خلية الوقود

د . وداد أبو القاسم الاسطى

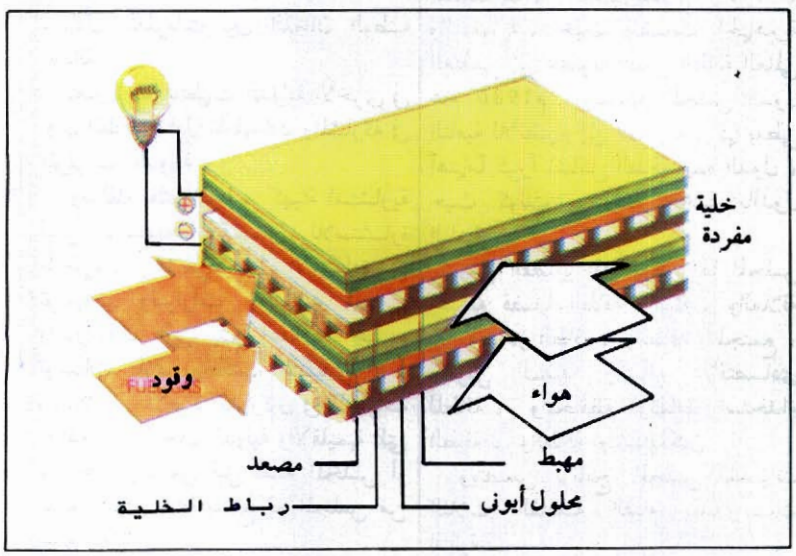
خلية الوقود هى جهاز كهروكيميائى يتم فيه توليد الطاقة الكهربائية مباشرة عن طريق تفاعل كيميائى دون تغير لأجزائه الأساسية «الأقطاب والمحلول الأيونى» وتتشابه خلية الوقود فى عملها مع المركم «النضيدة» . ولكن حقيقة ثبات أو عدم تغير المحلول الأيونى والأقطاب فى خلية الوقود يميز بينها وبين المركم . حيث أن المركم يحتوى على كمية محدودة من الوقود وتقدر الطاقة الناتجة منه بكمية المتفاعلات الكيميائية التى يحتويها ويتوقف المركم عن إنتاج الطاقة الكهربائية عندما تستنفذ هذه المتفاعلات أى يكون المركم مفرغا . وفى المركم الثانوي يمكن شحنه ثانية من مصدر خارجى . بينما خلية الوقود جهاز قادر على تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية طالما يتم تزويدها بالوقود والمؤكسد .

ويرجع تاريخ خلية الوقود إلى سنة 1839 حيث أوضح مبتكرها العالم وليم جروف أن التحليل الكهربى للماء يمكن عكسه باستخدام أقطاب من البلاتين [1] . وقد أهمل استخدام خلايا الوقود زمنا ثم فكر الإنسان فى استخدامها من جديد لإنتاج الطاقة الكهربائية . ومع أن استخدامها لا يزال مقتصرا على مركبات الفضاء إلا أن الظروف الراهنة لمحدودية الوقود التقليدى فى العالم إضافة إلى المشاكل البيئية المختلفة شجعت البحث والتطوير فى استخدام هذه الخلايا كمصادر قدرة فى الأماكن النائية وكمصادر قدرة محتملة للمركبات الكهربائية .

وتعتبر خلية الوقود فريدة فى أنها تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية دون التحول إلى طاقة حرارية كخطوة وسطى أو دون وساطة دورة المحرك الحرارى . لذلك نجد أن كفاءتها لاتعتمد على محدودية الديناميكا الحرارية ولا تخضع لقانون أقصى كفاءة للآلة الحرارية اللاارجاعية والمتمثلة فى دورة كارنوت .

تركيب الخلية

تتركب خلية الوقود كما فى شكل (1) من قطبين بينهما محلول أيونى . وهو عبارة عن مركب كيميائى يمرر التيار الكهربى إذا ما صهر أو حل فى مذيب معين هو عادة الماء . أما الوقود المستخدم لهذه الخلية فهو عادة الهيدروجين أو أول أوكسيد الكربون



(شكل 1) رسم توضيحى لخلية الوقود

أو الصوديوم أو الكحول أو وقود هيدروكربونى . ويتم امداد هذا الوقود إلى القطب السالب «المصعد» ويزود القطب الموجب «المهبط» بالأكسجين أو الهواء كعامل مؤكسد . وتعمل خلية الوقود عن طريق أكسدة غاز الهيدروجين بأكسجين الهواء ، فعند إمرار تيار من غاز الهيدروجين حول القطب السالب فى خلية الوقود وامرار تيار من غاز الأكسجين أو من الهواء على القطب الموجب فإن ذلك يتسبب فى انطلاق الألكترونات من قطب إلى آخر فى الدائرة الخارجية ، «أى ينشأ تيار كهربائى» . وعادة ما تكون الأقطاب مسامية تسمح للمحلول الأيونى والوقود بالنفاد خلالها . كما يجب أن تكون مشربة بمادة حفازة عادة ما تكون من البلاتين أو الفضة أو النيكل وتقوم بتحويل جزيئات الهيدروجين إلى أيونات «يد$^{+}$» والكترونات «e^{-}» عند المصعد «القطب السالب» فى حالة خلايا الوقود الحمضية . وتكوين أيونات «يدأ» عند المهبط «القطب الموجب» فى حالة خلايا الوقود القاعدية . وهى ذات أهمية بالغة فى خلايا الوقود التى لا تعمل فى درجات حرارة مرتفعة . ويعتبر وجود المسام للأقطاب عاملا مهما جداً فى خلايا الوقود كى تحقق أتصالا وتفاعلا بين الوقود والمحلول الأيونى كما أن للمواد الحفازة أهمية فى تكسير مركبات الوقود إلى ذرات لتسريع عملية التفاعل . ويتم التفاعل الكيميائى وعملية التحفيز على سطح الأقطاب المسامية عند التقاء المحلول الأيونى بالقطب فاذا كان حجم المسام لهذه الأقطاب كبيراً فهذا يؤدى إلى هدر الوقود وإذا كان صغيراً فإنه لايتم أتصال كاف وتنخفض سعة الخلية كما أن المحلول الأيونى يجب أن يكون ذا نفادية عالية للأيونات «يدأ$^{-}$» و «يد$^{+}$» التى تتولد على الأقطاب .

أنواع خلايا الوقود

يمكن تصنيف خلايا الوقود أما على أساس درجات الحرارة أو نوع المحلول الأيونى أو نوع الوقود المستخدم . وبشكل عام يمكن تصنيفها كالآتى [2-9] :-

1 ـ خلايا وقود ذات مركب أيونى مبلمر

ويكون اليكتروليت فيها على هيئة حشوة رقيقة بين قطبين مساميين يحمل كل منهما فى ثناياه المادة الحفازة المطلوبة . وتعمل هذه الخلايا فى درجة حرارة 80 درجة مئوية تقريبا وتبلغ كفاءتها 50٪ [2] .

2 ـ خلايا وقود قاعدية

ويكون المحلول الأيونى فيها قاعديا مثل هيدروكسيد

شكل «2» [4 ـ 9] يوضح التفاعل عند كل من المصعد والمهبط كما يلى :-

التفاعل عند المصعد «القطب السالب» :

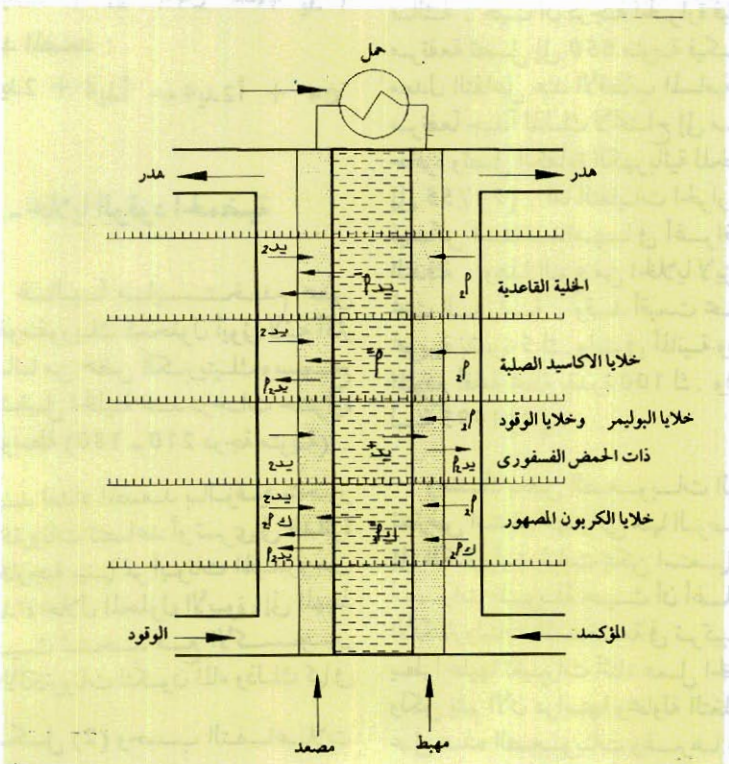
يد2 ← 2 يد$^{+}$ + e^{2}

عند المهبط «القطب السالب» :

2يد$^{+}$ + e^{2} + 5 . أ2 ← يد أ2

التفاعل الكلى :

يد2 + 5 . أ2 ← يد أ2



شكل (2) التفاعلات الكهروكيميائية فى خلايا الوقود

البوتاسيوم . وتعمل هذه الخلايا فى درجات حرارة منخفضة نسبيا «50 ـ 100 درجة مئوية» وهذا النوع من الخلايا يقتضى أن تكون الغازات الداخلة إلى الخلية سواء مع تيار الهيدروجين أو تيار الهواء خالية تماما من غاز ثانى أكسيد الكربون تفاديا لتكون كربونات البوتاسيوم التى تقلل من قدرة الخلية وتسبب اتلافها .

فى هذه الخلية يكون التفاعل كما فى شكل (2) حيث يتكون الأيون (يدأ⁻) عند المهبط والذى بدوره يمر خلال المحلول الأيونى القاعدى إلى المصعد حيث يتكون الماء وذلك حسب التفاعلات التالية :

عند المهبط :

$$2يدأ_2 + 2أ_2 + 4e^- \leftarrow 4يد أ^-$$

عند المصعد :

$$2يد_2 + 4يدأ^- \rightarrow 4يدأ_2 + 4e^-$$

3 ـ خلايا الوقود الحمضية

غالباً مايستخدم حمض الفوسفوريك كمحلول أيونى لأنه أكثر ثباتا من حمض الكبريتيك ويسمح بتشغيل الخلية عند درجات حرارة متوسطة (180 ـ 210 درجة مئوية) .

فعند امداد المصعد بالوقود تتحرر ألكترونات تتصاعد أو تسرى فى الدائرة الخارجية بينما تمر أيونات الهيدروجين «يد⁺» خلال المحلول الأيونى إلى المهبط حيث تتحد مع الأكسجين والألكترونات لتكون الماء وذلك كما فى شكل (2) وحسب التفاعلات التالية :ـ

عند المصعد :

$$2يد_2 \rightarrow 4يد^+ + 4e^-$$

عند المهبط :

$$4e^- + 4يد^+ + 2أ_2 \rightarrow 2يد_2أ_2$$

4 ـ خلايا الوقود ذات المركب ألايونى من الكربون المصهور

وفى هذه الخلايا يستعمل مصهور الكربون كالكتروليت وهذا يتطلب رفع درجة حرارة خلية الوقود إلى 600 ـ 700 درجة مئوية كما يتطلب امرار تيار من غاز يحتوى على أكاسيد الكربون إضافة إلى غاز الهيدوجين . ويستخدم فى هذه الخلايا قطبان مصنوعان من النيكل المسامى وتوضع بينهما طبقة رقيقة من الكربونات «كربونات البوتاسيوم» المنصهرة بعد خلطها بمادة مالئة . حيث أن درجة الحرارة فيها مرتفعة تصل إلى 650 مئوية فيكون معدل التفاعل عند الأقطاب المسامية ، مرتفعاً جداً لذلك لاتحتاج إلى مادة حافزة وتصل الكفاءة الكهربائية للخلية إلى 55٪ [7] . أما النفايات الحرارية فيمكن استخدامها فى أغراض التدفئة . وهذا النوع من الخلايا لايزال تحت الدراسة . وقد أقيمت محطة تجريبية بقدرة 5 ك . وات فى ألمانية ومن المتوقع أقامة محطة بقدرة 100 ك . وات لسنة 1995 [7] .

وهناك بعض الصعوبات التى تعترض استخدامها والتى منها الوصول إلى الكتروليت ثابت يمكن استعماله لفترات طويلة حيث أن أغلب الألكتروليتات المستخدمة فى تركيبها يطرأ عليها تغيرات أثناء عمل الخلية ولكن يتم الأن دراستها ومحاولة التغلب على هذه الصعوبات وغيرها من الصعوبات التقنية .

5 ـ خلايا الوقود ذات الأكاسيد الصلبة

وهى تعمل عند درجات حرارة مرتفعة تصل إلى 1000 درجة مئوية ويستخدم فيها أكسيد موصل للايونات عند هذه الدرجة من الحرارة كاليكتروليت مثل أكسيد الزركونيوم ، المعالج بأكسيد الأيتريوم «عنصر فلز نادر» . أن ارتفاع درجة حرارة عمل هذه الخلية له عدة ميزات منها عدم الاحتياج إلى الكتروليت سائل أو إلى معادن ثمينة كمواد حفازة أيضاً يمكن استخدام عدة أنواع من الوقود مثل الهيدروجين والغاز الطبيعى ويمكن استخدام الهواء كمؤكسد . كما يمكن الاستفادة من النفايات الحرارية فى التدفئة أو تسخين المياه أو غيرها . وتصل الكفاءة الكهربائية للخلية إلى 50٪ [7] ، وإذا تم استغلال النفايات الحرارية لتوليد البخار واستخدامه فى دورة إضافية لإنتاج القدرة ، تصل الكفاءة الكهربائية للخلية إلى 60٪ [8] .

التفاعل عند القطب السالب :ـ

$$ك أ_2 + يد_2 \rightarrow ك أ_2 + يد_2أ_2 + 2e^-$$

أو

$$ك أ_2 + ك أ_2 \rightarrow 2ك أ_2 + 2e^-$$

التفاعل عند القطب الموجب :

$$4e^- + 2أ_2 + 2ك أ_2 \rightarrow 2ك أ_2$$

التفاعل عند القطب السالب :

$$أ_2 + 2يد_2 \rightarrow 2يد_2أ_2 + 2e^-$$

أو

$$ك أ_2 + أ_2 \rightarrow ك أ_2 + 2e^-$$

أو

$$ك\ يـد4 + 4أ \leftarrow 2\ يـد2أ + ك\ أ2 + {}^{-}e8$$

التفاعل عند القطب الموجب :

$$4e^{-} + أ2 \leftarrow 2أ$$

وبشكل عام فى خلايا الوقود التى تعمل عند درجات حرارة مرتفعة (500 ـ 1000 درجة مئوية) يمكن استخدام أحد المواد الهيدروكربونية كوقود ويمكن استخدام مواد حفازة أقل جودة أو كلفة من البلاتين . جدول (1) يوضح بعض البيانات عن خلايا الوقود والوقت المتوقع لاستخدامها تجارياً ، وشكل (3) يوضح مقارنة بين كفاءة خلايا الوقود وكفاءة المنظومات التقليدية لانتاج الطاقة الكهربائية .

استخدامات خلايا الوقود

تستخدم خلايا الوقود فى محطات لتوليد الكهرباء سواء المحطات المركزية منها أو الفرعية أو للاستخدامات النائية . كما تستخدم كوحدات للانتاج المشترك للكهرباء والحرارة للاستخدامات الصناعية والتجارية والمنزلية . كما يمكن استخدامها فى قطاع المواصلات .

1 ـ استخدام خلايا الوقود لتوليد الكهرباء

تعتبر خلايا الوقود حاليا منافسة لمحطات القوى الحرارية ، وذلك لارتفاع كفاءتها الكهربائية ، وعدم تسببها فى تلوث البيئة ويمكنها أن تعمل عند الأحمال الجزئية وعند حمل الذروة .

ويمكن استخدامها فى محطات مركزية ذات دورة مزدوجة أو كمحطات فرعية مع امكانية الاستفادة من النفايات الحرارية فى أغراض مختلفة .

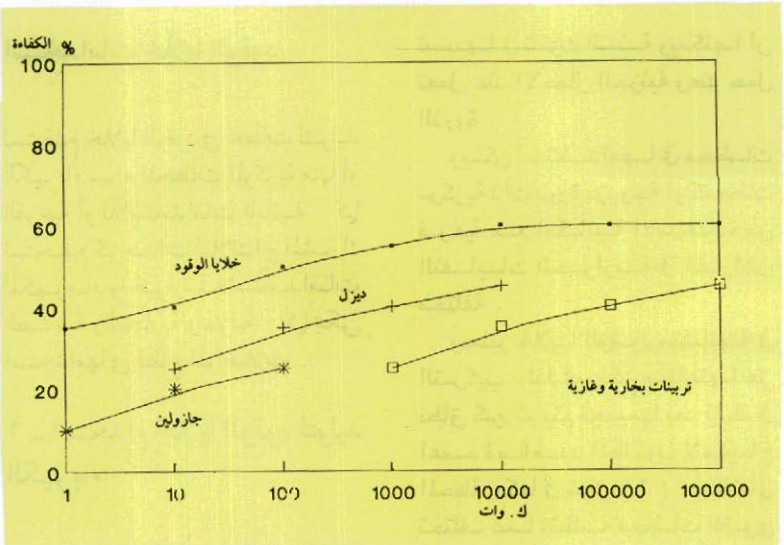
وتعتبر خلايا الوقود متشابهة فى التركيب ، لذلك يمكن صناعتها على نطاق كبير ثم يتم تجميعها بعد ذلك فى أعمدة بالعدد المطلوب لاحتياج المحطة ، كما فى شكل (1) . وبالتالى تختلف عما تتطلبه محطات القوى الأخرى الحرارية منها أو النووية والتى يجب أن تنشأ فى مواقعها .

كما يمكن استخدامها فى وحدات

جدول (1) بيانات عن خلايا الوقود [8]

الخلية	درجة الحرارة (درجة مئوية)	الضغط (جوى)	الوقود	المؤكسد	الكفاءة الكهربائية (٪)	الوقت المتوقع لاستخدامها تجاريا (سنة)
القاعدية	50 ـ 100	1 ـ 4	هيدروجين	اكسجين أو هواء	50	متوفرة
ذات الحمض الفسفورى	180 ـ 210	1 ـ 8	غاز طبيعى أو نافتا أو ميثانول	هواء	41	متوفرة
ذات مركب أيونى مبلمر	80 ـ 100	1 ـ 7	هيدروجين	أوكسجين أو هواء	50	10 ـ 15
ذات الكربون المصهور	600 ـ 800	7	غاز طبيعى أو أول أكسيد الكربون	هواء	*75	10 ـ 15
ذات الاكاسيد الصلبة	1000 ـ 1200	متعدد	هيدروجين أو أول أكسيد الكربون أو غاز طبيعى	هواء	*60	10 ـ 30

الكفاءة لمنظومات بسعات كبيرة ولمحطات تحوى دورة اضافية لانتاج القدرة



شكل (3)

مقارنة كفاءة المنظومات التقليدية مع خلايا الوقود

مجمعة صغيرة لتوفير الطاقة فى القطاع المنزلى والتاجرى بسعات تتراوح من 20 الى 200 ك . وات .

ولاتحتاج خلايا الوقود عند استخدامها فى توليد الكهرباء الا الى تحويل الوقود الى غاز غنى بالهيدروجين وتحويل التيار المستمر الى تيار متردد يتمشى مع تيار الشبكة الكهربائية .

2 ـ اقامة وحدات توليد مزدوجة

فى هذه الحالة تستخدم محطة قوى خلايا الوقود فى موقع الاستخدام لتوفير الكهرباء والطاقة الحرارية معا وذلك للأغراض الصناعية والتجارية والمنزلية وفى المناطق النائية . حيث أنه فى هذا النظام اضافة على الحصول على الطاقة الكهربائية يمكن الاستفادة من الحرارة الناتجة من الخلايا فى التدفئة وتسخين المياه فى المبانى والمتاجر مما يجعل كفاءة هذا النظام الكلية تصل الى 80٪ [4 , 8] .

وللاستخدامات النائية يمكن أن تكون سعة المحطة من 40 ـ 1000 ك . وات وتستخدم الكهرباء الناتجة للاحتياجات المكتبية والمطاعم والمتاجر والمساكن والمستشفيات وغيرها . وفى هذه الحالة تستخدم الطاقة الحرارية للتدفئة أو لتوليد البخار .

أما للاستخدامات الصناعية فتكون سعة المحطة من 1 ـ 20 ميجا وات والعمل جار لتحقيق هذا الهدف . ومن المتوقع استخدام خلايا الوقود ذات الحمض الفسوفورى . ولكن استخدامها محدود وذلك نظرا لانخفاض درجة حرارة النفايات الحرارية الناتجة منها وذلك لعملها فى درجات حرارة منخفضة . لذلك من المحبذ أن تستخدم خلايا الوقود ذات الأكاسيد الصلبة أو الكربون المصهور .

أما فى الاستخدامات المنزلية فتكون سعة المحطة من 3 ـ 20 ك . وات ويتميز هذا الاستخدام بتغير الاحمال الحرارية والكهربائية . أيضا باحتياجها لمنظومات لاتحتاج إلى الكثير من الصيانة مثل التدفئة والتكييف وتسخين المياه والكهرباء مما يجعل خلايا الوقود مناسبة لهذا الاستعمال .

3 ـ المواصلات

اضافة الى استخدام خلايا الوقود فى مركبات الفضاء ، يمكن استخدامها فى الأغراض المختلفة على سطح الارض وذلك فى قطاع المواصلات . فمنذ فترة استخدم الهيدروجين كوقود للمركبات الارضية أو كوسيلة مواصلات فى المركبات على شكل نماذج تجريبية . ولم ينتشر استخدامه كوقود لعدة اسباب منها أن تكلفة انتاجه لاتزال باهظة . أيضا أضمن وسيلة لتخزينه هى على شكل مركبات معدنية . وهى ثقيلة الوزن مما قيد مدى المركبة الى مسافة 250 ك م فقط . والخلايا المرشحة لهذا الاستخدام هى الخلايا الحمضية والخلايا ذات المركب الايونى المبلمر .

ان التقدم التقنى هذه الايام فى تقنية خلايا الوقود ذات البلمرة الصلبة أثبتت أنه يمكن أستخدامها بكفاءة عالية للمواصلات . حيث أن كفاءة هذه الخلايا تساوى من 2 ـ 3 مرات كفاءة محرك الاحتراق الداخلى . كما أن هذا النوع من الخلايا يمكن استخدامه بطريقة عكسية فى المركبات للعمل كمحلل كهربائى للماء لانتاج الهيدروجين . وذلك بتوصيل المركبة بمصدر كهرباء ومصدر للماء فى فترات عدم استخدامها . فهذا النوع من الخلايا فى المركبات الكهربائية يمكن أن يكون منافسا للمركبات التقليدية والتى تعمل بالجازولين . كما أن مدى المركبة يمكن أن يصل الى 500 ك م أو اكثر [2] . كما يرشح أيضا استخدام خلايا الوقود القاعدية للمركبات

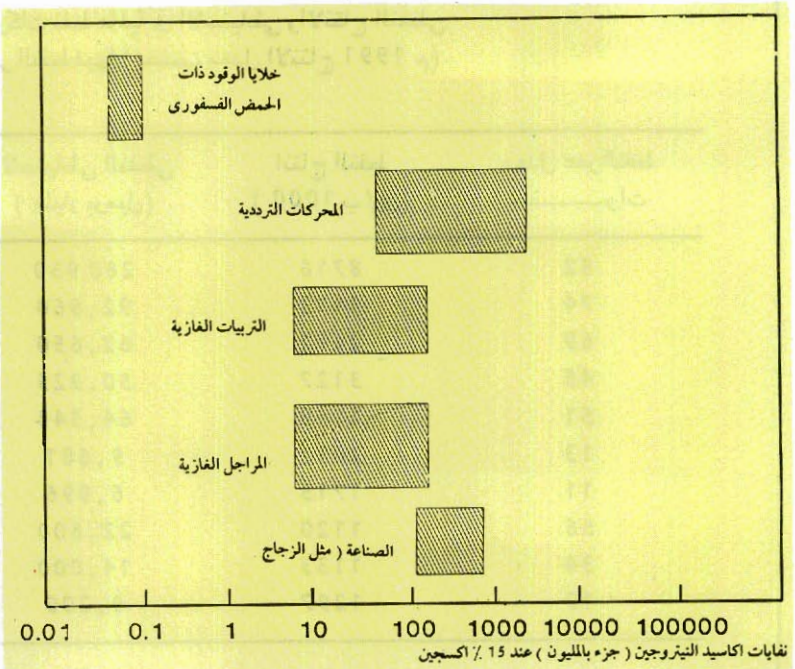
الكهربائية ومن المتوقع ، فى المستقبل القريب ، أن تحل خلايا الوقود فى قطاع المواصلات محل المحركات الترددية .

مميزات خلايا الوقود

تتميز خلايا الوقود ، مقارنة بالتقنيات الأخرى لتوليد الكهرباء ، بارتفاع الكفاءة ومحافظتها على البيئة من أى ملوثات حيث أنها لاينبعث عنها أى ملوثات . نتيجة للتفاعل الكهروكيميائى نجد أن النفايات (أكاسيد النيتروجين ، وأكاسيد الكبيرت ، وأول أكسيد الكربون . . .) والتى تنتج عن حرق الوقود مع الهواء تكون ضئيلة مقارنة بعملية الاحتراق التقليدية . شكل (4) يوضح المقارنة بين أكاسيد النيتروجين فى حالة خلايا الوقود الحمضية والتقنيات التقليدية . كما أن كفاءتها الكهربائية لاتعتمد على الحمل أو حجم المحطة أو تصميم أو انشاء المحطة كما أنها توفر المرونة فى اختيار الموقع حيث يمكن اقامتها فى وسط المدن وفى المناطق الآهلة بالسكان مما يوفر بعض التكاليف عند توزيع الطاقة الكهربائية الناتجة أيضا المرونة فى نوع الوقود المستخدم والثبات عند تغير الحمل وجودة القدرة الكهربائية الناتجة . كما أنه لاينتج عند تشغيلها ضوضاء أو ضجيج مثل محطات القوى الأخرى .

وحيث أن عملية التحويل الكهروكيميائية هى أساس خلية الوقود وهى غير محدودة بدورة كارنوت ، نجد أن كفاءتها غير محدودة نظريا .

وفى الوقت الحالى تستخدم خلايا الوقود ذات الحمض الفسفورى على المستوى التجارى . أما التقنيات المتقدمة لخلايا الوقود (خلايا الوقود ذات الاكاسيد الصلبة وخلايا وقود الكربون المصهور) فمن المؤمل أن تكون متوفرة على المستوى التجارى فى بداية القرن القادم .



شكل (4)

مقارنة نفايات اكاسيد النيتروجين بين خلايا الوقود ذات الحمض الفسفورى والتقنيات التقليدية

المراجع :

1. Mark's Standard Handbook For Mechanical Engineers., Mc. Graw Hill.
2. Billings, R.E. , ...et al, "Laser Cell Prototype Vehicle", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 12, PP 829– 837 , 1991 Pergamon Press.
3. Hinds, H.R., "Hydrogen Energy News & Views", Int. J. Hydrogen Energy, Vol.16,No 9, pp641–643, 1991, Pergamon Press.
4. Fueki,K., "Fuel Cell–Past Trends & Future Prospects" , 14th Congress of The World Energy Conference, Montreal 17–22 Sept,1989, Energy For Tomorrow.
5. Hinds, H.R., "Hydrogen Energy News & Views" , Int .j.of Hydrogen Energy, Vol 16, No.2, pp143–145,1991, Pergamon Press.
6. Cavallaro,S.,..et al , "Alkali Effect of The MCFC–Internal Reforming Catalyst Life", Int.J.of Hydrogen Energy, Vol.17,NO3,pp 181–186, 1992, Pergamon Press.
7. Erdle ,E.,...et al, "Reversibility and Polarization Behaviour of High Temperature Solid Oxide Electrochemical Cells", Donier Gmbh, Germany.
8. Rosen, M.A., "Comparison Based On Energy and Exergy of The Potential Cogeneration Efficiencies For Analysis Fuel Cells and other Electricity Generation Hydrogen Devices", Int.J. Energy, Vol. 15, No 4, pp267–274, Pergamon Press 1990.
9. Cameron , D.S.,"World Development of Fuel Cells" , Int. j. Hydrogen Energy Vol 15, No 9, pp 669 – 675 , Pergamon Press, 1990