94.2 | 1 : 1 | 285 | 6,962 | 51.7 |
| | 501 م | 1 : 2 | 447 | 6,960 | 51.7 |

+ الكفاءة النظرية فى دائرة كارنوت المثالية =

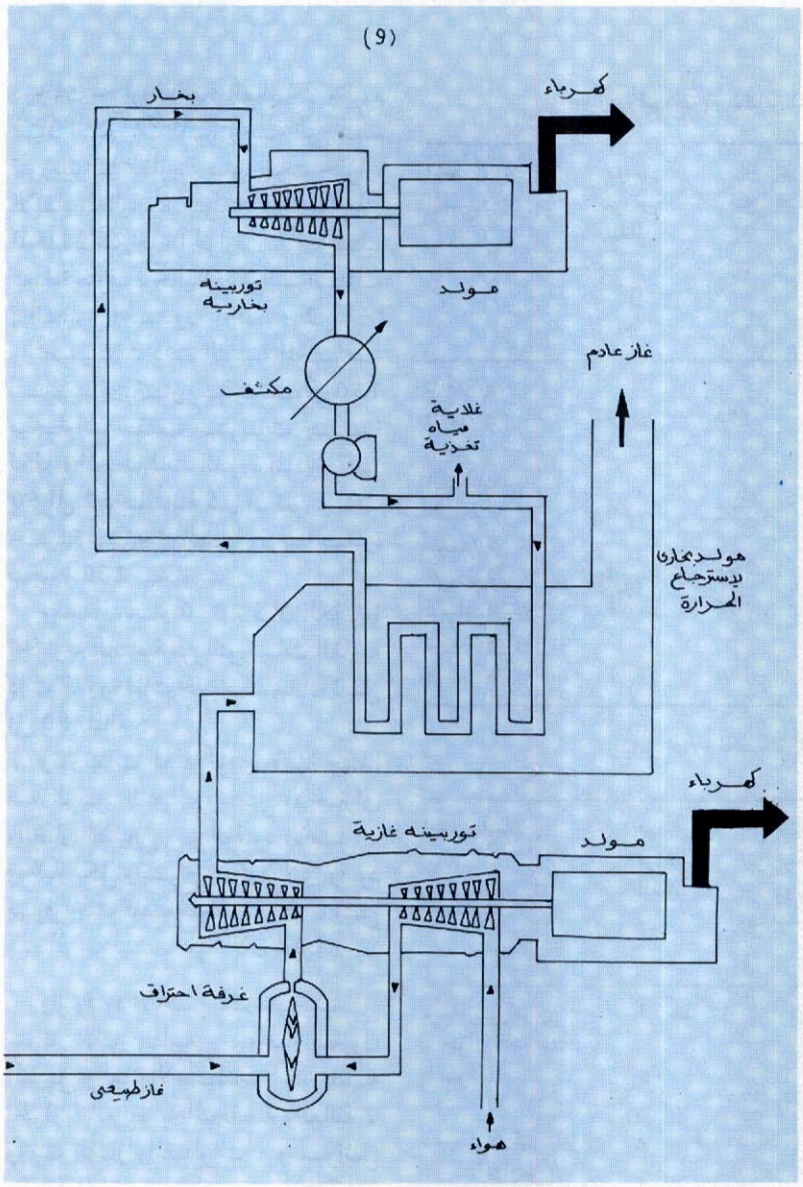
( الحرارة العالية - الحرارة المنخفضة ) / الحرارة العالية [ 5 ] .

تتراوح بين المنخفضة والمتوسطة ( أول أوكسيد الكربون + هيدروجين ) يمكن استخدامه كوقود فى الدورة المزدوجة .

يضاف الى ذلك أنواع الوقود الصلب منخفض الكلفة كالفحم والكوك النفطى والفضلات الصلبة فى معامل التكرير أو الكتلة الحيوية والتى يمكن تغويزها أو تحويلها الى أنماط من الوقود المقبول فى توربينات الغاز وكلفة القيام بذلك تحتاج الى أن تكون أقل من الفارق بين كلفة الوقود المثالى ( وهو الغاز الطبيعى ) والوقود الاقل كلفة ( وهو الفحم ) وهذا الفارق يشمل كلفة الاستثمار وكلفة التشغيل والتعويض عن الاقلال فى الكفاءة وهذه الكلف يلزم تخفيضها الى أدنى حد لمحطة ذات دورة مزدوجة تستخدم وقودا غير الغاز التنافسى مع محطة شغالة بالغاز ، ومغوزات الزيت الخام أبسط فى التشييد مقارنة مع مغوزات الوقود الصلب ( الفحم ) وهذا تعكسه الكلف الرأسمالية واقتصاديات توليد الطاقة الكهربية .

## تقنية الدورة المزدوجة الغازية

فى محطة الدورة المزدوجة تنتج توربينة الغاز الكهرباء وتصرف الغازات الحارة فى مولد للبخار ذى استرداد للحرارة يوفر البخار لتوربينة بخارية لانتاج اوفر من الكهرباء ، ومصطلح « الدورة المزدوجة » مشتق من الاستعمال المشترك لكل من دورتى توربينة الغاز وتوربينة البخار وهذا الدمج يعطى كفاءة توليدية أعلى من تلك التى يمكن الحصول عليها من كل دورة على حده . وتحقق الكفاءة العالية باستخدام حرارة مهدورة ذات درجة عالية من توربينة الغاز لتوليد بخار لتسيير توربينة بخار ومولد لانتاج أوفر من الكهرباء ( أنظر الشكل 1 ) وبالاضافة الى كونها تقنية ذات كفاءة




شكل رقم ( 1 )

توليد الكهرباء بأسلوب الدورة المزدوجة الغازية / 4.

متعاظمة تستخدم اليوم فان المحطة ذات الدورة المزدوجة لها كلفة رأسمالية نوعية متدنية وزمن تركيب أسرع مما تتطلبه أية محطة تقليدية أخرى .

يتحقق أدنى انعكاس بيئى من الدورة المزدوجة الشغالة بالغاز وهى متفوقة على جميع المحطات الاخرى التقليدية الشغالة بالوقود الاحفورى فى

انبعاثاتها من أكاسيد الكبريت والنتروجين والرماد وثانى أوكسيد الكربون .

وعلى سبيل المثال فان انبعاثات ثانى أوكسيد الكربون منها تمثل نصف ما ينبعث من محطة تقليدية مكافئة شغالة بالفحم المغوز .

وتوربينات الغاز تحقق الحمل الكامل فى زمن يتراوح من 15 الى 20 دقيقة مما يعطى لمحطة الدورة المزدوجة ميزة بدء سريع فى التشغيل ، ونتيجة لان ثلث الكهرباء فقط يتم توليده بواسطة توربينات البخار فى محطة الدورة المزدوجة فان متطلبات مياه التبريد تكون متدنية بسبب صغر حجم المكثف ومنظومة ماء التبريد وتجدر ملاحظة ان محطة الدورة المزدوجة المعظمة تطرد ما بين 2200 , 2500 وحدة حرارية بريطانية لكل كيلووات ساعة الى المكثف مقارنة بما يقارب 4000 وحدة حرارية بريطانية لكل كيلووات ساعة من محطة بخارية تقليدية معظمة ومن 5000 الى 5550 وحدة حرارية بريطانية لكل كيلووات ساعة من محطة نووية [6] .

ووحدات الدورة المزدوجة يعول عليها وهى بسيطة فى التشغيل ، ومرونة التشغيل ناجمة عن الطبيعة المجمعة لوحدات الدورة المزدوجة كما يمكن التقليل فى السعة الاحتياطية المركبة لتأمين التزويدات المخطط لها كما أن متطلبات المساحة المخصصة لموقع الدورة المزدوجة تمثل فقط جزءا من تلك التى تتطلبها بقية التقنيات الاخرى ، والمحطة تتسم بقلة ارتيادها مقارنة بأية تقنيات أخرى لتوليد الكهرباء ولذا فهى تتطلب أقل عدد من المشغلين .

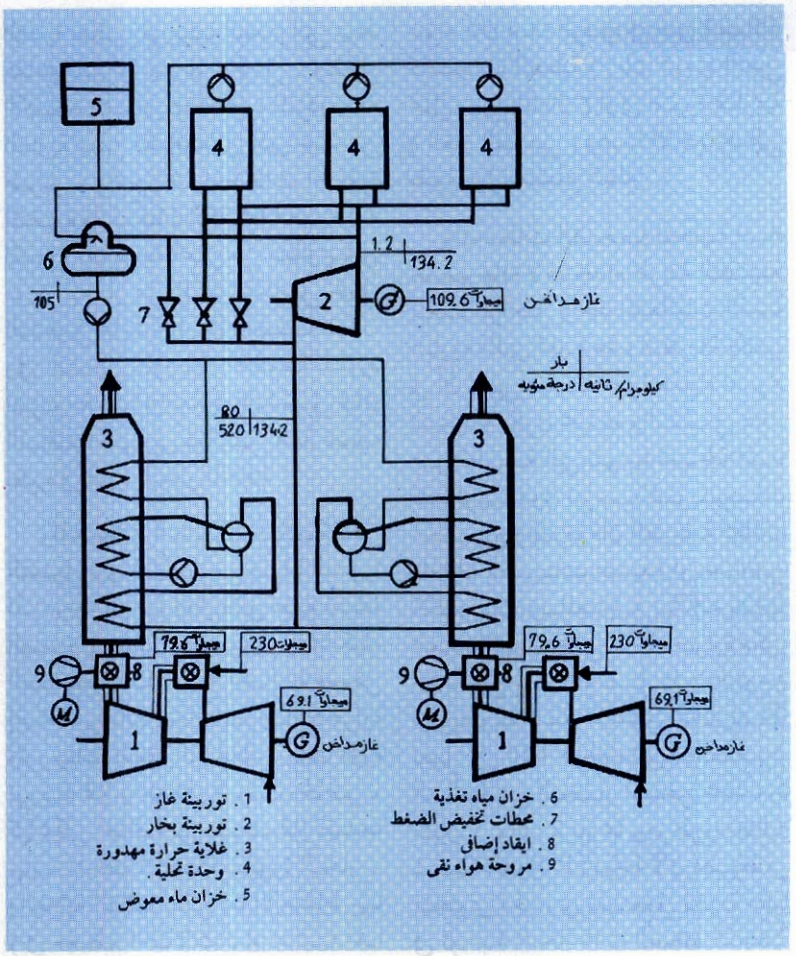
ودرجة الحرارة القصوى لتوربينة الغاز يمكن التغيير فيها بالتحكم فى تدفق الوقود الذى يوفر التحكم فى القدرة بعكس توربينة البخار التى تهبط كفاءتها بسرعة كلما قل الحمل . وتقليل الكفاءة الحرارية للدورة المزدوجة الغازية يمكن انقاصه الى أدنى حد عن طريق مراوح الضاغط ذات الخطوة المتغيرة ولذا فان الكفاءة الحرارية للدورة المزدوجة أعلى من نظيرتها فى دورة البخار على المدى الكامل لحمل التشغيل مما يشكل ميزة رئيسية لها . وفى التشغيل بدوريتين لمنظومة الدورة المزدوجة أثناء البدء فى التشغيل فأن الفاقد الحرارى لها يمثل فقط نصف نظيره فى دورة البخار المكافئة .

والمحطات التقليدية القائمة يمكن التعديل فيها لتستفيد من مزايا الدورة المزدوجة ( وهذا مايطلق عليه اعادة القدرة ) ويعتمد التصميم والتشكيلة الصحيحة على نوع الحالة فيمكن إضافة مولدات بخار استرجاع الحرارة وتوربينات البخار الى محطات ذات دورة توربينة غاز واحدة فى الوقت الحاضر ، كما يمكن اضافة توربينات غاز لمقدمة نهاية المحطة الشغالة بدورة البخار ، والغلاية القائمة يمكن اما الاحتفاظ بها ( فى معظم الحالات ) او استبدالها بوحدة متخصصة لاغراض نظام أقصى كفاءة فى الدورة المزدوجة .

## أهمية تقنية الدورة المزدوجة فى تحلية مياه البحر :

أحد التطبيقات المهمة بوجه خاص للتوليد المزدوج هو ربط محطات الكهرباء بمحطات لتحليه مياه البحر [9] حيث تحظى محطات الدورة المزدوجة بملاءمتها لهذا الغرض لان مثل هذه المحطات عادة ماتشيد فى البلدان المصدرة للنفط والتى تعانى شحا فى المياه حيث يتوفر الوقود المثالى لمنشآت الدورة المزدوجة بكل سهولة وبكلفة معقولة سواء كان هذا الوقود فى صورة سائلة كالمنتجات النفطية ( زيت الوقود الثقيل على سبيل المثال ) أو فى صورة غازية ( الغاز الطبيعى ) وهذا الاخير يحظى بقبول بيئى منقطع النظير .

والمحطات الضخمة لتحلية المياه تصمم عادة لاستخدام طريقة التصنيع متعدد المراحل وأحد المتطلبات الفنية البارزة الذى تمليه هذه الطريقة يكمن فى أن أقصى درجة حرارة للماء المراد تسخينه تكون محددة والسبب فى ذلك هو الطريقة التى تتم بها معالجة المياه للحيلولة دون ترسب كربونات الكالسيوم وعموما فان الطريقة تتطلب المعالجة بكبريتات عديدة او بحامض الكبريتيك وبالمعالجة بالكبريتات العديدة فان أقصى درجة حرارة يمكن أن تسخن بها المياه تصل الى 90 درجة مئوية وبواسطة حامض الكبريتيك تصل الى 120 درجة مئوية والضغوط الناتجة عن البخار المسخن محصورة مابين 1 ، 5 . 2 بار مما يوفر ظروفا مثالية لمحطة الدورة المزدوجة لان الهبوط فى المحتوى الحرارى المستعمل يكون عاليا فى توربينة البخار ذات الضغط الرجعى وبالتالى يسهم فى الحصول على مخرج كهربائى هائل وفى محطات الدورة المزدوجة المدمجة مع وحدات لتحلية مياه البحر يلزم التحكم فى مخرج الطاقة الكهربائية وتدفق بخار التصنيع كل على حده ولذا فان الايقاد الاضافى منصوح به والشكل رقم ( 2 ) يوضح الاساس وموازنة الحرارة لمثل هذا النوع من المحطات وعملية التحلية مبنية على منظومة متعددة المراحل يتم فيها معالجة مياه البحر بالكبريتات العديدة . وضغط البخار المسخن يقارب 2 . 1 بار والاستهلاك النوعى للحرارة يقدر بحوالى 250 كيلوجول لكل كيلوجرام من المقطرات وهذا يناظر تقريبا محطة تحلية ذات 20 مرحلة والبيانات الفنية




شكل ( 2 )

مثال لمحطة ذات دورة مزدوجة مرتبطة بوحدة لتحلية مياه البحر/ 9

الرئيسية يوضحها الجدول رقم ( 3 ) ، ومثل هذه المنشآت أصبحت هامة جدا حيث أن القيمة المعولة على انتاج الكهرباء مرتفعة ، وحتى اذا مانظرنا الى أن حرارة التصنيع كفاقد فى حد ذاتها فان الكفاءة الكهربائية تصل الى حوالى 40 بالمائة وهذه القيمة المرتفعة يمكن التوصل اليها فى المحطة البخارية التقليدية تحت أحسن الظروف عند ما تنتج الكهرباء فقط والمحطة المزدوجة تكون أقل ملاءمة اذا ما كانت النسبة بين المياه العذبة والطاقة الكهربائية عالية ومعامل الكهرباء سيكون متدنيا وفى هذه الحالة أما أن يوفر البخار الاضافى المطلوب لوحدة التحلية فى غلاية أخرى مساعدة أو يتم اختيار نوع آخر من محطة الكهرباء ومعاملات القدرة المرتفعة يمكن الحصول عليها باستخدام توربينات بخارية للاستخلاص والتكثيف الا أن الميزة البارزة فى تطلبها فقط لكميات مهملة من مياه التبريد فى تصنيع البخار تنعدم وتصبح الوحدة معقدة ومكلفة .

## التطورات المستقبلية

من المحتمل أن يلعب التقدم فى توربينات الغاز والتطور فى دورة البخار فوق الحرجة دوراً فى تحسين اداء محطات الدورة المزدوجة .

درجات الحرارة العالية الداخلة تحسن الكفاءة ولكنها تتطلب تغييرات مكثفة فى التصميم بالنسبة للمسار الذى يسلكه الغاز الحار ففى الوقت الحاضر فإن السبائك ذات المتانة العالية تحمى من الأكسدة والتآكل ودرجات الحرارة المتزايدة تتطلب أن تكون هذه المسارات مبطنة بمواد فخارية .

ودوائر التبريد بالهواء سواء الداخلية أو الخارجية منها يلزم أن تحد من درجة حرارة المكونات الرئيسية داخل توربينة الغاز كالمراوح والفتحات الثابتة وهذا التبريد بالهواء عادة يتخلص منه بواسطة مخرج الضاغط .

ودرجة الحرارة العالية الداخلة فى توربينة الغاز تؤدى كذلك إلى درجة حرارة خروج عالية ودرجات حرارة الخروج الحالية تتراوح ما بين 510 ، 560 مئوية وهى تسمح باستخدام دورة البخار بواسطة اعادة التسخين ، ودرجات حرارة الايقاد المرتفعة تنتج عنها زيادة فى انبعاث الاكاسيد النيتروجينية وأول أوكسيد الكربون والتى يلزم التحكم فيها بحقن الماء أو البخار «لتقليل انبعاثات الاكاسيد النيتروجينية بنسبة 70 بالمائة» أو بالاختزال المحفز المختار لتخفيض هذه الانبعاثات بنسبة 85 بالمائة .

والاحتراق المثالى يتطلب التحكم الدقيق فى نسب الوقود والهواء وكذلك الامتزاج المسبق الجيد للهواء والوقود ، والابداعات تشمل مجموعة من المحارق الصغيرة توقد وفقاً لترتيب مسبق ،

جدول رقم ( 3 )
أهم البيانات الفنية لاحدى محطات
الدورة المزدوجة المتصلة بوحدة تحلية مياه
البحر 9

| البند | القيمة |
|---|---|
| ـ حرارة الهواء | 30 درجة مئويه |
| ـ نوع الوقود | غاز طبيعى |
| ـ مخرج توربينة الغاز | 2 × 100 , 69 كيلووات |
| ـ مخرج توربينة البخار | 600 , 109 كيلووات |
| ـ خدمات محطة الكهرباء | 600 , 2 كيلووات |
| ـ القوة الجديدة فى مخرج المحطة | 100 , 245 كيلووات |
| ـ تدفق بخار التصنيع | 6 . 130 كيلوجرام / ثانية |
| ـ تدفق الماء المقطر | 130 , 1 كيلوجرام فى الثانية |
| ـ ضغط بخار التصنيع | 2 . 1 بار |
| ـ مدخل الحرارة لتوربينة الغاز | 2 × 000 , 230 كيلووات |
| ـ معدل استغلال الوقود | 3 . 85 بالمائة |
| ـ معامل القدرة | 0 . 866 |
| ـ انتاج الكهرباء | 6 . 39 بالمائه |

ومجمع غرفة الاحتراق المكون من ست فوهات ، ومثل هذا التصميم لا يقلل فحسب من أكاسيد النتروجين ولكن يقلل كذلك من الضوضاء ويقصر من طول اللهب ، ويحسن فى عمر المحرقة .

ونظراً لأن توليد الكهرباء بالدورة المزدوجة يعد تقنية جديدة نسبياً فإنه من غير المتوقع ألا تحدث تحسينات كبيرة مستقبلا .

والبرامج التى تمكن من تحقيق هذه التحسينات تشمل :ـ

ـ تحسين الاحتراق المرحلى .

ـ احتراق جاف بواسطة حفاز يقاوم التدوير الحرارى .

ـ استخدام البخار لتبريد الريش .

ـ استخدام أجزاء فخارية فى ممرات الغاز الحار فى المرحلة الأولى للريش وفى المحرقة .

ـ المبردات البينية للضاغط .

ـ استخدام غاز طبيعى رطب نوعاً ما قبل الاحتراق .

ومن المحتمل توقع توفر توربينات غازية فى حدود 250 ميجاوات والتقدم الملحوظ لاستخدام الوقود الصلب فى الدورات المزدوجة يتجسم فى تجارية الايقاد المباشر بالفحم .

## الاداء الامثل للدورة المزدوجة

يتحقق الاداء الأمثل الاقتصادى باختيار المعدات والدورات التى تؤدى الوظائف المطلوبة بأقل تكلفة مع اعتبار كافة العوامل الاقتصادية بما فى ذلك الكلفة الرأسمالية وكلفة الوقود ، ونفقات التشغيل والصيانة وكلفة التركيب . . وتستحوذ كلفة الوقود على التقييم الاقتصادى لمنظومة توليد الكهرباء والبخار والتى تؤدى إلى أهمية الكفاءة الحرارية العالية فى الاستغلال الفعال للوقود والتقييم ينصب على اختيار النمط الأمثل لمنظومة الدورة المزدوجة لتحقيق كفاءة حرارية عالية .

والاداء الأمثل يشمل اختيار الدورة الأكثر كفاءة واختيار المعدات ذات الخواص التى من شأنها أن تجعل الدورة مثالية واقتصادية لتلائم ظروف التطبيق المحدد .

بالنسبة لتوربينة الغاز فالعامل الملحوظ الذى يدل على نوعية توربينة الغاز فى دورة مزدوجة كفؤة هو قدرتها النوعية والتى تعرف بأنها القدرة المنتجة لكل وحدة تدفق هواء ويعبر عنها عادة بكيلووات لكل رطل فى الثانية وباختصار فأن توربينة الغاز التى لها أعلى قدرة نوعية ينجم عنها دورة مزدوجة بكفاءة قصوى والتى تتحقق باختيار توربينات غاز لها نسبة ضغط معتدلة ودرجة حرارة ايقاد عالية معززة بمكونات توربينية وضاغط تتميز بأعلى كفاءة .

أما الغلاية فاداؤها الأمثل ينعكس فى استرجاع اقصى كمية من الطاقة من غاز عادم توربينة الغاز ويتمثل اساساً فى تحقيق ادنى درجة حرارة ممكنة عملياً وأقل حرارة مطرودة لغاز المدخنة .

وبالنسبة لتوربينة البخار فأن الكفاءة المرتفعة للتمدد هى الخاصية المميزة لتوربينة البخار والمطلوبة للاداء الجيد فى كافة أنواع الدورات المزدوجة وكلفة توليد الكهرباء يمكن تحديدها باستخدام أسلوب التدفق النقدى المخصوم وهذا الأسلوب تنشأ عنه سلسلة من التدفقات النقدية للحصول على قيمة حالية صافية ، والنموذج الاقتصادى يحسب كلفة توليد الكهرباء

بمعلومية الكلفة الرأسمالية ونفقات التشغيل والصيانة وكلفة الوقود وبافتراض عمر الاستفادة من المحطة ومعامل الحمل ومعامل العائد على الاستثمار والكلفة الرأسمالية لتوليد الكهرباء يمكن الحصول عليها من المصنعين الذين يتنافسون على تقديم عروضهم بالنسبة لأية عطاءات تطرح عليهم كما يمكن افتراض عمر الاستفادة للمحطة فى حدود 25 سنة ومعامل حمل بنسبة 65 بالمائة ومعدل خصم حقيقى بنسبة 8 بالمائة ، مع الأخذ بعين الاعتبار القيود البيئية وما تتطلبه من استثمارات ، وعند مقارنة محطات الدورة المزدوجة الشغالة بالغاز الطبيعى كوقود وتكاليف الكهرباء الناتجة فأن مثل هذه التكاليف ليس بوسع تقنيات الفحم النظيف منافستها ، كما أن محطات الكهرباء الشغالة بالوقود النووى لن تستطيع أن تنافس الغاز الطبيعى كوقود فى محطات الدورة المزدوجة ، فالاستثمارات فى محطات الدورة المزدوجة الغازية أقل كثافة من تلك المتكبدة على تقنيات الفحم والطاقة النووية والمائية كما هو مبين فى الجدول رقم (4) يضاف إلى ذلك عنصر الزمن اللازم لتشييد محطات تعمل بالغاز الطبيعى وتشغيلها حيث يتميز بقصره مقارنة بأزمنة التشييد اللازمة للمحطات التقليدية الأخرى البخارية منها والنووية .

والدول النامية ذات الاحتياطى الضخم من الغاز الطبيعى تشكل الدورة المزدوجة الغازية أمثل توجه لها فى توليد الكهرباء فقط أو الكهرباء والحرارة معاً ، والحرارة يمكن استغلالها فى تحلية مياه البحر والتدفئة أو التبريد وفى تنمية الزراعة والثروة الحيوانية والثروة السمكية «انشاء مزارع مائية لتربية الأسماك والأحياء المائية» [7] .

وعموماً فأن اقتصاديات الدورة المزدوجة تعتمد على تقنياتها وهذه التقنيات متوفرة لتوليد الكهرباء والحرارة من الفحم والنفط والغاز عند اسعار تتنافس مع التقنية التقليدية زيادة على ذلك فأن تقنيات الدورة المزدوجة توفر اداءً بيئيا رفيعاً ، كما أن تغويز مدى واسع من أنواع الوقود ينشأ عنه لقيم هام «أول أوكسيد الكربون + الهيدروجين» يستخدم فى إنتاج الكيماويات والسوائل الهيدروكربونية ومنتجات أخرى أساسية وكذلك الكهرباء ومن المتوقع أن تتكامل محطات الكهرباء مع مجمعات معامل التكرير والمصانع الكيماوية ومجمعات الحديد والصلب لتشترك فى الاستفادة من ميزة مصدر الوقود المشترك المتمثل فى أول أوكسيد الكربون والهيدروجين ، والدورة المزدوجة ستكون عنصراً هاماً فى مثل هذا التطوير [4] والجماهيرية العربية الليبية باحتياطيها النفطى والغازى وقلاعها الصناعية المنتشرة على طول الساحل الليبى بالإضافة إلى محطات الكهرباء وتحلية مياه البحر ومواقعها بالنسبة لهذه القلاع الصناعية مهيأة أكثر من غيرها للاستفادة القصوى من اقتصاديات وتقنيات الدورة المزدوجة وتعظيم المكاسب منها حيث أنها تمثل أعظم توجه لترشيد إنتاج واستهلاك الطاقة [8]

**جدول رقم (4)**

**الاستثمار التقديرى لوحدة الطاقة الكهربائية المبنية بمختلف التقنيات 5**

| التقنية | الاستثمار (دولار / كيلووات ساعة للطاقة المبنية) |
|---|---|
| توربينة غازية «دورة بسيطة» | 350 ـ 300 |
| دورة مزدوجة | 700 ـ 600 |
| فحم «مع وحدات لازالة الكبريت» | 1,400 ـ 1,200 |
| طاقة نووية | 3,000 ـ 1,800 |
| طاقة مائية | 4,500 ـ 1,800 |

## المراجع


1 – Report of Committee F, "Industrial and Commercial Utilization of Gases ", IGU / F – 91, 18 th World Gas Conference, Berlin 8– 11.7. 91, Page 116–123 .

2 – Energy Communications Workshop, Questions and Answers, "Cogeneration : Clean and Efficient", April 11– 12–1991 .

3 – Willson, Alan "Liberalising the European Gas Markets, An Industrial Consumers View", IP Conference, June 12, 1992, London. U.K .

4 – Gainey, B.W, "The Role of Combined cycle Technology in power Generation " Paper No . 3.1.04, Vol, 3.1 Energy and Development, WEC, 15th Congress, Madrid, Sept .20–25, 1992 .

5 – Janchere, J.P., "Natural Gas and Power Generation : An Attractive Synergy through the Combined – Cycle Option" Gastech 88 Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 18–21 Oct., 1988 .

نشرت مترجمة تحت عنوان : الغاز الطبيعى وتوليد الطاقة الكهربائية تعاون مثمر من خلال خيار الدورة الموحدة «مجلة النفط والتعاون العربى» ـ المجلد السادس عشر العدد الثامن والخمسون شتاء 1990 / منظمة المنظمة الاقطار العربية المصدرة للبترول / الكويت .

6 – Mcketta J.J., "Encyclopedia of Chemical Processing and Design", Vol. 10, Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 1979 .

7 – HU.S.D., Handbook of Industrial Energy Conservation, "Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York 1983 .

8 ـ مشروعات الغاز ـ التقرير السنوى الثانى عشر لعام 1991م

9 – Rolf Kehlhover "Combined Cycle Gas and Steam Turbine Power Plants" The Fairmont Press, Inc. Lilburn, Ga, USA, 1991 .