اقتصاديات تشغيل منظومات القوى الكهربائية

د . إبراهيم محمود ملوخية*
م . إبراهيم سالم فلاح**

مقدمة :

تعتبر الطاقة الكهربائية العمود الفقرى للنهضة الصناعية والعمرانية ويقاس مدى ما وصلت اليه الشعوب من تقدم ورقى بمدى ماتستهلكة من الطاقة الكهربائية وللحصول على الطاقة الكهربائية اللازمة للاغراض المختلفة يتم بناء محطات التوليد الكهربائية والتى تتنوع من محطات بخارية ومحطات غازية ومحطات مائية واخرى نووية . والناتج العام لها هو الطاقة الكهربائية : بينما تتنوع طرق تحويل الطاقات المختلفة إلى الطاقة الكهربائية ، فبينما يتم حرق الوقود (سواء الصلب منه مثل الفحم او السائل مثل النفط او الغازى مثل الغاز الطبيعى) للحصول على الطاقة الحرارية التى من ثم تستخدم فى تسخين المياه للحصول على البخار تحت ضغط عال فى المحطات البخارية نجد أنه يتم الاستفادة من مساقط المياه للحصول على الطاقة الميكانيكية والتى بدورها تقوم بإدارة التوربينات المائية ويتم تحويل هذه الطاقة إلى طاقة كهربائية عن طريق المولدات ، كذلك تستخدم الطاقة المنبعثة عند تفتيت ذرات اليورانيوم أو الثوريوم للحصول على البخار اللازم لإدارة التوربينات البخارية .

ومما لاشك فيه أن هناك تقنيات وتفاصيل دقيقة لكل طريقة مستخدمة حاليا تم التوصل اليها عبر مسيرة العمل الهندسى المتواصل للحصول على افضل المعايير لتلك العمليات الغاية فى التعقيد وذلك لضمان استمرارية هذا المصدر وكذا للحصول على معدلات لكفاءة وحدات التوليد بما يضمن ادنى سعر تكلفة لوحدة الطاقة المنتجة .

وفى أوائل السبعينات بدأ الحديث عالميا عن أزمة الطاقة ، والتى يقصد بها إستنزاف الموارد الطبيعية المتاحة من مصادر لتوليد الطاقة ؛ حيث أنه من المعروف أن النفط الموجود فى المناطق اليابسة والمغمورة وكذا الفحم فى باطن الأرض لن يفى بشكل مستمر لسد حاجة الإنسان للطاقة إلى مدى بعيد ؛ كذلك فإن الطاقة المائية الموجودة على الأنهار ومساقط المياه قد تم إستغلالها بنسبة كبيرة ولم يبق سوى القدر البسيط الذى لم يستثمر بعد . لذا إتجهت الأنظار إلى الطاقة النووية لسد حاجة الإنسان المستقبلية لمدى بعيد ؛ إلا أنها تواجه حاليا مصاعب كثيرة وذلك لعدة عوامل منها خطورة هذا المصدر على الكائنات الحية ومدى الأضرار الناجمة عن حدوث تلوث مباشر كما حدث فى مفاعل تشرنوبيل أو عن طريق المخلفات الذرية وكيفية دفنها والتخلص منها والتى أضحت مشكلة كبرى ليس لها حل عملى مقبول حتى الآن بالإضافة إلى محدودية المخزون من تلك المصادر النورية ، لذا إتجه البحاث إلى إستنباط طرق أخرى لسد حاجةالبشرية المتعاظمة من الطاقة الكهربائية . وذلك بإستغلال المصادر الطبيعية الأخرى المتاحة وتسخيرها فى إنتاج الطاقة وهو مايعرف حاليا بالطاقة الجديدة والمتجددة والتى تهتم بطرق تطويع المصادر التى لانتضب مثل الطاقة الشمسية والتى سوف تكون دائما متاحة طالما أن الشمس موجودة وطاقة الرياح وهى عبارة عن ناتج لوجود الشمس أيضا وكذا الأنواع الأخرى

* كلية الهندسة ـ جامعة الفاتح
** الشركة العامة للكهرباء

مثل طاقة المد والجزر فى المحيطات والبحار وكذا طاقة الموج والطاقة الجيوحرارية وغيرها وفى الواقع وبرغم تركيز البحوث فى العقود الثلاثة الماضية لم تتوصل البشرية بعد إلى إستنباط طرق مباشرة وغير مكلفة لتسخير هذه الطاقات بسعات كبيرة لتكون بديلة للمصادر المتعارف عليها حاليا من فحم ونفط وغاز طبيعى والوقود النووى ، إلا انه يمكن القول : أن المؤشرات المتاحة حاليا تؤكد مدى أهمية الإستفادة من تلك المصادر الجديدة والمتجددة فى الحد من استهلاك المصادر التقليدية للطاقة . وسوف يبقى إعتماد البشرية ولفترة طويلة قادمة على المصادر التقليدية لسد حاجتها . من هنا تتأكد أهمية التشغيل الإقتصادى لمحطات التوليد الكهربائية كأحدى الوسائل التى تؤدى إلى الحد من إستنزاف تلك الموارد وذلك عن طريق التشغيل الأمثل لتلك المنظومات بالإضافة إلى المردود الإقتصادى لخفض الفاقد فى الطاقة وإيجاد أنسب الحلول للموازنة بين أفضل الطرق مستقبليا عند دخول مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة حيز التنفيذ العملى .

خصائص منظومة الطاقة الكهربائية :

من أهم خصائص منظومة الطاقة الكهربائية هى أن الطاقة المنتجة فى لحظة ماتساوى الطاقة المستهلكة فى نفس اللحظة لتغذية الأحمال المختلفة ؛ بمعنى آخر فإن الطاقة الكهربائية لا تختزن وينبغى توليد القدر الكافى منها لسد حاجة تلك الأحمال والتى هى بطبيعتها متغيرة من لحظة إلى أخرى ومن وقت إلى آخر . وتستخدم للأغراض الزراعية والمنزلية والعديد من الأغراض المتنوعة . وطبيعة تلك الاحمال أنها مرتبطة بعدة عوامل مثل نشاط الإنسان حيث نجد أن الطلب على الطاقة الكهربائية يزداد بالنهار ويقل بالليل ، أيضا يتغير الطلب على الإنارة حسب الظروف المناخية ، والتدفئة والتبريد تعتبر كذلك من أوجه إستخدام الطاقة الكهربائية وتعتمد تلك على درجة حرارة الجو وكذلك درجة الرطوبة وبالتالى يتغير حجم الطلب عليها . وفى بعض بلدان العالم تستخدم وسائل النقل الكهربائية لما لها من مزايا عديدة وبالتالى يتغير الطلب عليها بحسب الحاجة والتى تتغير من وقت لآخر . كل تلك الخصائص تعكس ضرورة العمل على توفير هذا المصدر الحيوى الهام بهذا الشكل الدائم التغير وما له من إنعكاسات فى صعوبة توفيرة بالشكل المناسب وفق المواصفات المتبعة من ثبوت فى الجهد والتردد ودرجة الإستمرارية .

ونظرا للزيادة المضطردة فى الطلب على الطاقة الكهربائية يتم إضافة محطات توليد جديدة لتعمل مع المحطات القائمة ولأن المهندسين والفنيين يقومون بتطوير وحداث الإنتاج فعادة تكون الوحدات الحديثة ذات كفاءة أعلى من مثيلاتها القائمة وهذا يضيف صعوبة إلى الصعوبات الموجودة فى إيجاد أفضل الحلول لخفض سعر تكلفة وحدة الطاقة المنتجة إلى أدنى معدل لها . وكذلك يتم ربط محطات توليد الطاقة الكهربائية عبر شبكات بجهود عالية وفائقة إلى المستهلكين . وقد تكون هناك شروط لإختيار أفضل الأماكن لبناء المحطات مثل ضرورة توفر مياه التبريد أو بالقرب من مصادر الوقود أو مصادر الطاقة المائية والتى قد تبعد مئات وربما آلاف الكيلومترات عن أماكن الإستهلاك ، لذا نجد أن خطوط النقل ذات الجهد الفائق تكون هى الوسيلة الإقتصادية المثلى لتوصيل الطاقة الكهربائية لمستهلكيها . وإقتصادياً يجب أن يؤخذ بعين الإعتبار الفاقد من الطاقة فى خطوط النقل عند البحث عن أدنى تكلفة لوحدة الطاقة المنتجة .

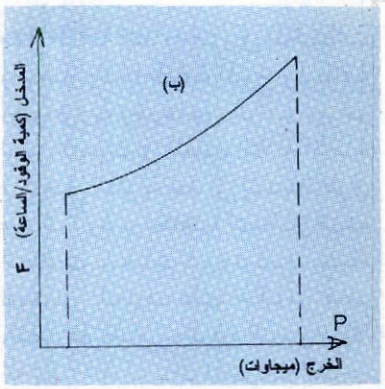
وبمرور الزمن ونظرا لإستهلاك وحدات التوليد نجد أن كفاءتها تقل وعليه يجب الأخذ بعين الإعتبار لهذا العامل عند دراسة التشغيل الإقتصادى لمنظومة القوى الكهربائية . أيضا فى بعض الأحيان قد يكون إقتصاديا الإستغناء عن بعض الوحدات القديمة والتى أصبحت عبئا على المنظومة نظرا لكثرة الأعطال وزيادة تكلفة تشغيلها بالإضافة إلى زيادة تكلفة الصيانة لها .

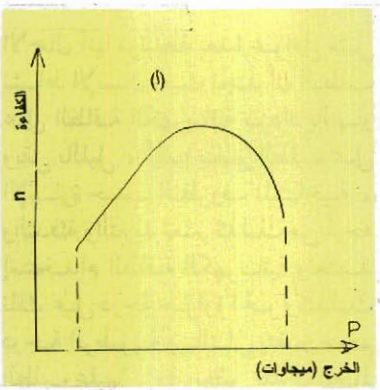
التشغيل الأقتصادى ـ المفاهيم والمتطلبات :

عند دراسة الجدوى الإقتصادية لأى مشروع نجد أن حجم الإنتاج يكون معروفا مسبقا ؛ أو يتم تحديد أدنى حجم له ، وقد يكون ضمن العوامل الفنية مدى تغير الطلب على ذلك الإنتاج وبالتالى يتم تحديد طرق التخزين وما تتطلبه من نفقات . بينما بالنسبة للطاقة الكهربائية فإن الوضع يختلف تماما ؛ فالطاقة الكهربائية تعتبر سلعة إستراتيجية ضرورية ولاتختزن ويجب توفيرها لتلبية الطلب عليها ، لذا فمن أهم خصائص الدراسات الإقتصادية هو كيفية توفير تلك السلعة وفق المواصفات المحددة لها بما يغطى حاجة الإستهلاك وفق المعدلات المطلوبة وبأدنى تكلفة . وهناك إرتباط وثيق بين زيادة الطلب عليها ومخططات بناء المحطات الجديدة . وبمعنى آخر إذا كان هناك توقع فى زيادة الطلب على الطاقة بنسبة معينة فإنه يجب أن يتوافق بناء المحطات الجديدة مع هذه الزيادة المتوقعة على الطاقة الكهربائية لما لذلك

من أهمية إقتصادية قصوى ؛ حيث أن أى خلل فى هذا التوافق ينعكس سلبا على إقتصاديات المنظومة ككل . فإذا إفتراضنا جدلا أن الزيادة على الطاقة الكهربائية تتطلب بناء محطات بقدرة إنتاجية قدرها 1000 ميجاوات خلال عشر سنوات بينما فى الواقع لم يزد حجم الزيادة خلال تلك الفترة عن 500 ميجاوات فقط . ومعنى ذلك أنه تم توجيه مبالغ طائلة لبناء تلك المحطات كان من الممكن الإستفادة بها فى مشاريع تنموية أخرى بالإضافة إلى أن سعر تكلفة وحدة الطاقة سوف يزداد بشكل كبير أيضا إذا كانت التوقعات لزيادة الطلب على الطاقة فى حدود 1000 ميجاوات بينما الزيادة الفعلية خلال نفس الفترة كانت حوالى 1500 ميجاوات فسوف يكون هناك عجز فى التوليد بمقدار 500 ميجاوات وسوف يؤدى ذلك إلى خسارة إقتصادية نظرا لعدم توفر الطاقة الكهربائية اللازمة وما يصاحب ذلك من بطالة وتأخر فى تنفيذ لمشاريع المختلفة الامر الذى قد يؤدى إلى تنفيذ البرامج الغير إقتصادية لتوفير الطاقة الكهربائية اللازمة وما يترتب على ذلك من زيادة فى تكلفة وحدة الطاقة المنتجة .

وتتغير كفاءة وحدة التوليد بحسب الخرج لها والشكل رقم 1 — أ يوضح مثالا لهذه العلاقة والتى تبين أن هناك كفاءة قصوى للوحدة وتكون عند مقدار خرج معين . وربما يتبادر إلى الذهن أن التشغيل الإقتصادى يتم تطبيقه إذا ما إتبعنا الطريقة المباشرة التالية : لتلبية حمل معين (وبفرض ثباته) يتم البدء بتشغيل الوحدة ذات أعلى منحنى كفاءة إلى أن يصل خرجها إلى القيمة المناظرة لأعلى كفاءة لها وبعدها نبدأ فى تشغيل الوحدة التالية فى سلم الكفاءة وهكذا إلى أن يتم الحصول على القدر الكافى لتلبية ذلك الحمل .

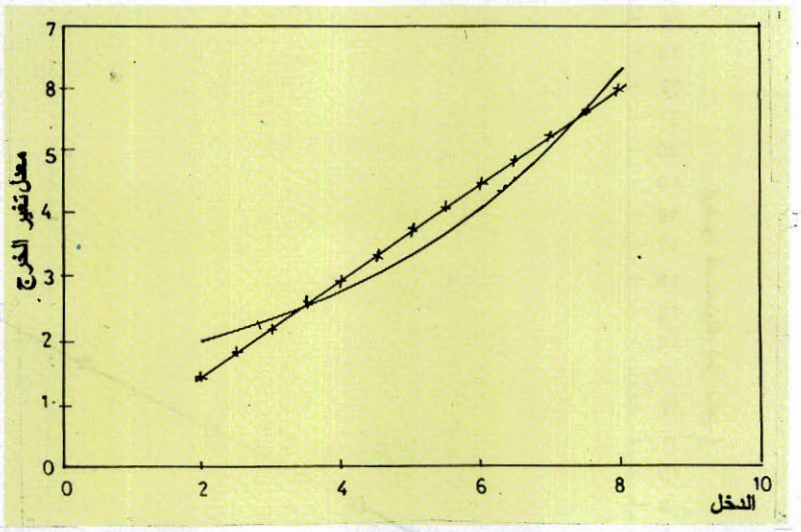




شكل (1) منحنيات الكفاءة والدخل لوحدة التوليد

وفى الواقع لاتؤدى هذه الطريقة إلى أفضل الحلول حيث أنه قد تكون من الأفضل زيادة تحميل بعض الوحدات وخفض البعض الآخر ويكون الحل النهائى مرتبطا بالحقيقة التالية : إذا تم التوصل إلى حالة تشغيل يكون عندها تحويل جزء بسيط من التوليد من وحدة إلى أخرى لايؤدى إلى أى خفض فى تكلفة الإنتاج فإن ذلك يقود إلى أفضل تشغيل إقتصادى . ومعنى ذلك أنه لايمكن الإعتماد على منحنيات الكفاءة للوصول إلى الهدف ، بل سنحصل على منحنيات أخرى لوحدات التوليد لنوضح العلاقة بين معدل تغير الخرج بالنسبة للدخل والشكل رقم 2 يوضح تلك العلاقة والتى يتم التوصل اليها عن طريق إيجاد ميل المماس عند كل نقطة على منحنى الدخل ـ الخرج (شكل رقم 1 ـ ب) . وأى نقطة على المنحنى فى الشكل رقم 2 تعطى قيمة تكلفة زيادة (أو نقصان) حمل الوحدة والتى يمكن تحديدها بمقدار الدراهم اللازمة فى الساعة لزيادة خرج تلك الوحدة بمقدار كيلوات واحد . ولتوضيح ذلك يمكن إفتراض أن هناك وحدتين تعملان معا لتلبية حمل مقداره 20 ميجاوات وأن خرج كل وحدة هو 10 ميجاوات بينما معدل زيادة التكلفة للوحدتين هو 15 و 11 درهم لكل كيلوات ساعة على التوالى . ومعنى ذلك أنه بتحويل كيلوات من خرج الوحدة الأولى (الأعلى تكلفة) إلى خرج الثانية (الأقل تكلفة) يوفر 4 دراهم كل ساعة . وقد يتبادر إلى الذهن إذن أن يتم تحويل كل خرخ الوحدة الأولى إلى الوحدة الثانية ، إلا أن الأمر ليس كذلك ، وإذا سيرتفع معدل زيادة تكلفة الوحدة الثانية عند زيادة خرجها حسب العلاقة الموضحة فى الشكل رقم 2 بينما ينخفض مقدار التغير للوحدة الأولى . وبإفتراض أن معدلات التغير فى زيادة التكلفة أصبحت الآن 14 و 12 للوحدتين على التوالى . فإن تحويل كيلوات من الوحدة الأولى إلى الثانية سوف يؤدى إلى توفير 2 درهم . وبفرض أنه قد تساوت معدلات التغير لتصبح 13 درهما لكل من الوحدتين فإن أى محاولة لتحويل خرج وحدة إلى الأخرى سوف لن يؤدى إلى أى توفير إضافى لتساوى معدلات التغير ونستخلص من ذلك أن التشغيل الإقتصادى قد تم تحقيقه عندما تساوت معدلات التغير لخرج الوحدات العاملة .

وعادة يستبدل المنحنى الموضح فى شكل رقم 2 بعلاقة خطية كتلك الموضحة فى نفس الشكل والتى يمكن تمثيلها على النحو التالى :



شكل 2: العلاقة بين معدل تغير الخرج والدخل

$$dF_i/dP_i = a_i P_i + b_i \qquad (1)$$

حيث a_i و b_i هى ثوابت للوحدة رقم i ، وتعرف dF_i/dP_i بمعدل استهلاك الوقود F_i عند خرج P_i للوحدة رقم i

ويكون شرط التشغيل الاقتصادى هو :

$$dF_i/dP_i = \text{ثابت} \qquad (2)$$

$$i=1, 2, 3, \ldots n$$

حيث n هو عدد الوحدات

والمثال السابق يوضح الطريقة المتبعة فعليا عند توزيع الحمل إقتصادياً بين الوحدات العاملة . ولكن ماذا عن وجود فقد فى القدرة عبر خطوط النقل ؟ مما لاشك فيه أن بعد محطة التوليد عن مركز الحمل يؤثر بشكل مباشر فى القدرة المستفادة من تلك المحطة ، لذا فإن أخذ الفقد فى القدرة فى الإعتبار عند دراسة التوزيع الإقتصادى سوف يكون له مردود هام ويعتمد مقدار الفقد فى القدرة على العديد من المتغيرات مثل جهود القضبان وزواياها وكذلك مقدار التيار المار عبر خطوط النقل والتى تتغير من آن لآخر ، لذا فإن الأمر هنا أصبح أكثر تعقيدا . وعادة يتم الحصول على علاقة تربط الفقد فى شبكات النقل مع خرج المحطات والتى يمكن منها الحصول على معدل تغير الفقد بتغير خرج أى من محطات التوليد والذى يكون على هيئة دالة تعتمد على الجهود وزوايا ونسبة القدرة الغير فعالة إلى القدرة الحقيقية ومعاوقات خطوط النقل . وفى تلك الحالة نجد أن شروط التوزيع الإقتصادى تصبح على النحو التالى :-

$$(dF_i/dP_i) * L_i = \text{ثابت} \qquad (3)$$

حيث يعرف Li بمعامل الجزاء للمحطة والذى معادلته هى :-

$$L_i = 1/(1-dP_L/dP_i) \qquad (4)$$

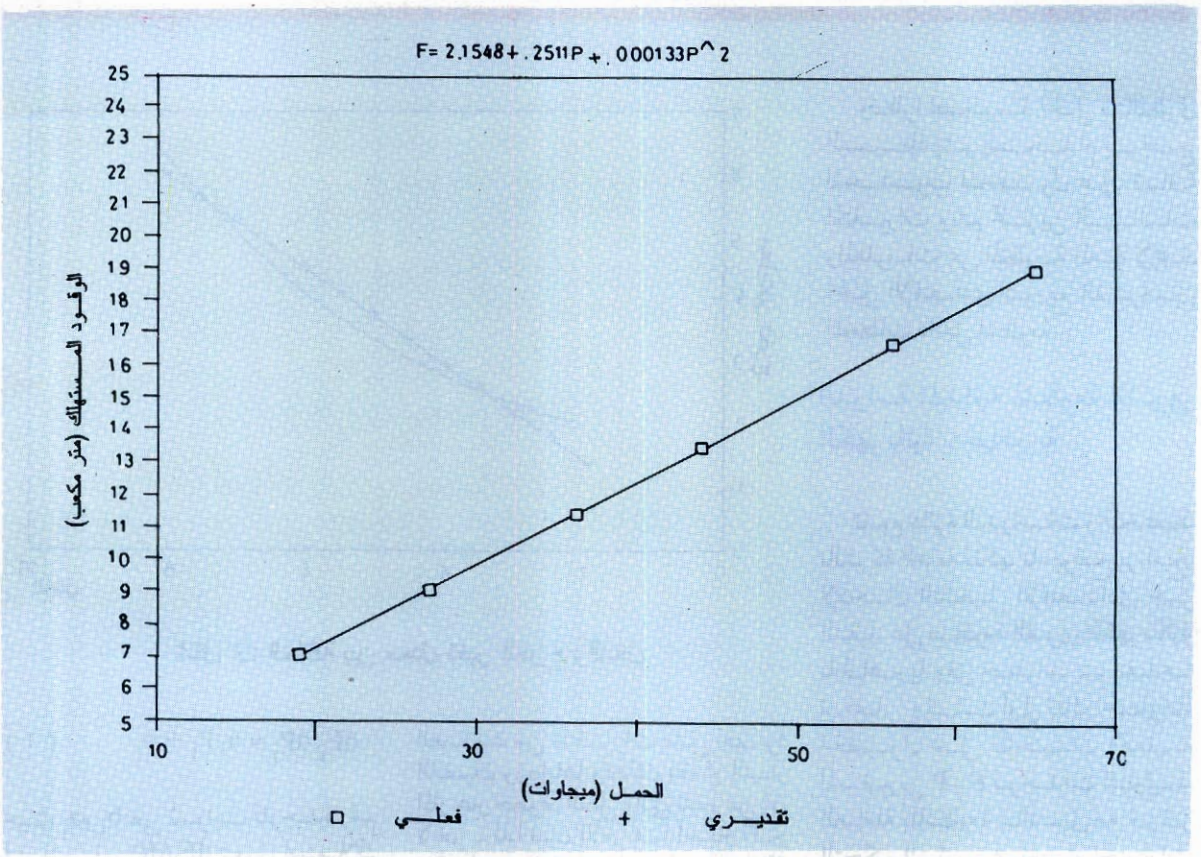
وتعطى معادلة الفقد فى خطوط النقل على النحو التالى :-

$$P_L = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} P_i B_{ij} P_j \qquad (5)$$

ونظرا لصعوبة الحل بالطرق البسيطة يتم إستخدام برامج للحاسوب للحصول على كافة المتغيرات ويتم تخزين البيانات والمعلومات عن المنظومة المعنية لإيجاد الحل الإقتصادى لتوزيع القدرة بين المحطات داخل المنظومة .

الدراسة الميدانية لمنظومة القوى الكهربائية بالجماهيرية :

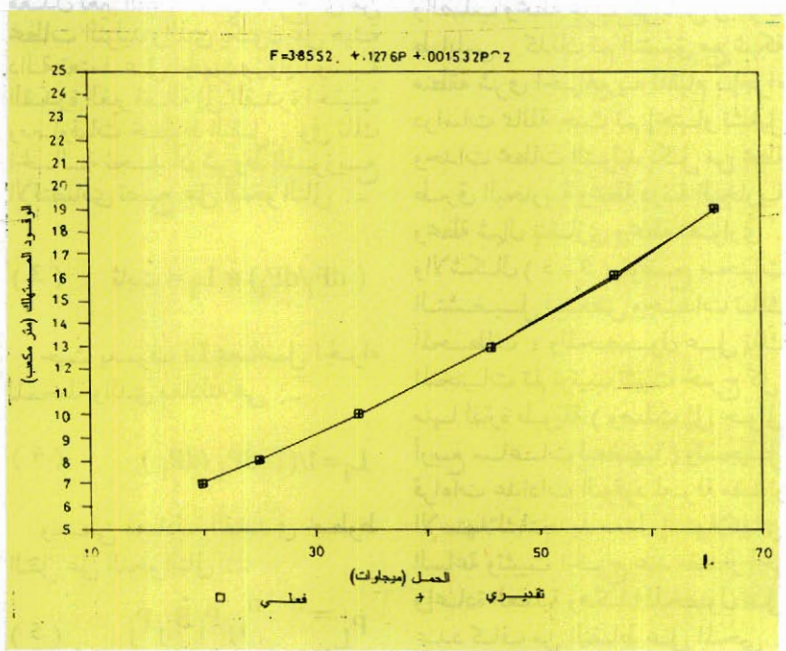
تقوم دائرة الدراسات والتخطيط بالشركة العامة للكهرباء بوضع برنامج لإدخال التشغيل الإقتصادى حيز التنفيذ على منظومة القوى الكهربائية بالجماهيرية وفق خطوات يتم تنفيذها تباعا . وكانت أولى تلك الخطوات الحصول على المنحنيات الفعلية للمتغيرين F , P لوحدات التوليد العاملة بالمنظومة بالتنسيق مع مركز التحكم الرئيسى فى إجراء اختبارات ميدانية على وحدات التوليد البخارية فى كل من محطات الخمس ومجمع الحديد والصلب ومحطة غرب طرابلس وجنوب طرابلس . كذلك تم التنسيق مع شبكة منطقة شرق الجماهيرية للقيام بإجراء دراسات مماثلة حيث تم إختبار تشغيل وحدات محطات التوليد بكل من محطة طبرق البخارية ومحطة درنة البخارية ومحطة شمال بنغازى ومحطة الهوارى . والاشكال (3 ـ 9) توضح منحنيات التشغيل لبعض وحدات تلك المحطات ، وللحصول على تلك المنحنيات تم ترتيب تثبيت خرج كل منها لفترة طويلة (وصلت إلى حوالى أربع ساعات لبعضها) وتسجيل قراءات عدادات الوقود لمعرفة مقدار الإستهلاك لتحديد معدل إستهلاكها فى الساعة وتثبيت الخرج عند مقدار آخر وإعادة العملية وهكذا للحصول على عدد كاف من النقاط على المنحنى .



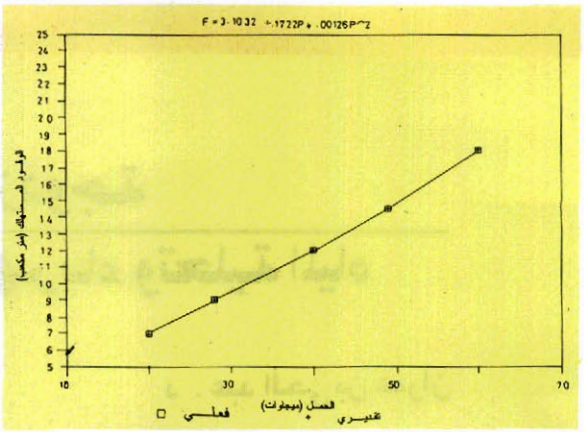
شكل (3) منحنى التشغيل لمحطة طبرق الوحدة الخامسة (65 ميجاوات)

ويجرى حاليا الإستعداد لإنهاء تلك المرحلة بتسجيل قراءات مماثلة لبقية الوحدات فى باقى المحطات .

كذلك تم إعداد برنامج الحاسوب للتشغيل الإقتصادى وتجربته على عدة أمثلة للتأكد من سلامته ومصداقيته وملاءمته للتطبيق ويجرى الآن ربطه ببرنامج لدراسة تدفق الأحمال للحصول على بقية المعلومات عن جهود قضبان الشبكة وزواياها وكذلك القدرة غير الفعالة والضرورية للحصول على تحديد الخرج الإقتصادى للمحطات العاملة بالمنظومة . ويؤمل أن تتم أولى الدراسات الإقتصادية على المنظومة قريبا وتجدر الإشارة إلى أنه بعد إتمام ربط منظومتى الكهرباء بشرق وغرب الجماهيرية فى شبكة موحدة فإن دراسة التشغيل الإقتصادى سوف تأخذ بعدا

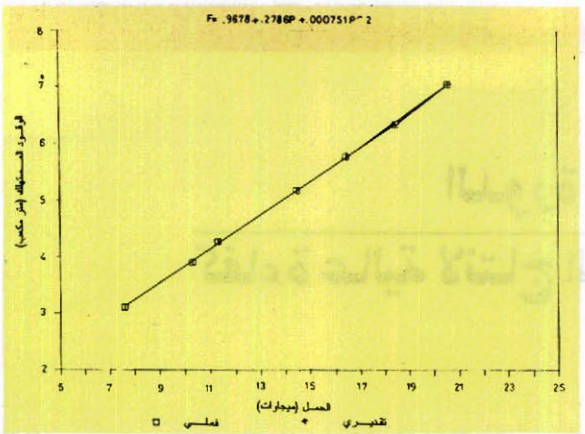


شكل (4) منحنى التشغيل لمحطة طبرق الوحدة الرابعة (65 ميجاوات)



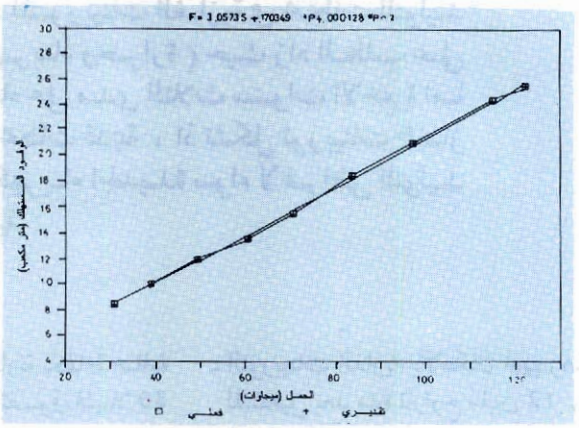
شكل (5)

منحنى التشغيل لمحطة درنة الوحدة الرابعة (65 ميجاوات)



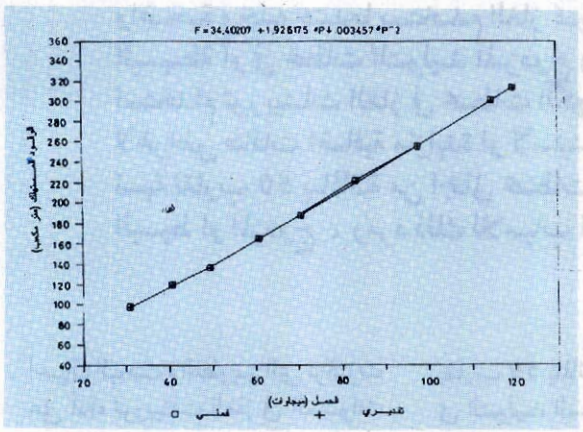
شكل (6)

منحنى التشغيل لمحطة درنة الوحدة الثالثة (25 ميجاوات)



شكل (7)

منحنى التشغيل لمحطة الخمس الوحدة الاولى (120 ميجاوات)

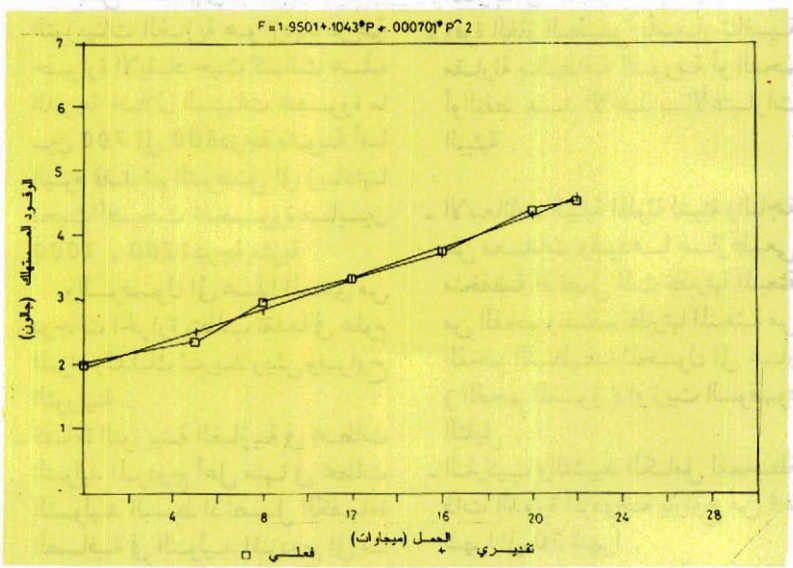


شكل (8)

منحنى التشغيل لمحطة الخمس الوحدة الثانية 120 ميجاوات)

جديدا فى المساهمة لتحديد أفضل حجم لتبادل الطاقة بين جزأى المنظومة الموحدة .

ونظرا لتغير الحمل من وقت لآخر فإنه قد يكون من المناسب أن يتغير عدد الوحدات العاملة تبعا للحاجة . كما أن هناك العديد من البرامج والطرق الحديثة والمعتمدة على تقنيات ورياضيات متقدمة لحل مثل تلك المسائل والتى فى إطارها البرمجة الخطية والبرمجة الديناميكية لتحديد العدد الأمثل من وحدات التوليد المطلوب تشغيلها وفق قواعد معينة .



شكل (9) منحنى التشغيل لمحطة غرب طرابلس الوحدة الثالثة (40 ميجاوات)