مجلة جامعة الملك عبد العزيز : العلوم الهندسية ، م٥ ، ص ص ٤٩ - ٦٧ (١٤١٣هـ / ١٩٩٣م)

تقويم الاعتمادية والتكاليف في التخطيط لأنظمة القوى الكهربائية

عبد الله محمد الشعلان

قسم الهندسة الكهربائية ، كلية الهندسة ، جامعة الملك سعود

الريـــــاض - المملكة العربية السعودية

المستخلص . يعتبر التخطيط لأنظمة القوى الكهربائية أمرًا شاقًا وباهظ التكاليف ، كما يعتريه الكثير من المشكوكية uncertainty والظواهر المستقبلية المتقلبة . وهذا البحث يبين كيف تتم دراسة وتحرى تلك الظواهر آخذًا في الاعتبار عاملين مهمين في عملية التخطيط ، وهما : الاعتمادية reliability والتكاليف . كما يبرز هذا البحث مزايا دمج الأنظمة من جهة وأهمية بعض خصائص النظام الكهربائي لأخذها في الاعتبار عند التخطيط من جهة أخرى .

١ . المقدمـــة

إن الغرض المطلوب من إنشاء أنظمة القوى الكهربائية هو إمداد المستهلكين بالطاقة الكهربائية بتكاليف معقولة مع ضمان مستوى من الاعتمادية يكفل تدفقًا مستمرًا لها .

لقد أصبحت الاعتمادية والتكاليف اعتبارين مهمين في تخطيط أنظمة القوى الكهربائية . وكل من هذين الاعتبارين يعتبر منافسًا للآخر ، بمعنى أنه عند زيادة الاعتمادية لابد أن يصحب ذلك زيادة في التكاليف ، لذلك يجب دراستهما بعناية . إن الهدف من عملية التخطيط هو إمداد الإدارات المختصة بمعلومات كافية ، وذلك بهدف إيجاد قاعدة سليمة لاتخاذ القرار السليم اليوم لسنوات قادمة في المستقبل . والتخطيط عادة يتم في ظل الكثير من الظواهر المستقبلية المتقلبة والمشكوك بوقوعها كالتنبؤ بنمو الأحمال ، وتكاليف إنشاء المحطات وكذلك تكاليف الوقود وأنواعه وإمكانية الحصول عليه . لذلك فإن عملية التخطيط عملية شاقة ومعقدة وباهظة التكاليف لاحتوائها على الكثير من المشكوكية ، ويدخل في ذلك أيضًا المتغيرات التقنية والاقتصادية والسياسية والبيئية والقانونية . . . إلخ . إن نتاج عملية التخطيط هو خطة (أو خطط) معينة للتوسع في التوليد ، أي توقيت وحجم إضافة وحدات سعوية معينة في كل مرحلة

من مراحل التخطيط . وهذه الخطط يجب أن تكون ذات مرونة كافية ليتمكن المهندسون والمختصون في الإدارات المعنية من عمل التغييرات المناسبة حينما تكون المشكوكية أكثر وضوحًا وجلاءً بمرور الوقت .

إن التوسع بعيد المدى لأنظمة القوى الكهربائية يجرى تخطيطه عادة لمدى عشرين أو ثلاثين سنة في المستقبل ، ولكن عند أي سنة من السنوات ربما تصبح الخطط بالية من حيث التقنية ، أو غير مناسبة من ناحية التكاليف وذلك بسبب ظهور مخترعات مستجدة أو زيادة في التكاليف ، أو ظهور أحمال لم يسبق التنبؤ بها أو أخذها في الحسبان ، لذلك يجب إعادة دراسة الخطط عند كل مرحلة من مراحل التخطيط وتحديثها حسب المغيرات أو المستجدات الحديثة . إن معضلة التخطيط تكون عادة مرتبطة بمجال واسع من البدائل ولكي يمكن التمييز والحكم على هذه البدائل لاختيار أفضلها وأقلها تكلفة يجب دراسة العوامل والظواهر المؤثرة على أداء الأنظمة الكهربائية .

ولعل الهدف من هذا البحث هو إيجاد دراسة تحليلية للعاملين اللذين سبق ذكرهما ، وهما الاعتمادية والتكاليف . إن جملة التكاليف المتعلقة بإنشاء نظام كهربائي يجب أن تشمل تكاليف التركيب والتشغيل والصيانة ، وكذلك تكاليف الطاقة التي لم يتم إنتاجها نتيجة لعدم كفاية التوليد وقصورها عن مجابهة الأحمال الحاضرة .

٢ . أساليب تقـــويم الاعتماديـــة

٢,١ مفاهـــيم عامـــة

هناك العديد من المعاملات المستخدمة لتقويم اعتمادية أنظمة التوليد[١-٤] ، وهذه المعاملات تشمل :

١) توقع فقد الحمل loss of load expectation, LOLE .

٢) توقع الطلب غير المتاح expected demand not served, EDNS .

٣) توقع فقد الطاقة loss of energy expectation, LOEE .

وهذه المعاملات تعتمد في صياغتها على طبيعة احتمالية ، وكل منها يدل على توقعات وقد تبدو نتائجها مختلفة ولكنها مكملة لبعضها البعض ، ويعتبر معامل LOLE الأكثر شيوعًا واستخدامًا في عمليات التخطيط نظرًا لسهولته ومرونته وأنه الأساس لحساب المعاملات الأخرى . ولعل محدوديته تنحصر في كون هذا المعامل ينبىء عن متوسط مجموع الفترات الزمنية المتوقع حدوث عجز في التوليد فيها ، وذلك خلال فترة زمنية معينة وتكون وحداته يوم/سنة عادة ، ولكنه لايبين حجم هذا العجز ، ولهذا السبب يجب استخدام تلك المعاملات المذكورة الأخرى المتممة ، وذلك لمعرفة مدى ذلك العجز وكذلك حجم الطاقة المفقودة نتيجة لذلك العجز . ونظرًا لأهمية تلك المعاملات فإنه سيجرى في البحث استعراض لطرق وأساليب إيجاد تلك المعاملات فيما يلي .

٢,٢ نمـــاذج السعـــة والحمـــل *Capacity and Load Models*

إن الخطوة الأولى لإيجاد أي من تلك المعاملات آنفة الذكر هو تحديد نماذج وصفية ، وهي معامل السعة ومعامل الحمل . وهذان المعاملان يجرى دمجها معًا للتوصل إلى مستوى المخاطرة risk level .

ولكي يتم إيجاد معامل السعة ، فإن كل وحدة في النظام الكهربائي (سواءً كانت موجودة بالفعل أو يتم إضـافتها) يجري تمثيلها بنموذج الحالة الثنائية أو المتعددة ، وكل حالة تمثل حجم السعة المنفردة ودرجة الاحتمالية المرتبط بها . وعندئذ يجرى تدوير كل حالة على حدة ، وينتج من هذه العملية جدول يعرف بجدول احتمال السعات المفقودة capacity outage probability table (COPT) ، وهذا الجدول يمثل كل السعات المحتمل فقدها ودرجة الاحتمالية المرتبطة بها .

وهناك العديد من نماذج الأحمال الممكن استخدامها ، ولعل أبسطها هو تمثيل كل يوم بحدوث الحمل الأقصى فيه ، ثم يجري ترتيب تلك الأحمـال تنـازليًا حسب حجمها ، وعندئذ يتم الحصول على نمط تراكمي لنموذج الحمل يعرف بالمنحني المتغير لأحمال الذروة اليومية daily peak load variation curve (DPLVC) ، وإذا تم استخدام الساعات بدل اليوم فإن النموذج الناتج يعرف بمنحني أمد الحمل load duration curve (LDC) ، وفي هذه الحالة فقط تمثل المساحة تحت هذا المنحني الطاقة المسحوبة من النظام الكهربائي .

٢,٣ توقـــع فقـــد الحمـــل *LOLE*

يتم إيجـاد معـامـل LOLE بدمج نموذج السعة بأي من نموذجي الحمل المذكورين DPLVC أو LDC ، والأول هو الأكثر استعمالاً ، ويبين تطبيق هذين النموذجين متوسط الوقت في فترة معينة تكون فيها سعة التوليد أقل حجمًا من الحمل المطلوب . فلو استخدم الـ DPLVC فإن وحدات المعامل تكون يوم/الفترة ، بينما إذا استخدم الـ LDC فإن وحدات المعامل تكون ساعة/الفترة . ومن الواضح أن هذا المعامل يبين فقط معدل الوقت خلال فترة معتبرة تكون فيها الأحمال المفروضة أكبر حجمًا من القدرة المركبة لوحدات التوليد المتاحة في النظام الكهربائي ولكنه لا يبين حجم ذلك الحمل المفقود . وهذا المعامل يمكن تقويمه كما يلي :

$$\text{LOLE} = \sum \rho_k \, t_u \quad \text{time units / period}$$

حيث

ρ_k = احتمال وقوع الحدث رقم (k) لفقد السعة .

t_k = الوقت الذي يتجاوز الحمل خلاله قدرة التوليد .

٢,٤ توقـــع الطلب غـــير المتـــاح *EDNS*

إن العجز الواضح في معرفة حجم الحمل المفقود في معامل الـ LOLE يمكن التغلب عليه بوساطة تطبيق الـ EDNS . أما أسلوب إيجاده فهو مشابه لمعامل الـ LOLE ، ويمكن استخدام نفس نموذجي

السعة والحمل المذكورين . وهذا المعامل يمكن حسابه كما يلي

$$EDNS = \Sigma \rho_k D_k \quad MW$$

حيث D_k يمثل حجم الحمل المفقود (نتيجة تجاوز الحمل لقدرة التوليد) .

٢,٥ توقع فقد الطاقة *LOEE*

أصبح استخدام هذا المعامل أكثر شيوعًا واستعمالاً باعتباره معامل طاقة ، وهي الأكثر أهمية والتصاقًا بالنسبة للمستهلك ، ولذلك فهو يعكس فقد طاقة عندما يتجاوز الحمل قدرة النظام المركبة . ويمكن إيجاد الـ LOEE باستخدام نفس نموذج السعة مع نموذج الحملLDC ، أما نموذج الحمل DPLVC فلا يمكن استخدامه لأنه لايمثل الطاقة المسحوبة من النظام . لذا فإن الـ LOEE يمكن حسابها كما يلي

$$LOEE = \Sigma E_k \rho_k \quad MWh / period$$

حيث E_k = الطاقة المفقودة نتيجة الانقطاع k .

٣ . أساليب تقويم التكاليف

٣,١ تكاليف النظام الكهربائي

هناك تكاليف متعددة[٥،٦] مرتبطة بأنظمة القوى الكهربائية منها :

أ - التكاليف الرأسمالية والمتعلقة بإنشاء وحدات التوليد الجديدة .

ب - تكاليف التشغيل والصيانة الثابتة والمتعلقة بالمباني والمواد وقطع الغيار والإصلاح ورواتب المهندسين والموظفين .

جـ - تكاليف التشغيل المتغيرة والمتعلقة أساسًا بالوقود وتشغيل الوحدات .

د - تكاليف انقطاع الطاقة الكهربائية ، وهي المتعلقة أساسًا بالتكاليف والخسائر التي يمنى بها المستهلكين من جراء توقف الطاقة .

ويمكن إيجاد التكاليف المذكورة باستخدام طريقة القيمة الحالية للتكاليف present value (PV) ويمكن استخدام تكاليف انقطاع الخدمة الكهربائية كمعيار أو مؤشر للوصول إلى المستوى الملائم للاعتمادية .

٣,٢ التكاليف الرأسمالية للنظام *Capital Cost (CC)*

تمثل التكاليف الرأسمالية (CC) تلك التكاليف المطلوب دفعها عند كل سنة من سنوات التشغيل والناجمة عن إنشاء وتركيب محطات التوليد ، وهذه الدفعات تمثل جميع التكاليف التي تتحملها الشركة عادة كالفوائد عن القروض والتأمين والاستهلاك والضرائب . لذا فإن جملة التكاليف الرأسمالية لتركيب وحدة i تكون كما يلي

$$CC = \sum_i C_i \ . \ (cost / k W_i)$$

حيث

C_i = سعة الوحدة i المراد إنشاؤها .

(cost / $k W_i$) = التكاليف لكل كيلو وات .

٣,٣ تكاليف التشغيل الثابتة *Fixed Charges (FC)*

هذه التكاليف FC هي المصروفات الخاصة لتغطية نفقات الصيانة والإصلاح وأجور المهندسين والفنيين الخاصة بالتشغيل ، وهذ التكاليف لها ارتباط بنوع وحجم المحطات الكهربائية . ويمكن حسابها كما يلي

$$FC = \sum_i (C_i) \cdot (OMF_i)$$

حيث OMF_i = تكاليف التشغيل والصيانة الثابتة للوحدة i .

٣,٤ تكاليف التشغيل والصيانة المتغيرة *Variable Cost (VC)*

تنحصر تكاليف التشغيل والصيانة المتغيرة VC بشكل رئيس في تكاليف الوقود أو بعبارة أخرى تكاليف إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية ، ويؤثر في هذه التكاليف بشكل مباشر أو غير مباشر عوامل محددة ، مثلاً ، طبيعة وحجم الحمل الكهربائي ، منحني أمد الحمل ، ساعات التشغيل ، نسبة وجود الوحدة في الفترة المعتبرة . لذلك يمكن إيجاد هذه التكاليف كما يلي

$$VC = \sum_i (E_i)\ (OMV_i)$$

حيث

(OMV_i) = تكاليف إنتاج وحدة الطاقة لكل كيلو وات ساعة .

(E_i) = الطاقة المنتجة (ميجاوات ساعة) من الوحدة i .

لذا يمكن حساب التكاليف الإجمالية للنظام الكهربائي system cost (SC) كما يلي

$$SC = CC + FC + VC$$

٣,٥ تكاليف الطاقة غير المتاحة

تحدث الانقطاعات الكهربائية عادة نتيجة عدم وجود قدرة كهربائية كافية لدى النظام الكهربائي لمجابهة أي حمل مطلوب في أي لحظة من لحظات الزمن ، وتنتج عادة بسبب خروج بعض الوحدات نتيجة أعطال قسرية أو قصور في سعة الشبكات الكهربائية ، أو نتيجة لنمو الأحمال نموًا كبيرًا وغير متوقع ، أو بسبب خطأ في عملية التنبؤ بالأحمال أثناء فترة التخطيط . ويعتبر انقطاع الخدمة من أسوأ الأحداث ، إذ ربما تحدث في فترات معينة يكون المستهلك في أشد الحاجة لها وينجم عنها معاناة نفسية وخسائر مادية تتراوح بين الضيق والحرج بالنسبة للمستهلك السكني إلى الخسائر المادية وتوقف الإنتاج بالنسبة للمستهلك التجاري والصناعي ، كما أنها ذات تأثير سيء قد ينعكس أثره على الشركة ذاتها إذ ستفقد ثقة المستهلك ، وربما نتيجة لذلك قد يهتز وضع الشركة المالي والتجاري بفقد مبيعاتها ونشاطاتها وزيادة نفقاتها في إصلاح وصيانة المولدات والشبكات والمحطات .

وهناك طرق وأساليب لتقويم تلك الخسائر[٧-٩] وهي باختصار تعتمد على مدى استعداد واحتياطات المستهلك لمجابهة تلك الانقطاعات ، كما أن هذه المعاناة والخسائر تزداد مع أمد الانقطاع ووقت حدوثه (في الصيف مثلاً قد يكون من أسوأ فترات الانقطاع بالنسبة لاستخدام التكييف) كذلك طبيعة المستهلك (سكني ، تجاري ، صناعي ، زراعي ، حكومي . . . إلخ) لأن كل قطاع سيكون تأثير الانقطاع لديه مختلفًا عن الآخر ، فمثلاً إذا حدث الانقطاع في المساء فإن المستهلك السكني سيحرم من الكثير من النشاطات التي تعوَّد أن يقوم بها أثناء المساء ، وإذا حدث أثناء النهار فإن المستهلك التجاري سيضطر إلى إغلاق متجره أو معرضه ويحرم من مواصلة نشاطه التجاري ، كذلك إذا حدث الانقطاع أثناء فترة الإنتاج بالنسبة للمستهلك الصناعي فسيتوقف إنتاجه ويضطر إلى إغلاق مصنعه حتى تعود الطاقة ليستأنف الإنتاج ، وربما ينجم عن ذلك خسائر جسيمة وتكاليف كبيرة نتيجة لفقدان الطاقة . لذلك فإن تأثير انقطاع الخدمة يتفاوت تبعًا لطبيعة المستهلك ووقت وأمد الانقطاع ، وكذلك مدى توقع المستهلك لتلك الانقطاعات من وسائل احتياط لديه استعدادًا لمجابهتها والتخفيف من تأثيرها .

وفيما يلي نستعرض أهم قطاعات المستهلكين والخسائر المحتملة التي ربما يمنون بها نتيجة حدوث الانقطاعات :

أ - السكني : يتراوح تأثير الانقطاعات بين مجرد الضيق لحرمانه من الإنارة وممارسة نشاطاته المعتادة حتى الفترة الحرجة للحرمان من التكييف (صيفًا وشتاءً) وربما سيمنى بخسائر مادية نتيجة لفساد الأطعمة وتلفها لو امتد أمد الانقطاع فترات أطول .

ب - التجاري : سيمنى هذا القطاع بفقد المبيعات وتلف بعض الموجودات ونقصان عوامل الأمان والسلامة للموظفين والزبائي .

جـ - الصناعي : أكثر المستهلكين تأثرًا بانقطاع الخدمة ، إذ سيعني ذلك توقف الإنتاج وتلف المتجات وعطب الآلات وانخفاض في كمية وجودة الصناعات .

د - الخدمات العامة : سيتأثر هذا القطاع الذي يشمل المدارس والمستشفيات ودور الإذاعة والتلفزيون والمؤسسات الحكومية المختلفة ووسائل الاتصالات ووسائل النقل التي تعمل بالكهرباء ، كذلك ستتأثر وسائل الأمان والحماية كإشارات المرور ، كذلك أجهزة الحاسبات الإلكترونية (الكمبيوتر) .

وفي المراجع الثلاثة[٧-٩] أُجريت دراسات مستفيضة لتقويم تلك الخسائر ، وقد تم الوصول إلى تحديد تكاليف الانقطاعات مع الأخذ في الاعتبار أيضًا موسم الانقطاعات وتصنيف فئات المستهلكين ، وهذه التكاليف تتجاوز إلى حد كبير السعر الاسمى المحدد للطاقة المباعة .

لذلك يمكن حساب تكاليف الانقطاع outage cost (OC) كما يلي

$$OC = \sum_i (LOEE)_i \ (cost / k\,Wh_i)$$

حيث $(cost / k\,Wh_i)$ هي التكاليف المحددة لفقد وحدة الطاقة بالكيلو وات / ساعة .

٤ . نمـــاذج مطـــورة للتخطيـــط بعيـــد المـــدى للتوســـــع في محطـــات التوليـــد

جرى تطوير نماذج وأساليب لإنجاز المهمات المطلوبة لعملية التخطيط بعيد المدى منها :

أ - برنامج لتقويم السعة[٦] ، ويقوم بتقويم الاحتياجات بإضافة وحدات جديدة (إذا دعت الحاجة إلى ذلك ، تبعًا لمستوى الاعتمادية المحدد عند كل مرحلة من مراحل التخطيط ، ويقوم عندئذ بتقويم مستويات الاعتمادية بحساب المعاملات التي جرى ذكرها آنفًا في القسمين (٢,٣ ، ٢,٤) .

ب - برنامج تقويم الطاقة[١٠] ، ويقوم بحساب الطاقة غير المتاحة والتي جرى ذكرها في القسم (٢,٥) .

جـ - أسلوب لتحديد تكاليف وحدة الطاقة غير المتاحة لجميع فئات المستهلكين[١١] .

د - أسلوب لربط الأنظمة الكهربائية المعزولة[١٢] .

٥ . تطبـــيق الأساليب والطرق المطـــورة

لقد جرى تطبيق وتنسيق بين الأساليب والطرق المذكورة آنفًا ، وذلك في دراسة مستفيضة عنيت بالتركيز على حل مشكلة من مشاكل التخطيط التي تجابه الإدارات المعنية والمخططين لأنظمة القوى ، وهذه الدراسة تقوم بتحليل ثلاثة نظم كهربائية في منطقة ما ، قد تكون في بلد نامٍ أو بلد صناعي (انظر الملحق) ، ويمكن تطبيق هذه الأساليب في المملكة العربية السعودية باعتبارها منطقة مثالية لمثل هذه الدراسة ، حيث إن الأنظمة الكهربائية بها تكبر وتمتد بسبب تنامي الأحمال وتزايد الدخل القومي واتساع رقعة العمران وارتباط الأنظمة الكهربائية في مناطق مختلفة بعضها ببعض .

٦ . توســـع الأنظمـــة في حالة كونهـــا معزولة ومرتبطـــة

٦,١ مقـــدمـــــة

عنيت الدراسة بتخطيط ثلاثة أنظمة على مدى الـ ٢٠ سنة القادمة ، وقد شملت هذه الدراسة تخطيط هذه الأنظمة في حالة كونها معزولة ومستقلة وفي حالة كونها مرتبطة مع بعضها . ولعل النتائج من هذه الدراسة تبين الفوائد (إن وجدت) من جراء كون الأنظمة مرتبطة وغير معزولة ، وكذلك تبرز مدى فائدة الخطة المعتبرة وبدائلها ومدى سلامة صنع القرار اللازم نحو الأخذ بخطة معينة أو بديل عنها ، إن النتائج المقدمة في هذا البحث تعتمد على تصورات محددة تتعلق بالتكاليف ونمو الأحمال ومتاحية الوحدات ونمط الاستهلاك ومستوى الاعتمادية (انظر الملحق) . لكن في الواقع وعند دراسة حالات حقيقية يجب الأخذ في الاعتبار المزيد من التصورات وعدم الاكتفاء بهذه التصورات المحددة .

٦,٢ ظاهـرة المشكوكيـة في التنبـؤ بالأحمـال

تتضمن الدراسة إجراء خطة بعيدة المدى لمدة ٢٠ سنة قادمة لثلاثة أنظمة كهربائية (A, B, C) ، وذلك تحت تصور لنمو الأحمال المستقبلية بشكل صحيح أو يعتريه قدر من المشكوكية ، وقد قدرت بنحو ١٥٪ زيادة أو نقصًا . وتكون هذه النسبة ثابتة خلال فترة التخطيط . ولقد جرى نمذجة هذه المشكوكية على شكل دالة التوزيع الطبيعي normal distribution (انظر المرجع رقم [١] ص ٤٥) . ويُبرز جدول (١) نتائج هذه الدراسة ، ويبدو واضحًا من الجدول أن عدد الوحدات المطلوبة وتكاليفها قد ازداد في حالة المشكوكية ، فعدد الوحدات قد ازداد بنسبة ٤٧٪ وتكاليف إنشائها ازداد بنسبة ٣٨٪ .

جـدول (١) تغـير التكاليف مع المشكوكيـة في التنبـؤ بالأحمـال الكهربائيـة .

النظـام	التأكـدية		المشـكوكيـة	
	عدد الوحدات	التكاليف (مليون ريال)	عدد الوحدات	التكاليف (مليون ريال)
A	٨	٢٠٦٤	١١	٢٨٧٣
B	٥	١٤٩٠	٧	١٩٨٦
C	٢	٧٩٦	٤	١١٦٤
المجموع (معزولة)	١٥	٤٣٥٠	٢٢	٦٠٢٣
المجموع (مدمجة)	١١	٢٧٦٤	١٧	٥٠١٦

ومما يلاحظ أيضًا من جدول (١) أنه نتيجة للربط ودمج الأنظمة فإن هناك نقص في عدد الوحدات بالمقارنة مع عدد الوحدات المطلوب إضافتها لكل نظام على حدة (أي بدون ارتباط بينهم) . وهذا يُبرز أحد مزايا توحيد الأنظمة وهو خفض عدد الوحدات وتكاليف إنشائها مما ينتج عنه أيضًا خفض تكاليف الوقود والتشغيل والصيانة ، وعلى أي حال يجب أن يسبق القرار بدمج الأنظمة دراسة مستفيضة لتكاليف إنشاء شبكات الربط تبرز وجود وفر في ربط الأنظمة .

٦,٣ المشكوكيـة في توقيت إضافـة الوحـدات

إن احتمال تقديم أو تأخير التوقيت لإضافة الوحدات المطلوبة يجب أن يؤخذ في الحسبان أثناء عملية التخطيط ، وذلك إما لظهور أحمال طارئة تستدعى التعجيل أو تحت ظل ظروف اقتصادية معينة تقتضى التأجيل . ولقد جرى دراسة هذه الظاهرة وجرى تلخيص النتائج في جدول (٢) . وتدل هذه النتائج على مدى تأثير تقديم أو تأجيل إضافة الوحدات لمدة سنة واحدة على خطط التوسع سواء كان النظام الكهربائي منعزلاً أو مرتبطًا بنظام آخر .

من جدول (٢) ، يبدو واضحًا أنه لو جرى تأجيل إضافة الوحدات سنة واحدة عن الموعد المحدد فإن هامش الخطورة سيزداد وسيصاحب ذلك بالطبع خفض في التكاليف الإنشائية ، ولكن سيكون هناك

جـدول (٢) تغـير التكاليف مع المشكوكيـة في توقيت الوحـدات (بملايـين الريالات) .

النظام	عدد الوحدات	الموعد المحدد		الموعد المؤجل		الموعد القادم	
		تكاليف النظام	تكاليف الانقطاع	تكاليف النظام	تكاليف الانقطاع	تكاليف النظام	تكاليف الانقطاع
A	٨	٢٠٤٦	١٣,٨	١٨٠٠	١٧,٦	٢٧٤٣	٧,٨
B	٥	١٤٩٠	١٢,٤	١٢٤٥	١٥,٣	١٨٥١	٦,٤
C	٢	٧٩٦	٩,١	٥١٠	١١,٨	١٠٣٥	٣,١
المجموع (معزولة)	١٥	٤٣٣٢	٣٥,٣	٣٥٥٥	٤٤,٧	٥٦٢٨	١٧,٣
المجموع (مدمجة)	١١	٣٨٣٤	٢٢,٧	٢٩٨٧	٢٨,٤	٤٩٧٥	١٠,٢

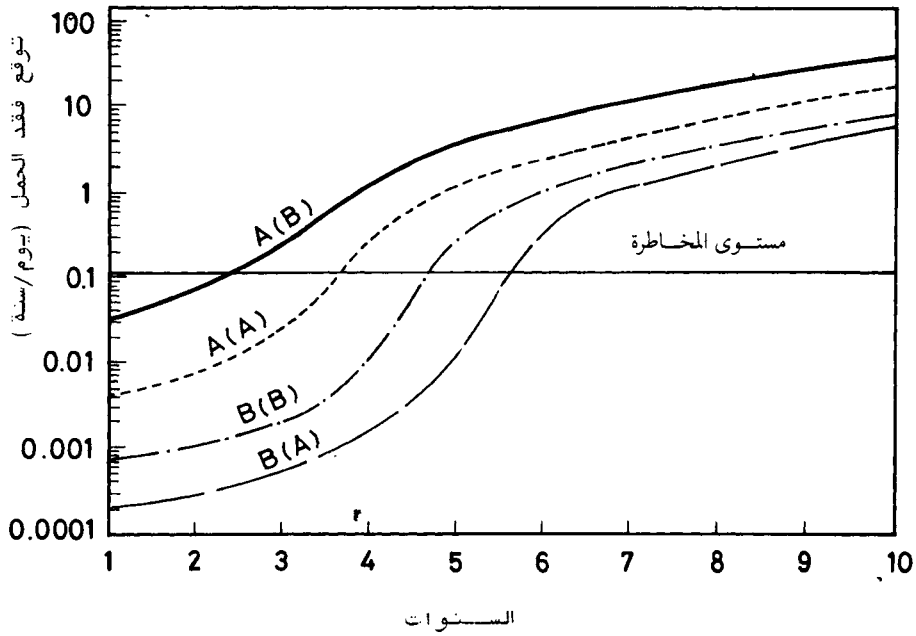
ارتفاع في تكاليف الانقطاعات نتيجة لتردي مستوى الاعتمادية . كذلك في حالة تقديم توقيت الإضافة سنة واحدة فإن ذلك سيصاحبه زيادة في تكاليف الإنشاء ، ولكن سيتحسن مستوى الاعتمادية ويتضاءل هامش الخطورة ، ويبرز ذلك في النقص الواضح في تكاليف الانقطاعات . ويبين الجدول أيضًا أن هناك وفرًا واضحًا يرجِّح أهمية توحيد الأنظمة وأن هناك مزايا بلاشك في دمجها بدلاً من تركها مشتته ومتباعدة .

٦,٤ تحسن الاعتماديـــة عند ربـــط الأنظمـــة

يُهتم هذا التحليل بتقويم الاعتمادية لنظامين في حالة كونهما معزولين وفي حالة كونهما مرتبطين بخط نقل . وهذا التحليل يبرز المزايا الفنية التي ربما تنتج من ربط الأنظمة بدلاً من كونها معزولة ومتفرقة . لذلك فقد تمت دراسة ربط النظامين (A و B) لمدة عشر سنوات قادمة مع اعتبار أن مستوى الاعتمادية المطلوب - والذي لا يجب أن يتغير خلال هذه الفترة - هو (0.1 day/year) وهذا الرقم يمثل المستوى العملي الذي يطبقه الكثير من شركات الكهرباء والمخططون في الإدارات المعنية . إن الدراسة التحليلية تمثل خطط التوسع لكلا النظامين في حالة كونهما معزولين أولا [$A(B)$ و $B(B)$] ثم في حالة كونهما مرتبطين [$A(A)$ و $B(A)$] ، ولقد تمت هذه الدراسة من خلال تطبيق أسلوب ربط الأنظمة المعزولة الآنف ذكره ونتائج هذه الدراسة تظهر في شكل (١) .

لو أن النـظامـين عززا حيثـما يتـطلب مستـوى الاعتـمادية ذلك خلال سنوات التخطيط المعتبرة ، فإن الجدول (٣) يبين نتائج هذه الخطة والتي تدل على أن عدد الوحدات المطلوب إضافتها لمجابهة الأحمال المستقبلية حسب مستوى الاعتمادية المقرر وكذا تكاليفها قد انخفض في حالة كون النظامين مرتبطين لامعزولين .

لذلك فمن الممكن أن نستنتج من شكل (١) وجدول (٣) أن كلا النظامين سيستفيد من *عملية الربط* ،



شكل (١) تغير مستويات الاعتمادية قبل وبعد عملية الربط .

جدول (٣) التكاليف للأنظمة المعزولة والمرتبطة .

النظام	معزولة		مرتبطة	
	عدد الوحدات	التكاليف (مليون ريال)	عدد الوحدات	التكاليف (مليون ريال)
A	٣	٩٨٠	١	٤٦٠
B	٢	٧٥٢	١	٣١٥
C	١	٤٣٧	-	-
المجموع	٦	٢١٦٩	٢	٧٧٥

فالاعتمادية لكلا النظامين ستتحسن تبعًا لذلك وسيكون هناك وفر في التكاليف ، وعلى كلٍ فسيكون هناك تكاليف لخطوط الربط ، وعلى هذا فيجب أن يكون هناك دراسة مستفيضة لعملية الموازنة بين تكاليف الربط والوفر الناتج عنه ، وعلى ضوء ذلك يتضح هل سيكون الربط أجدى أم أن إضافة وحدات جديدة لكل نظام على حده هو الأجدى والأقل تكلفة .

٧ . تحليلات متعلقة بالخصائص ذات التأثير على عملية التخطيط

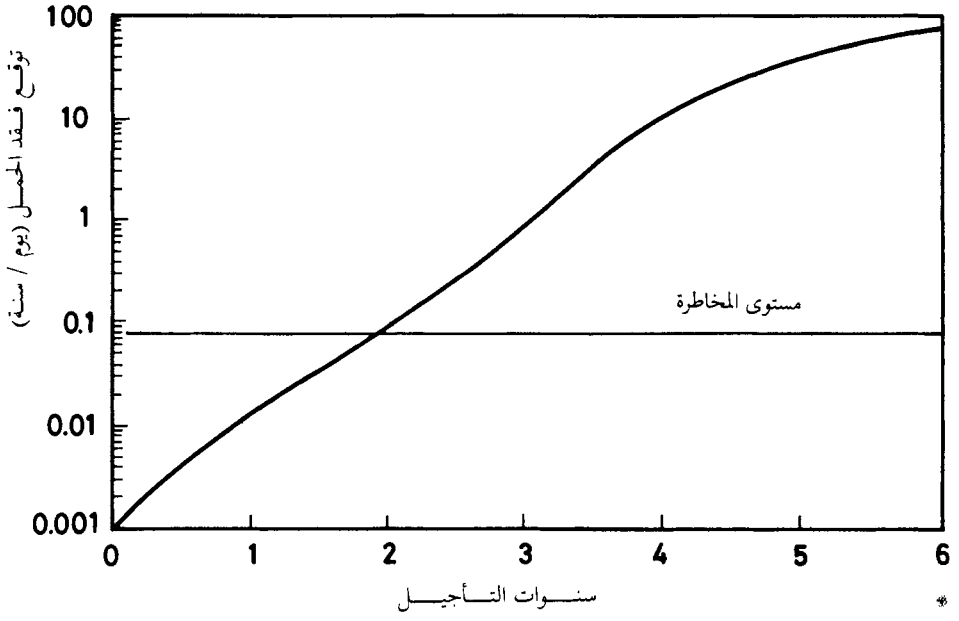
هناك عوامل يجب مراعاتها عند إجراء عملية التخطيط ، وتختص بدراسة أثر التغير والمشكوكية في بعض

خصائص النظام وكذلك الظواهر المحيطة به ، وذلك لمعرفة تأثيرها على مستويات الاعتمادية وتكاليف الإنشاء والتشغيل ، وفي الأقسام التالية سيتم اختيار بعض تلك الخصائص لمعرفة مدى تأثيرها على أداء النظام قبل اتخاذ القرار النهائي في اختيار الخطط والبدائل . ولقد تم اختيار النظام (B) لإجراء هذه التحليلات .

٧,١ تأثير تأجيل أو تقديم إضافة الوحدات

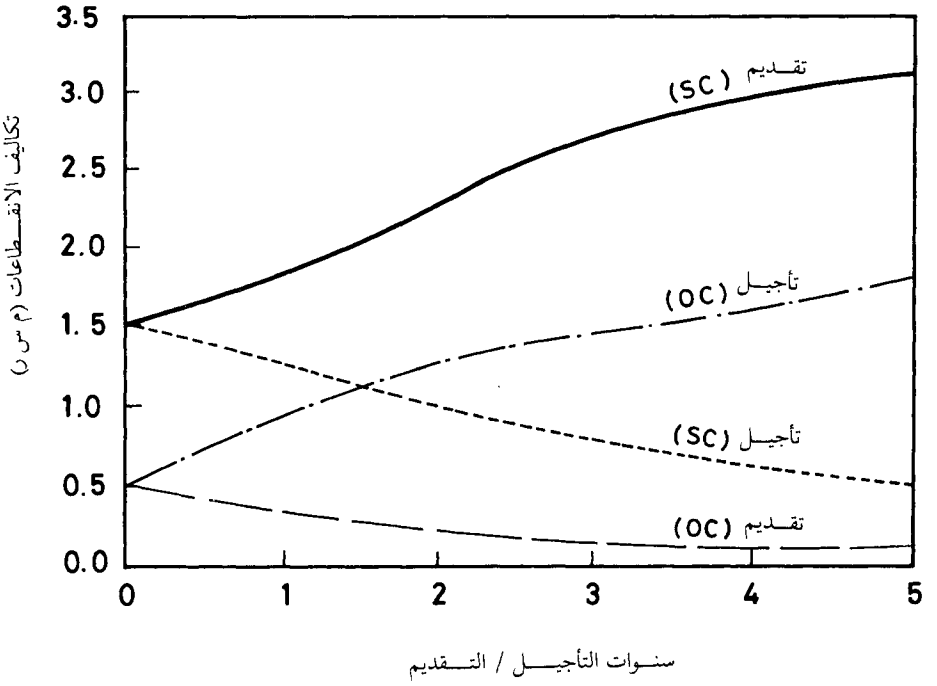
من المحتمل جدًا - وتحت وطأة ظروف معينة - أن يكون هناك رغبة في تقديم advance توقيت إضافة الوحدات عن موعده المحدد ، وذلك لمجابهة أحمال طارئة لم تكن في الحسبان أثناء مرحلة التخطيط . أو ربما يكون هناك رغبة في تأجيل delay هذه الإضافة لفترات قادمة ، وذلك إما لتلافي تكاليف الإنشاء الباهظة أو عدم ظهور أحمال كهربائية تستدعي هذه الإضافة .

لقد تمت دراسة تأثير تأجيل إضافة الوحدات إلى أكثر من سنة ، وهذا بالطبع سيؤثر على مستوى الاعتمادية المطلوب ، وهذا التأثير يبدوا واضحًا في شكل (٢) ، وكذلك على التكاليف الكلية للنظام (SC) وتكاليف الانقطاعات (OC) والتي يمنى بها المستهلكون بشكل رئيس (شكل ٣) .



شكل (٢) تأثير التأجيل على مستوى الاعتمادية .

ونستطيع أن نستشف من شكل (٣) أنه لو حدث تأجيل لإضافة وحدة ما (أو عدة وحدات) إلى السنة التي تليها أو أكثر من ذلك ، فإن التكاليف للنظام ستقل (بحكم تأثير الزمن على التكاليف) ولكن بالمقابل



شكل (٣) تأثير التأجيل / التقديم على التكاليف .

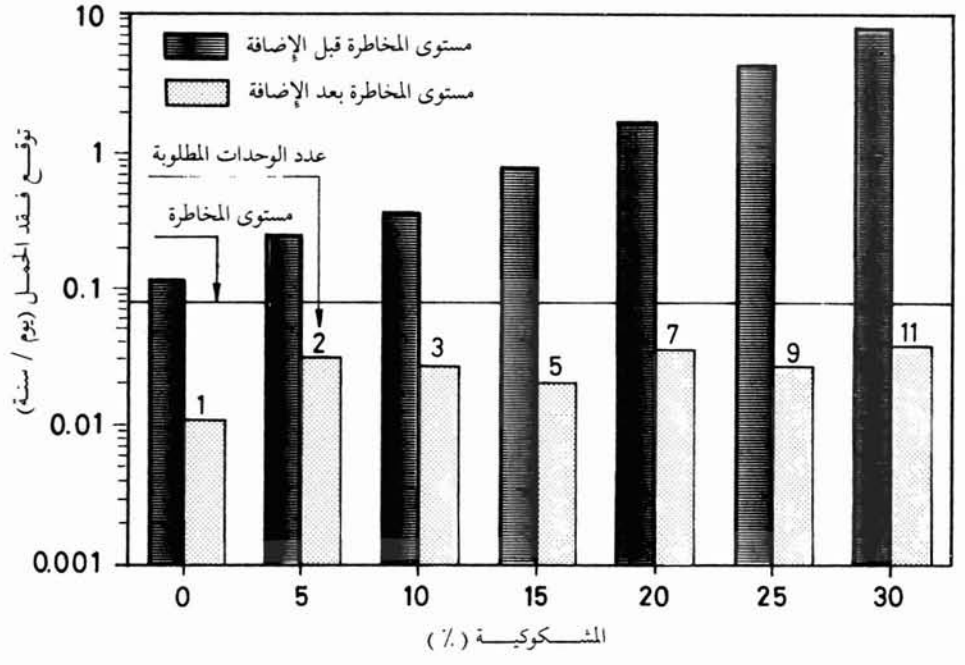
سترتفع تكاليف الانقطاعات ، وذلك تبعًا لانخفاض مستوى الاعتمادية . وفي حالة تقديم إضافة الوحدات عن توقيتها المحدد ، فإن ذلك يعني ازدياد تكاليف الإنشاء والتشغيل ولكن ستتحسن الاعتمادية إلى الحد الذي تقل فيه انقطاعات الخدمة الكهربائية . وعلى كل فالقرار يجب أن يُتخذ على ضوء المزايا والفوائد التي ستنجم من تقديم أو تأجيل توقيت إضافة الوحدات ، كما يجب دراسة وتقويم مستويات الاعتمادية وتقويم تكاليف الانقطاعات ومواءمتها بالتكاليف الكلية قبل اتخاذ قرار التقديم أو التأجيل .

٧,٢ تأثير زيادة المشكوكية في التنبؤ بالأحمال الكهربائية

أصبح للأحمال الكهربائية أهمية كبيرة في عملية التخطيط لما لها من تأثير محسوس على مستويات الاعتمادية للنظام الكهربائي وتكاليفه .

لقد أُجريت دراسة لتحري تأثير زيادة الطلب غير المتوقع على مستويات الاعتمادية والتكاليف . ولقد جرى تغيير المشكوكية في التنبؤ بالأحمال المستقبلية بدرجة تتراوح بين (0-30%) ، ولقد أبرزت الدراسة النتائج الموضحة في شكل (٤) . وهذه النتائج تبين أنه في حالة زيادة المشكوكية فإن عدد الوحدات المطلوب إضافتها سيزداد ، وذلك لضمان مستوى المخاطرة risk level . وهذا بالتالي سيتطلب زيادة في التكاليف . وفي حالات معينة قد لايعني تجاوز مستوى الاعتمادية الحد المطلوب أن هناك ضرورة لإضافة الوحدات ،

ولكن بالإمكان تأجيل هذه الإضافة حتى السنة أو السنوات القادمة ، وقد يُرى أيضًا أنه من الأفضل تقديم الإضافة ولو أن هذا سيصاحبه زيادة في التكاليف . يُبرز شكل (٤) تأثير هذه المشكوكية على مستويات الاعتمادية ، كما يُبرز أيضًا مستويات الاعتمادية بعد إضافة الوحدات المطلوبة للحفاظ على مستوياتها المطلوبة . ويوضح هذا التحليل أن المشكوكية في الطلب المتوقع تتطلب نفقات أكبر عما لو كانت الأحمال معروفة بالتأكيد . وعلى هذا تبرز مدى أهمية هذا العامل الذي يجب أن يؤخذ في الاعتبار عند التخطيط طويل المدى للأنظمة الكهربائية .



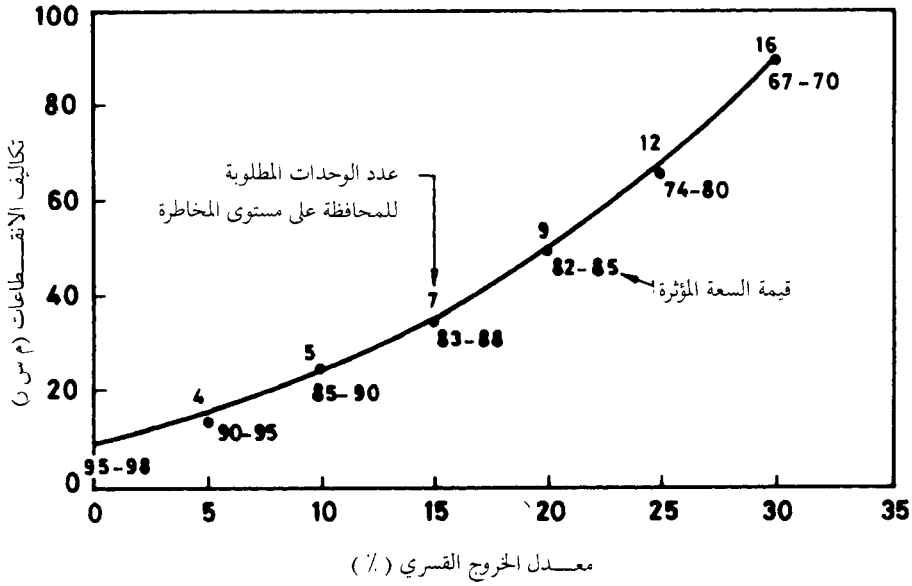
شكل (٤) تأثير المشكوكية في الأحمال على مستويات الاعتمادية .

٧,٣ تأثير الخروج القسري للوحدات من الخدمة

تعتمد مستويات الاعتمادية على أداء وحدات التوليد العاملة في النظام الكهربائي بالنسبة لعمرها الافتراضي ومدى وجودها في الخدمة ، ويعبر عن هذا بما يعرف عادة بـ « معدل الخروج القسري للوحدة » forced outage rate, FOR .

ولقد تم في هذا التحليل توقع احتمال زيادة في قيم ذلك المعامل ، وذلك لدراسة مدى تأثيره على مستوى الاعتمادية وحجم التكاليف . ولعل شكل (٥) يُبرز لنا تغير هذا المعامل بتغير جملة من خصائص النظام الكهربائي تبعًا لذلك ، منها الزيادة المطلوبة في عدد الوحدات وتكاليف الانقطاعات وقيمة السعة المؤثرة

للوحدة effective unit capacity, EUC . وتعتبر الـ EUC أقل من قيمة السعة المقدرة أو المصمَّم لها ، وذلك بسبب متطلبات الاعتمادية (انظر المرجع [٢] ، ص ٨٤) .



شكل (٥) تأثير الخروج القسري للوحدات على أداء النظام الكهربائي .

إن النتائج التي تظهر في شكل (٥) تُعبر عن مدى حساسية بعض خصائص النظام لمعامل الـ FOR . كما يبدو من الشكل أيضًا مدى تأثير هذا المعامل على السعة المؤثرة للوحدة ، إذ إن هذه السعة تتناقص كلما ازداد هذا المعامل ، وحجم الوحدات المستخدمة في هذا التحليل هو 100 MW . وقد أُجريت أيضًا دراسة لمعرفة مدى تغير هذه السعة بالنسبة لأحجام مختلفة من الوحدات ، وجدول (٤) يبين نتائج هذه الدراسة .

جدول (٤) تأثير استخدام وحدات ذوات أحجام مختلفة .

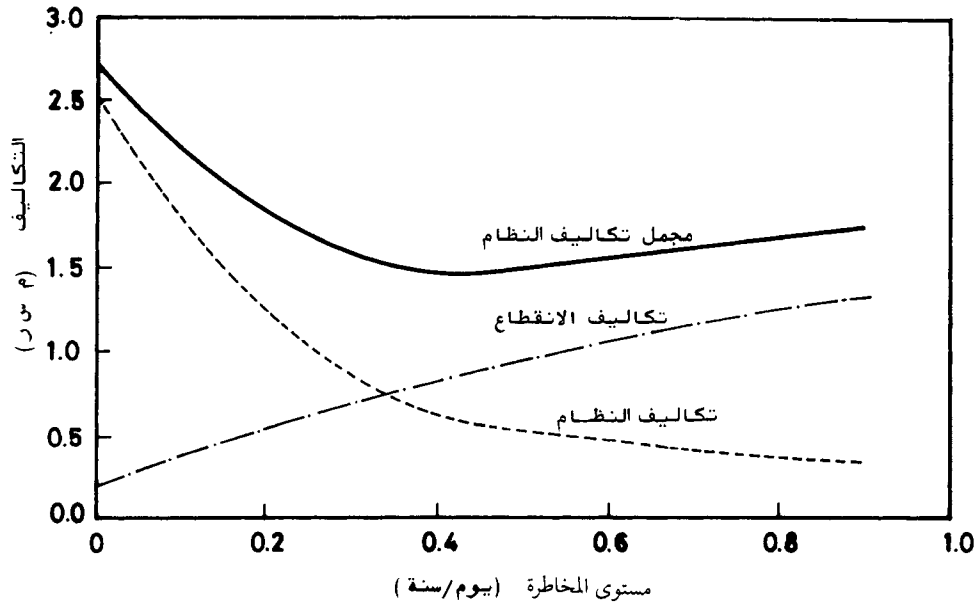
حجم الوحدة	عدد الوحدات	السعة المؤثرة (ميجاوات)
٤٠٠	٤	٣٤٠ - ٣٧٠
٣٠٠	٦	٢٦٦ - ٢٨٠
٢٠٠	٨	١٧٨ - ١٨٥
١٠٠	٩	٩٢ - ٩٨

ويبدو من جدول (٤) أن الوحدات الصغيرة تتميز بكبر حجم السعة المؤثرة بالقياس إلى الأحجام

الأكبر . إذا كانت الأحجام الصغيرة للمولدات قد تعتبر أفضل من ناحية تحسن مستوى الاعتمادية ، لكنها قد تبـدو أكثر تكلفة من ناحية التشغيل ، وقد تتفوق عليها الوحدات الأكبر من حيث الكفاءة ومجابهة الأحمال الكبيرة بشكل أفضل .

٧,٤ تأثـــير تغـــير مستويات الاعتماديـــة

لقد جرى دراسة مدى تأثير التغير في مستويات الاعتمادية في تكاليف النظام الكلية وكذلك تكاليف الانقطاعات ، ونتائج هذه الدراسة التي يبرزها شكل (٦) قد تكون ذات أهمية خاصة بالنسبة للمخططين والمهنـدسـين لمعـرفـة المستـوى المـلائم للاعتـمادية ، وذلك بعد مقارنة تكاليف النظام SC مع تكاليف الاتقطاعات OC .



شكل (٦) تأثـــير تغـــير مستويات الاعتماديـــة على التكاليف .

من شكل (٦) نلاحظ أنه عند مستويات عالية من الاعتمادية تكون التكاليف الكلية SC عالية جدًا وتتدرج في الانحدار عندما تؤول الاعتمادية إلى مستويات متدنية ، أما بالنسبة لتكاليف الانقطاع OC فإنها تتضاءل عندما تتحسن الاعتمادية وتكبر عندما تسوء مستوياتها تبعًا للعجز في قدرة التوليد والانقطاعات المتوالية التي تحدث من جراء ذلك . ويمكن من الشكل اختيار الوضع الأمثل بالنسبة لمستوى الاعتمادية الذي يكون فيه مجموع التكاليف SC + OC يمثل الحد الأدنى .

٨ . الخاتمـــــــة

أوضحت هذه الدراسة كيف تتم عملية المواءمة بين عاملين مهمين مرتبطين بعملية التخطيط لأنظمة القوى الكهربائية ، وهما الاعتمادية والتكاليف . لقد تم تطبيق نماذج مطورة وأساليب حديثة لتخطيط أنظمة معينة . ولقد تم استعراض كافة المزايا الفنية والاقتصادية التي قد تنجم عن دمج الأنظمة الكهربائية وربطها بشبكة موحدة . كذلك تم إيضاح مدى تأثير المشكوكية والظواهر المتقلبة على خطط التوسع المستقبلية وضرورة أخذها في الاعتبار في عملية التخطيط ليتم اتخاذ القرار السليم حول إنشاء المحطات وإضافة الوحدات في الوقت المناسب ، بما يضمن تحسنًا في الاعتمادية من جهة ووفرًا في التكاليف من جهة أخرى .

تنويـــــــه

يود المؤلف أن ينوه بالشكر والتقدير لمركز البحوث بكلية الهندسة - جامعة الملك سعود على توفير الدعم لهذا البحث ضمن المشروع رقم ٣/ ٤١٠ .

المراجـــــــع

[١] **Billinton, R.,** and **Allan, R.,** *Reliability Evaluation of Power Systems,* Plenum Press, New York, pp. 83-104 (1984).

[٢] **Billinton, R.,** and **Allan, R.,** *Reliability Assessment of Large Electric Power Systems,* Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 112-132 (1988).

[٣] **Endrenyi, J.,** *Reliability Modeling in Electric Power Systems,* John Wiley & Sons, Toronto, pp. 162-183 (1978).

[٤] **Shaalan, A.M.,** and **Mohawes, N.A.,** *Reliability Concepts in Power System Planning,* Reliability Engineering, Hemisphere Publishing Corporation, New York, pp. 166-174 (1988).

[٥] **Sullivan, R.,** *Power System Planning,* Mc-Graw Hill Int. Company, New York, pp. 96-150 (1977).

[٦] **Shaalan, A.M.,** Cost of electrical interruptions in the residential area of Riyadh city, *Arab Gulf Journal of Scientific Research,* Riyadh, **7**(1): 79-91 (1989)

[٧] **Shaalan, A.M.,** Electric service interruptions: Impact and cost estimation, *The Electra Journal,* Cigré, Paris, **127:** 99-109 (1989).

[٨] **Wacker, G.,** and **Billinton, R.,** Customer cost of electric service interruptions, *Proc. IEEE* **72**(6): 919-930 (1989).

[٩] **Allan, R.,** and **Shaalan, A.M.,** Cost-benefit and reliability assessment of electrical generating systems, *The Reliability Engineering Intern'l Journal,* Elsevier Applied Science Publishers, **15**(1): 1-19 (1986).

[١٠] **Allan, R.,** and **Shaalan, A.M.,** Probabilistic production costing model, *The International Journal of Modeling and Simulation,* **8**(3): 88-93 (1989).

[١١] **Shaalan, A.M.,** and **Bahrani, A.,** Assessment of customers and utilities loss resulting from power service interruptions, *Project No. EE-3/1408, College of Engineering Research Center, King Saud University* (1988).

[١٢] **Shaalan, A.M.,** Reliability assessment of proposed SCECO in the northern province, *Project No. EE-2/1411, College of Engineering Research Center, King Saud University,* (1990).

ملحـــق
مواصفـــات النظم الكهربائيـــة المستخدمـــة في الدراســـة

(أ) التكلفـــــة

تكلفة الرأسمالية لإنتاج الطاقة (التكلفة / كيلو وات) = ٢٥٠٠ ريال / كيلو وات

تكلفة التشغيل الثابتة لإنتاج وحدة الطاقة (OMF) = ١٥٠ ريال / كيلو وات

تكلفة التشغيل والصيانة المتغيرة لإنتاج وحدة الطاقة (OMV) = ٣٠٠ ريال / ميجاوات ساعة

تكلفة الطاقة غير المتاحة (OCR) = ٣٠ ريال / كيلو وات = ٣٠ ريال / كيلو وات ساعة

معامل المرابحـــة السنوي = ١٠ ٪

(ب) منحـــنى أمـــد الحمـــل

الحمل ٪	١٠٠	٩٠	٨٦	٧٨	٦٨	٦٥	٦٣	٥٨	٥٤	٤٦	٤٠
الفـترة ٪	٠	١٠	٢٠	٣٠	٤٠	٥٠	٦٠	٧٠	٨٠	٩٠	١٠٠

(جـ) النظـــام (A)

المولدات : ٧ × ١٠٠ ميجاوات و ٦ × ٨٠ ميجاوات ، معدل الخروج القسري = ٠,٠٤

الحمل الابتدائي = ٤٥٠ ميجاوات

السنـــة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢	١٣	١٤	١٥	١٦	١٧	١٨	١٩	٢٠
معدل نمو الحمل ٪	٩,٤	٩,٣	٩,٢	٩,١	٨,٦	٧,٦	٦,٨	٦,٥	٦,٤	٦,١	٥,٩	٥,٨	٥,٦	٥,٤	٥,٣	٥,١	٤,٨	٤,٦	٤,٤	٤,٣

(د) النظـــام (B)

المولدات : ٨ × ٧٥ ميجاوات ، معدل الخروج القسري = ٠,٠٢

الحمل الابتدائي = ٢٣٤ ميجاوات

السنـــة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢	١٣	١٤	١٥	١٦	١٧	١٨	١٩	٢٠
معدل نمو الحمل ٪	٨,٦	٨,٥	٨,٤	٨,٣	٨,٢	٧,٨	٧,٦	٧,٥	٧,٣	٧,١	٦,٩	٦,٨	٦,٧	٦,٦	٦,٥	٦,٤	٦,٣	٥,٩	٥,٧	٥,٤

(هـ) النظـــام (C)

المولدات : ٥ × ٥٠ ميجاوات ، معدل الخروج القسري = ٠,٠٢

الحمل الابتدائي = ١٢٣ ميجاوات

السنـــــة	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢	١٣	١٤	١٥	١٦	١٧	١٨	١٩	٢٠
معدل نمو الحمل ٪	٩,٤	٩,٣	٩,٢	٨,٩	٨,٧	٨,٥	٨,٤	٨,٣	٨,٢	٨,١	٨,٠	٧,٨	٧,٦	٧,٤	٧,٣	٧,١	٦,٩	٦,٥	٦,٤	٦,٢

Reliability-Cost Assessment in Electrical Power System Planning

A. M. SHAALAN
Department of Electrical Engineering, College of Engineering
King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia

ABSTRACT. Power system planning is difficult, costly and involves many future uncertainties. This paper describes how these aspects are investigated and analyzed based on two major considerations: reliability and cost. This paper also exhibits the benefits that may accure from isolated systems interconnection as well as the importance of some electric system characteristics that should be taken into consideration in the planning process.