مجلة جامعة الملك عبد العزيز : العلوم الهندسية ، م ١ ص ص ١ : ٢٤ العربية (١٤٠٩ هـ / ١٩٨٩ م)

المؤشرات الاحتمالية لأداء نظم توليد ونقل القدرة

على محمد رشدى

قسم الهندسة الكهربائية والمِحْسابية ، كلية الهندسة ، جامعة الملك عبد العزيز
جدة ، المملكة العربية السعودية

مستخلص

تمت دراسة دالة السِّعة في شبكات التدفق العامة باعتبارها دالة شبه تبديلية في نجاحات فروع الشبكة ، كما جرى حساب هذه الدالة باستخدام خوارزمية الفروع المكافئة وخوارزمية المقاطع الأقل ، وهما طريقتان يدويتان حديثتان تصلحان للبرمجة المِحْسابية . ومن ثم ، استخدمت هاتان الطريقتان في التحليل الاحتمالى لشبكات توليد ونقل القدرة . ويتضمن هذا التحليل تقويم بعض المؤشرات العامة التي تُستخدم عادة في قياس أداء نظم القدرة . وقد شملت هذه المؤشرات كُلاًّ من التوقع والانحراف المعيارى للسعة وللطلب غير المجاب ، فضلا عن احتمال حدث فقد الحمل ، وكلها مؤشرات لحظية تفترض ثبات الحمل . كذلك تمت دراسة بعض المؤشرات المتوسطة مثل توقع الطاقة غير المجابة ، وتوقع فقد الحمل ، وهذه تعتمد على نموذج للحمل أكثر واقعية ، إذ يتضمن تغيرات خطوية للحمل خلال فترة زمنية محدودة . كما تم تعريف بعض المؤشرات الجديدة الخاصة بأهمية الفروع المختلفة في الشبكة ، وكذلك تم إيضاح طريقة حسابها . وفي معظم الأحوال ، استغلت الخاصة التصويرية لخريطة كارنوه في تمثيل العلاقات الجبرية المختلفة ، وفي تصنيف مُسببات فقد الحمل في حالات الشبكة المختلفة . وختاما ، تم توضيح أسلوب الاستفادة الكمية أو الكيفية من المؤشرات محل الدراسة ، كما جرى اقتراح عدد من موضوعات البحث الجديدة التي تشكل امتدادا للعمل المذكور هنا .

١ – المقدمة

لقد شهدت الأعوام الأخيرة تزايدا مستمرا في استخدام الطرائق التحليلية والعددية لهندسة (المعوّلية) فى تحليل وتصميم ووضع خطط التوسع لنظم توليد ونقل القدرة الكهربائية[١ – ٢٢] . وتُبنى هذه الطرائق عادة على نَمْذجة modelling نظام توليد القدرة ونقلها بشبكة تدفق flow network ذات فروع محدودة السعة ، ثم استخدام علاقات التوبولوجية الشبكية network topology لتحديد سعة الشبكة ، التى تُعد حدا أعلى upper bound لقيمة تدفق القدرة بين عقدتين مميزتين من عقد الشبكة ، هما عقدة المصدر source وعقدة المورد sink . وبمعرفة قيمة الحِمل عند المورد ، يمكن تحديد العديد من المؤشرات الاحتمالية probabilistic indices بعضها مؤشرات عامة لأداء شبكة القدرة ، والبعض الآخر هو المؤشرات الخاصة بأهمية العناصر أو فروع الشبكة . ويلاحظ أن التحديد الدقيق لهذه المؤشرات يقتضي افتراض نماذج models محددة تصف سلوك عناصر الشبكة وسلوك المؤثرات الخارجية عليها ، وتشمل هذه النماذج نماذج الحِمْل load والبيئة environment ومقننات وحدات التوليد generating unit ratings والانقطاع القسري forced outage للعناصر ، وسياسة التشغيل operating policy[١٢] . ويمكن تبسيط دراسة هذه المؤشرات بإدماج التأثيرات الخارجية مع مواصفات عناصر الشبكة في النموذجين الأساسيين التاليين [٤ ، ٥ ، ١٠ ، ١٣ ، ١٧] :

أولا : نموذج السعة capacity model

يصف هذا النموذج سلوك فروع الشبكة سواء كانت وحدات توليد أو خطوط نقل وهو يأخذ هنا أبسط أحواله ، إذ يُفتَرض أن الفرع الواحد له حالتان متميزتان ، إحداهما حالة فشل failure بحيث تكون دالة سعة الفرع صفرا ، والأخرى حالة نجاح success بحيث تكون دالة سعة الفرع مساوية للقيمة الرقمية لسعة الفرع[١٣] . ويعرف احتمال وجود الفرع في حالة الفشل باسم اللامتاحية unavailability لهذا الفرع . أما احتمال وجوده فى حالة النجاح فيعرف بالمتاحية availability .

ثانيا : نموذج الحِمْل load model

وأبسط حالات هذا النموذج هي أن يكون الحمل ثابتا ، وذلك باعتبار قيمته عند لحظة زمنية محددة ، أو باستخدام قيمته الذروية peak value خلال فترة زمنية محددة . إلا أن كثيرا من الحسابات الواقعية يقتضي وصف التغير الزمني لقيمة الحمل خلال فترة زمنية محدودة ، ويتم ذلك عادة بتقسيم الفترة الزمنية الكلية إلى فترات أساسية متساوية ، وإعطاء مستويات أو قيم الحمل الذروي لجميع الفترات الأساسية خلال الفترة الكلية ، فقد يعطى الحمل الذروي لكل ساعة من

ساعات اليوم (٢٤ قيمة) أو لكل يوم خلال سنة تعادل ٥٢ أسبوعا (٣٦٤ قيمة) أو لكل ساعة خلال السنة (٨٧٣٦ قيمة) . وفي كثير من الأحيان يتم الاستغناء عن تحديد هذه المستويات أو القيم الرقمية بإعطاء مُنْحَنًى مُنَعَّم smoothed curve للتغير الزمني للحمل الذروي[١٠ ، ١٣ ، ١٧] ، ويعرف هذا المنحنى باسم منحنى تغير الحمل الذروي اليومي (م ت ح ذ ي) daily peak load variation curve (DPLVC) عند استعمال الأحمال الذروية لكل يوم خلال السنة ، أو يعرف بمنحنى أمد الحمل (م أ ح) (load duration curve (LDC ، وذلك عند استعمال الأحمال الذروية لكل ساعة خلال السنة .

إن دراسة نظام القدرة عن طريق نمذجته على هيئة شبكة تدفق تجعل من الممكن الاستفادة من نتائج الدراسات السابقة لشبكات التدفق العامة[٢٣ - ٣٠]المستخدمة في نمذجة شبكات الاتصالات والمحساب والنقل وغيرها . وتشمل هذه الدراسات بصفة خاصة خوارزمية الفروع المكافئة[٢٧ - ٢٨] وخوارزمية المقاطع الأقل[٢٨] . إلا أنه يلاحظ أنه بينما تصح هذه الدراسات بصورة دقيقة لمعظم أنواع شبكات التدفق كشبكات الاتصالات ، فإنها تصح على وجه التقريب فقط في حالة شبكات القدرة ، وذلك لأن هذه الدراسات تؤدي إلى حسابات السعة بوصفها مقدار التدفق الأعظم الذي يتوافق وخصائص توبولوجية الشبكة ، ويفي بقانون بقاء السلعة المتدفقة عند عقد الشبكة باستثناء عقدتي المصدر والمورد . في حالة شبكات القدرة ، قد تكون السعة المحسوبة بهذه الطريقة أعلى من السعة الفعلية التي يلزم لحسابها ، على نحو دقيق ، استعمال معادلات التدفق flow equations التي تأخذ في الاعتبار المُعاوَقات الكهربائية electric impedances لعناصر الشبكة ، وتحقق قانون كيرشوف للجهد فيها . ويتضح من ذلك أن القيم التي يتم الحصول عليها هنا لمؤشرات أداء الشبكة تمثل حدودا عليا للقيم الفعلية في حالة مؤشرات الأداء الطردية direct ، وهي المؤشرات التي تعني زيادتها تحسنا في مستوى الأداء ، وتمثل حدودا دنيا للقيم الفعلية في حالة مؤشرات الأداء العكسية inverse ، وهي المؤشرات التي تتناقص بتحسن الأداء [٢٨] . إن ذلك لا يمثل عيبا في الطريقة المستخدمة هنا ، نظرا لأن الاستفادة من نتائجها تكون كيفية وليست كمية في أغلب الأحوال ، لذا فقد شاع استخدامها في أدبيات نظم القدرة الكهربائية [٣ ، ٨ ، ٩ ، ١٨ ، ٣٠ ، ٣١] .

إن الدراسة الواردة هنا تستهل بتعريف وحساب متغير دالة سعة شبكة القدرة . هذا المتغير هو متغير عشوائي متقطع discrete random variable ويتم وصفه عادة بوساطة جدول لقيم دالة الكتلة الاحتمالية probability mass function الخاصة به . وإحدى الإضافات الهامة للبحث الحالي هي وصف هذا المتغير كدالة شبه تبديلية pseudo-switching function في نجاحات عناصر الشبكة . ويؤدي هذا الوصف إلى تيسير واختصار المعالجة التحليلية الجبرية لهذا المتغير وللمتغيرات المرتبطة به . ومن ناحية أخرى ، يلاحظ أن الأبحاث السابقة ، التي تناولت الموضوع الحالي ، استخدمت رسم

فِن البياني Venn diagram لتمثيل ثلاثة متغيرات ، يمكن رفعها إلى أربعة أو خمسة بمشقة بالغة [٣٢ ، ٣٣] . يتجه البحث الحالي إلى الاستغناء عن رسم فِن البياني ، وإلى استخدام خريطة كارنوه Karnaugh map بدلا منه ، إذ يسمح ذلك بتمثيل ستة متغيرات في الصورة التقليدية للخريطة ، وبمضاعفة هذا العدد عند استخدام الخريطة ذات المدخلات المتغيرة variable-entered[٣٤ ، ٣٦] . ويلاحظ أن الخريطة ذات فائدة تصويرية pictorial لكل من الدوال التبديلية وشبه التبديلية ، ولم يؤد استخدامها إلى المزيد من الوضوح فحسب ، وإنما أدى أيضا إلى تصحيح بعض الأخطاء في المرجع[٣] وهو أحد المراجع الهامة في الموضوع .

ويترتب على دراسة دالة سعة شبكة القدرة إمكانية دراسة العديد من مؤشرات الأداء العامة الشائع استخدامها حاليا ، ويمكن تقسيم المؤشرات العامة المعتبرة هنا إلى مجموعتين :

١ ــ مؤشرات لحظية instantaneous

وهذه تحسب عند لحظة زمنية محددة وبعبارة أدق عند قيمة ثابتة للحمل ، وتشمل السعة المتوقعة expected capacity (توقع السعة) و الطلب غير المجاب المتوقع expected demand not served (EDNS) (توقع الطلب غير المجاب) واحتمال فقد الحمل loss of load probability (LOLP) .

٢ ــ مؤشرات متوسطة average أو شاملة global

وهذه تأخذ فى اعتبارها التغير الفعلي للحمل خلال الفترة الزمنية محل الدراسة ، وتشمل الطاقة غير المجابة المتوقعة expected energy not served (EENS) (توقع الطاقة غير المجابة) وتوقع فقد الحمل loss of load expectation (LOLE) ومؤشرات هذه المجموعة الأخيرة هي الأكثر شيوعا نظرا لأنها الأعلى دقة في محاكاة الواقع الفعلي .

وليست المؤشرات السالفة الذكر هي جميع المؤشرات المستخدمة حاليا ، فثمة مؤشرات أخرى شائعة لم يتم التعرض لها هنا ، من بينها مؤشر معولية الطاقة energy index of reliability (EIR) ومؤشرات متوسط تكرار أو أمد الانقطاعات average interruption frequency or duration سواء الخاصة بالشبكة أو المستهلك ، ومؤشرات بتر الحِمْل load curtailment أو المتاحية availability[١٩] .

لقد روعي في دراسة المؤشرات العامة المستعرضة هنا إعطاء التعريفات الرياضية الدقيقة لقيمتها المتوقعة ولمدى التشتت في هذه القيمة المتوقعة ، مع بيان العلاقات الهامة بين المؤشرات المختلفة ، وتلا ذلك تقويم هذه المؤشرات بطرائق يدوية مبسطة مع شرح كيفية تطوير هذه الطرائق إلى خوارزميات عالية الكفاية efficient يمكن برمجتها للمِحْساب (الحاسب الآلي) وتصلح لمعالجة النظم الكبيرة .

إن نظام القدرة محل الدراسة هنا يشمل كلاً من النقل والتوليد . يلاحظ أنه لايمكن دراسة نظام نقل القدرة بمفرده ، إذ يلزم إدراج وحدات التوليد في تحليل نظام النقل نظرا لأن خصائص انقطاع هذه الوحدات تؤثر على تحميل هذا النظام ، ومن ثم على أدائه[٣] . وعلى النقيض من ذلك ، فإنه يمكن دراسة نظام توليد القدرة منفردا ، إذ إنه يمثل حالة خاصة سهلة من النظام المركب المعتبر هنا .

٢ ــ الافتراضات والرموز والاصطلاحات المستخدمة

٢,١ الافتراضات المستخدمة

٢,١١ ــ أن يأخذ النظام محل الدراسة شكل شبكة يمكن نمذجتها برسم خطي linear graph ذي عُقَدٍ (رؤوس) كاملة المتاحية وغير محدودة السِّعة ، ومن ثم يُعد هذا النظام متسقا coherent[٣٥] .

٢,١٢ ــ أن فروع النظام ثنائية الحالة ، إذ تكون دائما في واحدة من حالتي النجاح أو الفشل ، ويشترط كونها في حالة النجاح لحظة بداية الزمن ، وأحداث الفشل لهذه الفروع مستقلة إحصائيا عن بعضها البعض .

٢,١٣ ــ أن يكون لكل فرع من فروع النظام قيمة محددة للمتاحية وأخرى للسِّعة ، وقيم المتاحية للفروع بوجه عام غير متساوية ، كما أن قيم سِعاتها ، بوجه عام ، غير متساوية أيضا .

٢,١٤ ــ أن تمثل سعة الفروع القيد الوحيد على تدفق القدرة فيها ، إذ لا تُؤخَذ الخصائص الكهربائية (مثل قيم المُعاوِقات) ، ولا القوانين الكهربائية (مثل قانون كيرشوف للجهد) في الاعتبار ، وذلك باستثناء قانون بقاء السلعة المتدفقة عند العُقد [٣ ، ٨] ، وهذا القانون يصح عند جميع العُقد باستثناء عقدتي المصدر والمورد ، إذ يكون تدفق القدرة الخارجة موجبا عند المصدر وسالبا عند المورد .

٢,٢ أهم الرموز المستخدمة

n عدد فروع الرسم الخطي الممثل للنظام .

$I\{\ .\ \}$ متغير التبيين للحدث $\{\ .\ \}$ وهو متغير ثنائي عشوائي يأخذ إحدى القيمتين المنفصلتين 0 , 1 فقط بحيث تدل القيمة 0 على عدم وقوع الحدث وتدل القيمة 1 على وقوعه .

X_i , $\overline{X}_i$ متغيرا التبيين لحدثي النجاح والفشل للفرع رقم i .

p_i , q_i المتاحية واللامتاحية للفرع i (احتمالا النجاح والفشل لهذا الفرع) .

$$p_i = Pr\{X_i = 1\} = E\{X_i\} . \qquad (1a)$$

$$q_i = Pr\{\overline{X}_i = 1\} = E\{\overline{X}_i\} = 1 - p_i . \qquad (1b)$$

كلٌّ من p_i , q_i يأخذ إحدى القيم المتصلة المحصورة بالفترة المغلقة [0 , 1] .

$Pr\{\ .\ \}$ احتمال الحدث $\{\ .\ \}$ ـــ كمية لا أبعاد لها .

$E\{\ .\ \}$ التوقع (القيمة المتوقعة) للمتغير العشوائي $\{\ .\ \}$ ـــ له أبعاد هذا المتغير .

$VAR\{\ .\ \}$ التباين (مربع الانحراف المعياري) للمتغير العشوائي $\{\ .\ \}$ ـــ أبعاده مربع أبعاد هذا المتغير .

c_i سعة الفرع i حيث $c_i \geq 0$ ـــ كمية لها أبعاد القدرة وتعطى هنا بأرقام لا أبعاد لها تمثل مضاعفات وحدة أساسية للقدرة .

C_i الدالة السِّعوية (العشوائية) للفرع i

$$C_i = c_i X_i . \qquad (2)$$

$\underline{X}$, $\underline{p}$, $\underline{c}$ متجهات تمثل نجاحات ومتاحيات وسعات فروع النظام .

$C_{st}(\underline{X})$ دالة السعة للنظام ، $C_{st}(\underline{X}) \geq 0$.

s رمز عقدة المصدر .

t رمز عقدة المورد .

$C_{st_{max}}$ القيمة العظمى لدالة السعة للنظام . تتحقق هذه السعة فى حالة نجاح جميع فروع النظام (الحالة $\underline{X} = \underline{1}$) وربما فى بعض الحالات الأخرى .

$C_{st}(\underline{X} \mid k_\ell)$ الدالة الفرعية المستنبطة من $C_{st}(\underline{X})$ بإعطاء المتغير X_ℓ القيمة k حيث k هي 0 أو 1 .

$min(a, b, c)$ القيمة الأصغر بين القيم a, b, c .

$L(D)$ الحمل أو الطلب ــ كمية لها أبعاد القدرة وتعطى هنا بأرقام لابعدية تمثل مضاعفات الوحدة الأساسية للقدرة المستخدمة فى وصف السِّعات .

DNS الطلب غير المجاب (غير المخدوم) .

$LOL(\underline{X})$ متغير التبيين لحدث فقد الحمل .

$LOLP$ احتمال (حدث) فقد الحمل .

$\overline{S}$ متغير التبيين لحدث انعدام الاتصال بين المصدر والمورد .

ENS الطاقة غير المجابة .

$LOLE$ توقع فقد الحمل ــ كمية لا أبعاد لها ، وحدتها خارج قسمة زمن الفترة الأساسية على زمن الفترة الكلية في نموذج الحمل .

T_i زمن الفترة الأساسية رقم i في نموذج الحمل ــ تسمى T عند تساوي أزمنة الفترات الأساسية ، وتعد وحدة قياس الزمن .

m عدد الفترات الأساسية خلال الفترة الكلية لنموذج الحمل .

٢,٣ أهم الاصطلاحات المستخدمة

٣١ , ٢ الدالة التبديلية (البولانية)[٣٧]

راسم $B_2^n \rightarrow B_2$ حيث $B_2 = \{0, 1\}$.

٢,٣٢ الدالة شبه التبديلية (شبه البولانية)[٣٨]

راسم $B_2^n \rightarrow R$ حيث R هي مجال الأعداد الحقيقية .

٢,٣٣ الدالة المتعددة الصلة المستقيمة[٣٧]

دالة في n من المتغيرات تشكل علاقة خط مستقيم بالنسبة لأى من هذه المتغيرات على حدة ، ولذلك يمكن تحديدها تماما بوساطة 2^n من المعاملات . من أنواعها :

أ ــ بعض الدوال الجبرية العادية ($R^n \rightarrow R$) مثل معولية / لامعولية نظام كتابع لمعولية / لامعولية عناصره[٣٧ ، ٣٩] ، ومثل متاحية / لامتاحية نظام كتابع لمتاحية / لامتاحية عناصره [٣٩ ، ٤٠] ، ومثل توقع السعة أو توقع الطلب غير المجاب كتابع لمتاحية / لامتاحية العناصر .

ب ــ جميع الدوال شبه التبديلية[٣٨] ، مثل السعة أو الطلب غير المجاب كتابع لنجاحات العناصر .

٢,٣٤ المؤشرات المباشرة (مثل المتاحية)

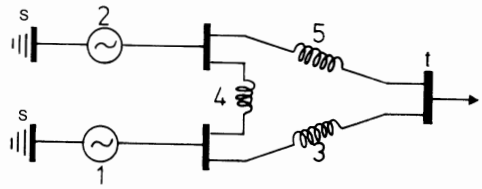
دوال غير تناقصية في متجه نجاحات أو متاحيات النظام المتسق محل الاعتبار[٣٥ ، ٣٧] . بخلافها توجد مؤشرات عكسية (تسمى أيضا سلبية أو مكملة ، مثالها اللامتاحية) وهي دوال غير تزايدية في المتجه المذكور .

٣ ــ المثال المستخدم

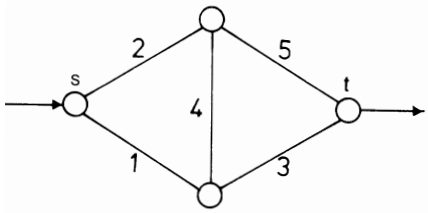
لإيضاح كافة المفاهيم الواردة في هذا البحث ، يُستخدَم النظام الموضح بشكل ١ كمثال دائم . هذا المثال مأخوذ عن سوليفان[٣] وهو يوضح نظاما للقدرة مكونا من ثلاثة قضبان عمومية ووحدتي توليد وثلاثة خطوط نقل . وقد تم تجريد هذا النظام في شكل ٢ على هيئة رسم خطي يضم خمسة فروع (تمثل وحدات التوليد والنقل) وأربع عقد (تمثل القضبان العمومية والأرض) ، وتعطى الخصائص العددية لفروع النظام بالمتجهين[٣]

$$\underline{c} = [\ 2 \quad 2 \quad 2 \quad 3 \quad 4\ ]^T$$

$$\underline{q} = [\ 0.02 \quad 0.03 \quad 0.2 \quad 0.1 \quad 0.3\ ]^T$$



شكل ١ . نظام صغير لتوليد القدرة الكهربائية .



شكل ٢ . تجريد النظام الموضح في شكل ١ على هيئة رسم خطي .

ولما كان النظام السالف الذكر يضم خمسة فروع فقط ، فإنه يُعد نظاما صغيرا[٣٥] ، ومن ثَمَّ قابلا للتحليل اليدوي ، وقد تم عن طريقه التحقق من صحة الحسابات وفقا للطرائق المبسطة المعطاة هنا ، وكذلك تم نقد بعض مؤشرات الأهمية المعطاة في المرجع[٣] .

وبالاضافة إلى المعلومات السابقة ، نحتاج إلى تحديد قيمة الحمل ، وسوف نعتبر هذه القيمة ثابتة عند $D=4$ ، ثم نسمح بوجود تغير فيها وفق الجدول ١ المأخوذ من المرجع[٥] والذي يصف تغير الحمل الذروي اليومي خلال أسبوع كامل . ويلاحظ أن الأرقام المعطاة للأيام تمثل تعاقبا لها خلال الأسبوع حيث اليوم 1 هو يوم بداية العمل الأسبوعي (السبت في البلدان الإسلامية والاثنين في البلدان الغربية) ، أما اليومان 6 و 7 فيمثلان عطلة نهاية الأسبوع .

جدول ١ : الحمل الذروي اليومي خلال أسبوع

اليوم	7	6	5	4	3	2	1
الحمل الذروي اليومي كنسبة مئوية من الذروة الأسبوعية	75	77	94	96	98	100	93
الحمل الذروي اليومي بوحدات القدرة	3.0	3.08	3.76	3.84	3.92	4.0	3.72

وغنى عن الذكر أن المثال المذكور هنا لا يتضمن جميع التفصيلات التي يمكن أن ترد في نظم القدرة العملية الكبيرة . وقد قامت لجنة منبثقة عن جمعية القدرة الكهربائية التابعة لمعهد مهندسي الكهرباء

والالكترونيات بتصميم مثال مُفَصَّل يمكن استخدامه لاختبار طرائق التحليل المختلفة ، ويعرف هذا النظام باسم نظام اختبار المعولية Reliability Test System (RTS) . ويمكن للقارىء الرجوع إلى المرجعين [٥ ، ١٧] للتعرف على هذا النظام ، والتعرف من خلاله على الخصائص التفصيلية لنظم القدرة الكبيرة .

٤ ــ دالة سعة النظام

تُعبِّر هذه الدالة عن سعة نقل القدرة أى القيمة القصوى لتدفق القدرة من عقدة المصدر إلى عقدة المورد فى النظام في حالته $\underline{X}$[٢٨] . ولما كانت هذه الدالة حقيقية القيمة وتعتمد على متغيرات ثنائية ، فإنها في الواقع دالة شبه تبديلية (ومن ثم فإنها دالة متعددة الصلة المستقيمة) في متغيرات التبيين لأحداث نجاح فروع النظام . ويمكن حساب هذه الدالة بإحدى الطرائق / الخوارزميات التالية :

٤,١ التعداد المستنفد للتدفق الأعظم في جميع حالات النظام

يمكن حساب التدفق الأعظم في كل حالة من حالات النظام على حدة بإحدى طرائق البرمجة الخطية ، مثل خوارزمية الإفراد simplex algorithm[٢٥] ، أو ــ وهذا هو الأفضل ــ استخدام خوارزمية فورد ــ فلكرسون للتدفق الأعظم[٢٣ ، ٢٥] ، ولا يصلح هذا الأسلوب للنظم الكبيرة نظرا لأن عدد حالات النظام وهو 2^n يتزايد أُسِّيًّا مع عدد الفروع .

٤,٢ خوارزمية الفروع المكافئة

لايحدث إخلال بدالة سعة النظام إذا أُزيلت مجموعة من الفروع الواصلة بين عقدتين i , j في النظام وَوُضع محلها فرع مكافىء واحد بين العقدتين المذكورتين ، تكون دالته السِّعوية مساوية للدالة السَّعوية للمجموعة المُزالة . من ثم ، يمكن اختزال الفروع الموضوعة على التوالي باستخدام فرع مكافيء دالته السِّعوية هي **الدالة الأصغر** بين الدوال السِّعوية للفروع ، كما يمكن اختزال الفروع الموضوعة على التوازي باستخدام فرع مكافىء دالتهُ السِّعوية هي مجموع الدوال السِّعوية للفروع[٢٨] .

ولا تكفي قاعدتا الاختزال على التوالي / التوازي لاختزال مجموعات الفروع المحتوية على فروع قنطرية ، إلا أن التطبيق المتتالي للقاعدة التالية[٢٧ ، ٢٨] يُعِينُ جزئيا على التخلص من الفروع القنطرية ، ومن ثم تطبيق قاعدتي الاختزال على التوالي أو التوازي عندما يتيسر ذلك بقطع عدد كاف من الفروع

$$C_{ij}(\underline{X}) = C_{ij}(\underline{X}|0_\ell)\,\overline{X}_\ell + C_{ij}(\underline{X}|1_\ell)\,X_\ell \qquad (3)$$

وكمثال لذلك ، يمكن حساب دالة سعة النظام الموضح بشكل ٢ بفك هذه الدالة بالنسبة لمتغير التبيين X_4 طبقا للمعادلة (3) . يقتضي ذلك حساب الدالة $C_{st}(\underline{X}|0_4)$ وهي الدالة السِّعوية لنظام فرعي مقتبس من

النظام الأصلي بقطع الفرع 4 ، وهو نظام توازٍ / توالٍ ، ولذلك ينتج أن :

$$C_{st}(\underline{X}|0_4) = \min(c_1, c_3) X_1 X_3 + \min(c_2, c_5) X_2 X_5 = 2X_1X_3 + 2X_2X_5 \quad (4)$$

كما يلزم حساب $C_{st}(\underline{X}|1_4)$ التي تُمثل نظاما فرعيا مقتبسا من النظام الأصلي بقصر الفرع 4 ، وهذا النظام ليس نظام توالٍ / توازٍ كما قد يبدو لأول وهلة ، وذلك نتيجة لكون سعة الفرع 4 محدودة ، ولذا يتم فك الدالة المذكورة بالنسبة لأحد متغيرات التبيين الأخرى وليكن X_1 ، وتنشأ عن ذلك دالتان إحداهما هي :

$$C_{st}(\underline{X}|1_4, 0_1) = [\min(c_2X_2, c_5X_5 + \min(c_4, c_3) X_4X_3]_{X_4=1} = \min(2X_2, 4X_5 + 2X_3) = 2X_2(X_5 + X_3\overline{X_5}) \quad (5)$$

أما الأخرى وهي $C_{st}(\underline{X}|\tilde{1}_1, 1_4)$ فيقتضي حسابُها تكرارَ الفك بالنسبة لبقية متغيرات التبيين .

ومن الممكن التخلص من الفروع القنطرية أيضا باستخدام التحويل المثلثي ــ النجمي delta-star transformation و/أو التحويل النجمي ــ المثلثي star-delta transformation شريطة أن يكون التحويل حافظا لدالة سعة الشبكة . يلاحظ أنه بينما تتوافر علاقات عامة للتحويل المثلثي ــ النجمي[٢٧، ٣١] ، فإن التحويل النجمي ــ المثلثي قد لا يصح لجميع شبكات التدفق[٢٧] . إلا أنه في حالة شبكات القدرة تكون فروع الشبكة ثنائية الاتجاه bidirectional وتكون لها نفس السِّعة في كلا الاتجاهين ، ومن ثم ، أمكن صياغة التحويل النجمي ــ المثلثي لها بصفة خاصة[٣٠] ، وهذا التحويل يَؤُولُ ، في حالة المتاحية التامة للفروع ، إلى التحويل المعطى في المرجع[٤١] ، ويتميز بأنه يعطى دوماً قيما غير سالبة للسعة ، وذلك على النقيض من التحويل المقترح في المرجع[٣١] .

٤,٣ تعميم خوارزمية المقاطع الأقل

إحدى النتائج الهامة لخوارزمية فورد ــ فلكرسون هي النظرية المعروفة باسم « نظرية التدفق الأعظم عند أصغر المقاطع الأقل سعة » . يمكن استحداث الصيغة العامة التالية لهذه النظرية بدلالة الدوال السِّعوية[٢٧، ٢٨]

$$C_{st}(\underline{X}) = \min_i \sum_{\ell \in M_i} C_\ell X_\ell \quad (6)$$

حيث M_i هى مجموعة الفروع التي تشكل المقطع الأقل رقم i . يلاحظ أن العلاقة (6) تشمل قاعدتي الاختزال على التوالي وعلى التوازي كحالتين خاصتين . بتطبيق العلاقة (6) على النظام المعتبر وملاحظة أن مقاطعه الأقل هي :

$$M_1 = \{ 1, 2 \}, M_2 = \{ 3, 5 \}, M_3 = \{ 1, 4, 5 \}, M_4 = \{ 2, 4, 3 \}$$

ينتج أن :

$$C_{st}(\underline{X}) = \min (c_1X_1 + c_2X_2, c_3X_3 + c_5X_5, c_1X_1 + c_4X_4 + c_5X_5 \quad c_2X_2 + c_4X_4 + c_3X_3) \tag{7}$$

ولنفادي الإحصاء المستنفد للحالات ، نلاحظ أن $C_{st}(\underline{X})$ تساوي الصفر إذا كانت الحالة $\underline{X}$ تمثل مقطعا للنظام ، وتختلف عن الصفر إذا كانت $\underline{X}$ تُمثل مساراً له ، ولذلك يكفي حساب (7) لعدد من المسارات المستنفدة لحالات نجاح النظام ، ويحسن أن تكون هذه المسارات متنافية منعاً لتكرار العمل . وبذلك تكون قيم $C_{st}(\underline{X})$ المخالفة للصفر هي :

$$C_{st}(\underline{X} | 1_1, 1_3) = 2 + 2X_2X_5,$$

$$C_{st}(\underline{X} | 0_1, 1_2, 1_5) = 2,$$

$$C_{st}(\underline{X} | 1_1, 1_2, 1_5, 0_3) = 2 + 2X_4,$$

$$C_{st}(\underline{X} | 0_1, 1_2, 1_3, 1_4, 0_5) = 2,$$

$$C_{st}(\underline{X} | 1_1, 0_2, 0_3, 1_4, 1_5) = 2. \tag{8}$$

ومتى تم إيجاد دالة السِّعة ، فإنه يمكن التعبير عنها بخريطة كارنوه مُعدَّلة ذات محتويات حقيقية كتلك المبينة بشكل ٣ ، ومن ثم يمكن استخدام أسلوب الخريطة[٢٨] لصياغة هذه الدالة في صورة مجموع جبري للمضروبات كما يلي :

$$C_{st}(\underline{X}) = 2X_1X_3 + 2X_2X_5 + 2\overline{X}_1X_2X_3X_4\overline{X}_5 + 2X_1\overline{X}_3X_4X_5 . \tag{9}$$

٥ ــ المؤشرات العامة اللحظية

٥,١ توقع السِّعة

يمكن إيجاد توقع دالة السعة عن طريق استبدال توقعات المتغيرات X_i بها لينتج أن :

$$E\{ C_{st}(\underline{X}) \} = 2p_1p_3 + 2p_2p_5 + 2q_1p_2p_3p_4q_5 + 2p_1q_3p_4p_5 \tag{10}$$

ويلاحظ أن مربع دالة السِّعة هو بدوره دالة شبه تبديلية مما ييسر حساب تباين دالة السِّعة طبقا للعلاقة :

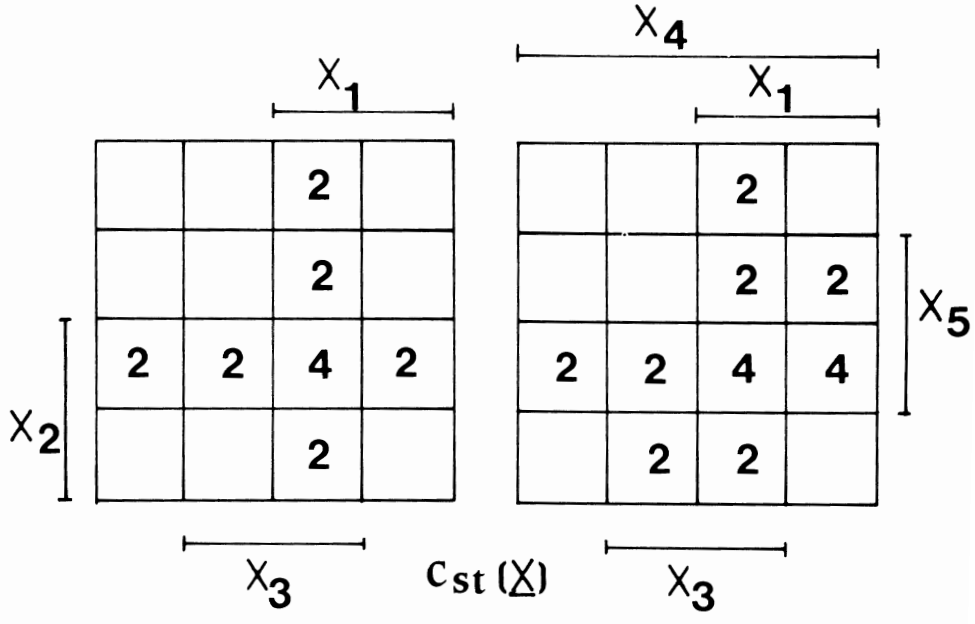
$$VAR\{C_{st}(\underline{X})\} = 4p_1p_3(1 + 2p_2p_5) + 4p_2p_5 + 4q_1p_2p_3p_4q_5 + 4p_1q_3p_4p_5(1 + 2p_2) - (E\{C_{st}(\underline{X})\})^2 \quad (11)$$

وبالتعويض العددي في العلاقتين (10) و (11) ينتج أن توقع دالة السِّعة هو ٣,١٨١٣ ، وأن الانحراف المعياري في هذه القيمة هو ١,٢٠٨ أي يبلغ نسبة ٣٨٪ من التوقع ، وهذه النسبة العالية تدل على أنه لا يجوز التعويل على قيمة التوقع منفردة ، بل يجب إعطاء الانحراف المعياري معها ، كما تدل على أن فائدة هذا المؤشر هي فائدة وصفية أكثر منها كمية .

٢,٥ توقع الطلب غير المُجاب

تُعرَّف دالة الطلب غير المُجاب بأنها الفرق بين الطلب والسِّعة في حالة كون هذا الفرق غير سالب ، وبأنها تساوي صفرا بخلاف ذلك ، أي إن :

$$DNS(\underline{X}) = (D - C_{st}(\underline{X}))\, I\{(D - C_{st}(\underline{X})) \geq 0\} \quad (12)$$
$$= (D - C_{st}(\underline{X})) + (C_{st}(\underline{X}) - D)\, I\{C_{st}(\underline{X}) \geq D\}$$



شكل ٣ . خريطة كارنوه المعدلة الممثلة لدالة السعة للنظام المعطى بشكل ١ (الخلايا الفارغة تحوي أصفارا)

وواضح من التعريف أن دالة الطلب غير المجاب تماثل دالة السِّعة في كونها دالة شبه تبديلية في متغيرات التبيين لأحداث نجاح فروع النظام . وبوجه عام ، يمكن استخدام خريطة كارنوه المُعدَّلة للتعبير عن هذه الدالة ، ثم حساب قيمة التوقع والانحراف المعياري لها بنفس الطريقة المتبعة في القسم ٥,١ . أما في الحالة الخاصة

$$(D - C_{st}(\underline{X})) \geq 0 \qquad \underline{X} \qquad (13a)$$

$$I\{(D - C_{st}(\underline{X}) \geq 0\} = 1 \qquad \underline{X} \qquad (13b)$$

فإنه يمكن تفادي هذه الحسابات إذ ينتج أن :

$$DNS(\underline{X}) = D - C_{st}(\underline{X}) \qquad (14)$$

$$D\{DNS(\underline{X})\} = D - E\{C_{st}(\underline{X})\} \qquad (15)$$

$$VAR\{DNS(\underline{X})\} = VAR\{C_{st}(\underline{X})\} \qquad (16)$$

عند طلب قيمته $D = 4$ يتحقق الشرط (13) ، وينتج أن توقُّع الطلب غير المجاب هو ٠,٨١٨٧ وأن الانحراف المعياري في هذا التوقع يساوي ١٤٨٪ من قيمة التوقع !

٥,٣ احتمال فقد الحمل

يُعرَّف فقد الحمل بأنه الحدث الذي يقع إذا ، وفقط إذا ، كان الحِمْل (الطلب) أكبر من سعة النظام ، ومن ثم يُعطَى متغير تبيينه واحتماله (توقع متغير تبيينه) بالمعادلتين :

$$LOL(\underline{X}) = I\{(D - C_{st}(\underline{X})) > 0\} = I\{D > C_{st}(\underline{X})\} \qquad (17)$$

$$LOLP = P_r\{LOL(\underline{X}) = 1\} = E\{LOL(\underline{X})\} \qquad (18)$$

ويمكن دراسة احتمال فقد الحمل باستعمال خريطة كارنوه عادية لتمثيل متغير تبيينه ، وهذه الخريطة يمكن استنتاجها من خريطة دالة السِّعة ، أو خريطة دالة الطلب غير المجاب ، وبتغطية آحاد هذه الخريطة بحلقات غير متشابكة يتم التعبير عن متغير التبيين بمجموع مضروبات متنافية ومن ثم تحويله فورا إلى تعبير للاحتمال باستبدال توقعات المتغيرات $\underline{X}$ بها ، واستبدال مُشغلي الضرب والجمع

بنظيريهما المنطقيين[٣٤ - ٣٦] . ويوضح الشكل ٤ خريطة معكوس متغير التبيين لحدث فقد الحِمْل ، ومنها ينتج أن :

$$LOLP = 1 - p_1 p_2 p_5 (p_4 + p_3 q_4) = 0.3479 \qquad (19)$$

وجدير بالذكر أن احتمال فقد الحِمْل يُمكن حسابه بصورة مستقلة عن المؤشرين السابقين باستعمال إحدى خوارزميات شبكات التدفق المشار إليها في قائمة المراجع [٣٧ ، ٤٢ ، ٤٣] .

٦ ــ المؤشرات العامة المتوسطة

٦,١ توقع الطاقة غير المجابة

تُعرف دالة الطاقة غير المجابة بأنها التكامل الزمني لدالة الطلب غير المجاب عبر فترة الزمن الكلية المعتبرة ، وباعتبار نموذج التغير الخطوي للحِمْل فإنها تأخذ الصورة

$$ENS(\underline{X}_1, \underline{X}_2, \ldots, \underline{X}_m) = \sum_{i=1}^{m} T_i \quad DNS(\underline{X}_i D_i) \qquad (20)$$

حيث T_i هو أمد الفترة الأساسية رقم i في نموذج الحمل ، بينما D_i و $\underline{X}_i$ هما الطلب ومتجه نجاحات العناصر خلال هذه الفترة الأساسية . في المثال الحالي تكون $T_i = T$ ، كما أن متجهات نجاح الفروع تأخذ القيمة الثابتة $\underline{X}$ ، وبذلك يكون

$$ENS(\underline{X}) = T \sum_{i=1}^{m} DNS(\underline{X}, D_i) \qquad (21)$$

وبالتعويض من العلاقتين (12) و (17) في العلاقة (21) ينتج أن :

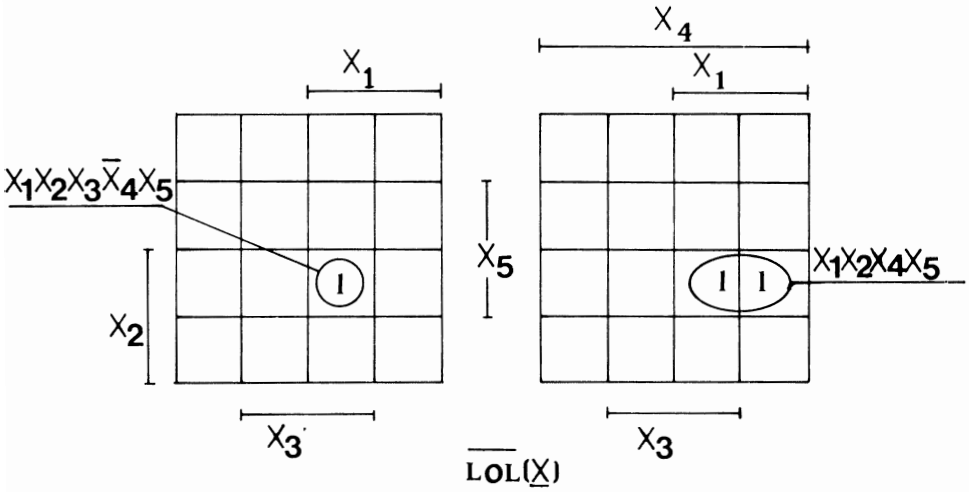
$$ENS(\underline{X}) = T \sum_{i=1}^{m} [(D_i - C_{st}(\underline{X})) + (C_{st}(\underline{X}) - D_i)\, \overline{LOL}^{i}(\underline{X})] \qquad (22)$$

حيث $\overline{LOL}^{i}(\underline{X})$ هو معكوس متغير التبيين لحدث فقد الحمل خلال الفترة الأساسية رقم i ، وبمراجعة قيم D_i المعطاة في جدول ١ مع شكل ٣ ، نلاحظ أن قيم : $\overline{LOL}^{i}(\underline{X})$ جميعها تساوي $\overline{LOL}(\underline{X})$ المعطى بشكل ٤ ، إذ إنها جميعها تساوي الواحد في ثلاث خلايا معينة من الخريطة

المعطاة بشكل ٤ . كما نلاحظ أن $C_{st}(\underline{X}) = C_{st_{max}}$ في هذه الخلايا الثلاث ، ومن ثم ، فإن قيمة التوقع للتعبير (22) تصبح مع اعتبار T مساوية للوحدة هي

$$E\{ENS\} = \sum_{i=1}^{m} D_i - m\,E\{C_{st}(\underline{X})\} + \sum_{i=1}^{m} (C_{st_{max}} - D_i)\,E\{\overline{LOL}(\underline{X})\}$$
$$= \sum_{i=1}^{m} D_i - m\,E\{C_{st}(\underline{X})\} + (1 - LOLP) \sum_{i=1}^{m} (C_{st_{\max}} - D_i) \quad (23)$$

وبالتعويض عن القيم المختلفة في المعادلة (23) ، ينتج أن قيمة توقع الطاقة غير المجابة هي ٤,٧٩٨٥ وحدة طاقة . ونلاحظ أنه إذا تجاهلنا نموذج التغير الخطوي للحمل ، وافترضنا ثبات قيمة الحمل عند $D=4$ ، فإن توقع الطاقة غير المجابة يكون أعلى نسبيا ، إذ يصبح ٥,٧٣٠٩ وحدة طاقة .



شكل ٤ . خريطة كارنوه العادية الممثلة لمعكوس متغير التبيين لحدث فقد الحمل.

٦,٢ توقع فقد الحمل

يُعرَّف توقع فقد الحمل LOLE بالعلاقة[١٠ ، ١٧]

$$LOLE = \sum_{i=1}^{m} LOLP^i \quad (24)$$

حيث $LOLP^i$ هو احتمال فقد الحمل خلال الفترة الأساسية رقم i . يلاحظ في المثال الحالي أن قيم $LOLP^i$ متساوية جميعها ، ومن ثم ينتج أن :

$$LOLE = 7\,(0.3479) = 2.4352 \text{ day}^3\text{week}$$

٧ ــ مؤشرات أهمية فروع النظام

تم في المرجع [٣] تعريف مؤشرات الأهمية $E_j\,(DNS)$, $LOLP_j$ بحيث تعبّر عن المسؤولية الفردية لسعة الفرع j عن فقد الحمل (عدم إجابة الطلب) ، غير أن حسابات هذه المؤشرات غير مرضية ، خاصة وأنها تؤدي إلى اعتبار سعات بعض الفروع مسؤولة عن فقد الحمل في حالات انعدام التدفق تماما ، والصحيح في هذه الحالات أن انعدام التدفق إنما يرجع إلى حدث انعدام الاتصال بين عقدتي المصدر والمورد ، ولا يمكن لذلك زيادة قيمة التدفق عن الصفر حتى لو زيدت سعات جميع العناصر إلى مالانهاية .

كبديل للتعريفات الواردة في المرجع[٣] ، نلاحظ أن مؤشرات الأهمية للعناصر يمكن تعريفها كزيادة أو نقص قيمة أي من التوقعات الثلاثة الواردة في الفصل الخامس نتيجة للتحسين المثالي لسعات العناصر (بجعل $c_j \to \infty$) و/أو متاحياتها (بجعل $p_j = 1$) . من ذلك نحصل على المؤشرات الستة التالية لأهمية العنصر j منفردا :

$$Y_{a_j} = Y\,(\underline{p}\,,\,\underline{c}\,|\,a_j \text{ perfect}) - Y\,(\underline{p}\,,\,\underline{c}),$$
$$Y = E\{C_{st}\}\,,\,E\{DNS\} \text{ or } LOLP,\; a_j = c_j \text{ or } p_j\,. \qquad (25)$$

وهذه المؤشرات كلها جديدة باستثناء أولها المعطي في المرجع[٤٤]. ويمكن على غرارها تعريف مؤشرات مُخَلَّطة تأخذ في الاعتبار تحسين السعّة والمتاحية آنيا، وكذلك تعريف مؤشرات جماعية تقيس التحسينات في عدد من العناصر معا ، ويوضح جدول ٢ قيم المؤشرات الستة المعطاة بالمعادلة (25) مقارنة مع مؤشرين آخرين هما معكوس معدل تغير توقع الطلب غير المجاب بالنسبة إلى السعة $-\partial E(DNS)/\partial c_j$ ومعكوس معدل تغير توقع الطلب غير المجاب بالنسبة إلى المتاحية $-\partial E(DNS)/\partial p_j$ ومن المفيد هنا ملاحظة شكل ٥ الذي يوضح مسببات فقد الحمل $LOL\,(\underline{X})$ في حالات النظام المختلفة ، ويترتب على هذا الشكل إمكانية تفكيك المؤشر $Y = LOLP$ على النحو التالي الذي يمكن أن يعد بمثابة تصحيح لما هو وارد في المرجع [٣] .

$$Y = Y_{c_1} + Y_{c_2} + Y_{c_3} + Y_{c_1,c_3} + Y_{c_2,c_3} + Y_{c_1,c_4} + Y_{c_2,c_3,c_4} + Y_{\bar{S}} \qquad (26)$$

حيث $Y_{\bar{S}}$ تمثل قيمة Y الناتجة عن انعدام الاتصال بين المصدر والمورد .

٨ ــ نظام توليد القدرة كحالة خاصة

إن نظام توليد القدرة هو نظام تواز ، أي إن له مقطعاً واحداً يشتمل على جميع فروعه ، وتعطى دالة سعته بالعلاقة البسيطة .

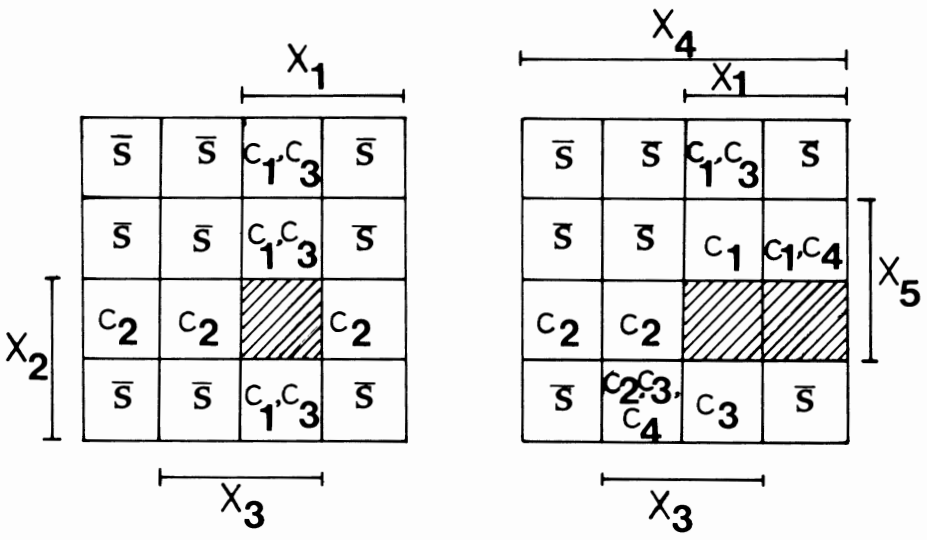
$$C_{st}(\underline{X}) = \sum_{j=1}^{n} c_j X_j \qquad (27)$$

جدول ٢ : بعض مؤشرات الأهمية لفروع النظام محل الدراسة

i	$LOLP_{p_i}$	$-\frac{\partial E\{DNS\}}{\partial p_i}$	$-E\{DNS\}_{p_i}$	$E\{C_{st}\}_{p_i}$
1	0.1331	1.433	0.02866	0.02866
2	0.02017	1.409	0.04226	0.04226
3	0.01331	0.7357	0.1471	0.1471
4	0.01331	0.2837	0.02837	0.02837
5	0.2795	2.265	0.6795	0.6795

i	$E\{C_{st}\}_{c_i}$	$-E\{DNS\}_{c_i}$	$-\frac{\partial E\{DNS\}}{\partial c_i}$	$-LOLP_{c_i}$
1	1.006	1.006	0.02722	0.01482
2	1.118	1.118	0.03108	0.02689
3	0.4107	0.4107	0.2281	0.2053
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0

وفي حالة تساوي سعات فروع هذا النظام يمكن اعتباره نظام النجاح بنجاح ك من بين ن عنصرا ، ولذلك يمكن حساب احتمال فقد الحمل له بالخوارزمية التربيعية المعطاة في [٤٥] ، وفي حالة تساوي متاحيات الفروع أيضا يمكن دراسة النظام بتطبيق مفاهيم التوزيع ذي الحدين مباشرة[٤٠] .



شكل ٥ . مسببات فقد الحمل في حالات النظام المختلفة .

٩ ــ الاستنتاجات

تم في هذا البحث إيراد تعريفات دقيقة للعديد من المؤشرات الاحتمالية التي تصف أداء نظم توليد ونقل القدرة ، كما جرى وصف طرائق يدوية مبسطة ، وكذلك تم وضع الأساس لبعض الخوارزميات المِحسابية لتقويم هذه المؤشرات ، ولحساب الانحرافات المعيارية في هذه المؤشرات . ويمكن الاستفادة من هذه المؤشرات بصورة كمية أو كيفية على النحو التالي . في النظم المنخفضة المعولية ، يكون الانحراف المعياري في تكلفة الطلب غير المجاب مقاربا لنظيريه في تكلفتي الإنشاء والتشغيل ، كما يتيسر تمييز العناصر أو الفروع ذات الأهمية أي الأكثر مسؤولية عن تخفيض المعولية . في هذه الحالة ، يمكن العمل على تحسين شبكة القدرة برفع معولية و / أو سعة العناصر ذات الأهمية بحيث تكون تكلفة الإنفاق على هذا التحسين مساوية للانخفاض المنتظر في تكلفة الطلب غير المجاب[٨ ، ١١] . أما في حالة النظم العالية المعولية ، فيحسن النظر إلى المؤشرات السالفة الذكر كمؤشرات وصفية ، واعتبارها بمثابة قيود على تشغيل الشبكة ، بحيث يجرى العمل على تحسين أداء الشبكة بهدف الوصول إلى المستويات المقبولة من هذه المؤشرات[٨] .

واستكمالا للعمل الوارد في هذا البحث ، تجرى الآن دراسة تأثير انتفاء الاستقلال الإحصائي بين فروع النظام ، وكذلك تقدير قيم التشتت في مؤشرات النظام نتيجة للريبة في القيم المستعملة لمتاحيات وسعات العناصر[٧ ، ٤٦] . كما تجرى برمجة الخوارزميات الواردة هنا بهدف استعمالها في

دراسة خطط التوسع الفعلية لنظم القدرة الكبيرة . ويُرجى مستقبلاً ، إن شاء الله ، تطوير الدراسة الحالية لتشمل ما يُعرف بمعولية الشبكة المتعددة المناطق[٣] وذلك باستخدام الجبر البولاني المتعدد القيم كتعميم لجبر التبديل (الجبر البولاني الثنائي) المستخدم هنا ، وكذلك تطويرها لدراسة الشبكات المتعددة المنابع والمتعددة الأحمال[١٨] .

تقدير

تم تقديم هذا البحث في الندوة الأولى لأنظمة القوى الكهربائية في الدول السريعة النمو ، التي عقدت بجامعة الملك سعود بالرياض في الفترة ٢١ ــ ٢٤ رجب ١٤٠٧ هـ ، ونشرت منه صورة أولية في سجل بحوث هذه الندوة (ص ص ٢٤٧ ــ ٢٥٤) قبل انعقادها . وقد أفاد المؤلف في تحسينه لهذا البحث من الاقتراحات البناءة للمحكمين وكذلك من المناقشات التي أعقبت إلقاء البحث ضمن سلسلة الحلقات البحثية seminars الخاصة بقسم الهندسة الكهربائية والمِحْسابية بجامعة الملك عبد العزيز .

المراجع

[١] **Billinton, R.** , *Power System Reliability Evaluation, New York, Gordon & Breach (1970)* .

[٢] **Billinton, R. , Ringlee, R. J. , and Wood, A. J.**, *Power System Reliability Calculation,* Cambridge, MA,MIT Press (1973) .

[٣] **Sullivan, R. L.**, *Power System Planning,* New York, McGraw-Hill (1977) .

[٤] **Endrenyi, J.**, *Reliability Modeling in Electric Power Systems,* New York, Wiley (1978) .

[٥] IEEE Committee Report, IEEE reliability test system, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems,* **PAS-98** (6): 2047-2054 (1979) .

[٦] *IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems,* IEEE Press (1980) .

[٧] **Bubenko, J. A., and Habibollahzadeh, H.** Reliability aspects in power systems in: **Lauger, E., and MØltoft, J. (ed.)** *Reliability in Electrical and Electronic Components and Systems,* Amsterdam: North Holland, (1982) .

[٨] **Koglin, H.-J. , Roos, E. , and Wellssow, W. H.** , Application of reliability calculation methods to planning of high voltage distribution networks, *Proceedings of Third International Conference on Reliability of Power Supply Systems,* London, pp. 64-68 (1983) .

[٩] **Billinton, R. , and Hossain, K. L.**, Reliability equivalents: power system applications, *Reliability Enqineering,* **5** (4): 239-257 (1983) .

[١٠] **Billinton, R., and Allan, R. N.**, *Reliability Evaluation of Power Systems,* New York, Plenum (1984) .

[١١] **Munasinghe, M.**, Engineering-economic analysis of electric power systems, *Proc. IEEE,* **72** *(4):424-461 (1984)* .

Salvaderi, L., and Billinton, R., A comparison between two fundamentally different approaches to composite system reliability evaluation, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems,* **PAS-104** (12): 3486-3492 (1985) . [١٢]

Shaalan, A. M., A survey of reliability criteria used by the Saudi Consolidated Electric Companies (SCECOS) in generating capacity planning, *Proceedings of the Second Saudi Engineers Conference, Dhahran,* Vol. 2, pp. 610-631 (1985). [١٣]

Chen, Q., and Singh, C., Equivalent load method for calculating frequency & duration indices in generation capacity reliability evaluation, *IEEE Trans. Power Systems,* **PWRS-1** (1):101-107 (1986) . [١٤]

El-Kady, M. A., El-Sobki, M. S., and Sinha, N. K., Reliability evaluation for optimally operated, large, electric power systems, *IEEE Trans. Reliability,* **R-35** (1): 41-46 (1986) . [١٥]

Meliopoulos, A. P., and Bakirtizis, A. G., Bulk power system reliability assessment experience with the RECS program, *IEEE Trans. Power Systems,* **PWRS-1** (3): 235-243 (1986) . [١٦]

Allan, R. N., Billinton, R., and Abdel-Gawad, N. M. K., The IEEE reliability test system: Extensions to and evaluation of the generating system, *IEEE Trans. Power Systems,* **PWRS-1** (4): 1-7 (1986) . [١٧]

Su, C. - T., Wu, T. - S., Lee, T. - H., and Huang C. - L., Capacity planning with flow and reliability evaluation using Monte Carlo simulation, *IEEE Trans. Reliability,* **R-35** (5): 518-522 (1986) . [١٨]

Billinton, R., Reliability assessment of electric power systems, *Proceedings of the First Symposium on Electric Power Systems in Fast Developing Countries, Riyadh,* pp. 1-7 (1987) . [١٩]

Shaalan, A. M., Problems associated with power system planning process in fast developing countries," *Proceedings of the First Symposium on Electric Power Systems in Fast Developing Countries, Riyadh,* pp. 434-439 (1987) . [٢٠]

Leite da Silva, A. M., Pazo Blanco, F. A. F., and Coelho, J., Discrete convolution in generating capacity reliability evaluation-LOLE calculations and uncertainty aspects, *IEEE/PES 1988 Winter Meeting, New York, paper 88 WM* 186-9 (1988) . [٢١]

Allan, R. N., Billinton, R., Shahidehpour, S. M., and Singh, C., Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, *IEEE/PES 1988 Winter Meeting, New York, paper 88 WM 172 - 9* (1988) . [٢٢]

Ford, L. R., and Fulkerson, D. R., *Flows in Networks,* Princeton, NJ, Princeton University Press (1962) . [٢٣]

Frank, H., and Frisch, I. T., *Communication, Transmission, and Transportation Networks,* Reading, MA, Addison-Wesley (1971) . [٢٤]

Minieka, E., *Optimization Algorithms for Networks and Graphs,* New York, Marcel Dekker (1978) . [٢٥]

Rai, S., Kumar, A., and Prasad, E. V., Computing the performance index of a computer network, *Reliability Engineering,* **16** (2): 153-161 (1986) . [٢٦]

Rushdi, A. M., Capacity function-preserving star-delta transformations in flow networks, *Reliability Engineering,* **19** (1): 49-58 (1987) . [٢٧]

Rushdi, A. M., Performance indexes of a telecommunication network, *IEEE Trans. Reliability,* **R-37** (1): 57-64 (1988) . [٢٨]

Aggarwal, K. K., A fast algorithm for the performance index of a telecommunication network, *IEEE Trans. Reliability,* **R-37** (1): 65-69 (1988) . [٢٩]

Rushdi, A. M., The star-delta transformations of bidirectional branches in flow networks, *IEEE Trans. Reliability* (under publication) . [٣٠]

Singh, C., and Asgarpoor, S., Reliability evaluation of flow networks using delta-star transformations, *IEEE Trans. Reliability,* **R-35** (4): 472-477 (1986) . [٣١]

Carroll, L., *Symbolic Logic,* Sussex, England, Harvester (1977) . [٣٢]

Wheeler, R. F., *Rethinking Mathematical Concepts,* Chichester, England, Ellis Horwood (1981) . [٣٣]

Rushdi, A. M., Symbolic reliability analysis with the aid of variable-entered Karnaugh maps, *IEEE Trans. Reliability,* **R-32** (2): 134-139 (1983) . [٣٤]

رشدى ، ع . م .، و الخطيب ، ض. ل. ، استعراض لطرائق تحليل اعتمادية النظم من منظور خريطة كارنوه ، سجل بحوث المؤتمر الهندسى السعودى الأول ، جدة ، المجلد الأول ، ص‌ص ٥٧ ــ ٩٥ (١٩٨٣) . [٣٥]

رشدي ، ع . م . ، تحليل الاعتمادية الإجمالية لشبكات اتصالات الحاسبات الآلية ، سجل بحوث المؤتمر الوطنى السابع للحاسب الآلي ، الرياض ، ص‌ص. ٢٣ ــ ٣٨ (١٩٨٤) . [٣٦]

Rushdi, A. M., How to hand-check a symbolic reliability expression, *IEEE Trans. Reliability,* **R-32** (5): 402-408 (1983) . [٣٧]

Hammer (Ivanescu), P. L., and Rudeanu, S., *Boolean Methods in Operations Research and Related Areas,* New York, Springer-Verlag (1968) . [٣٨]

Rushdi, A. M., Uncertainty analysis of fault-tree outputs, *IEEE Trans. Reliability,* **R-34** (5): 458-462 (1985) . [٣٩]

Henley, E. J., and Kumamoto, H., *Reliability Engineering and Risk Assessment,* Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall (1981) . [٤٠]

Akers, Jr., S. B., The use of wye-delta transformations in network simplification, *Operations Research,* **8** (3): 311-323 (1960) . [٤١]

Lee, S. H., Reliability evaluation of a flow network, *IEEE Trans. Reliability,* **R-29** (1): 24-26 (1980) . [٤٢]

Agrawal, V., and Barlow, R. E., A survey of network reliability and domination theory, *Operations Research,* **32** (3): 478-492 (1984) . [٤٣]

Aven, T., and ∅steb∅, R., Two new component importance measures for a flow network system, *Reliability Engineering,* **14** (1): 75-80 (1986) . [٤٤]

Rushdi, A. M., Utilization of symmetric switching functions in the computation of k-out-of-n system reliability, *Microelectronics & Reliability,* **26** (5): 973-987 (1986) . [٤٥]

Homoud, G., and Billinton, R., An approximate and practical approach to including uncertainty concepts in generating capacity reliability evaluation, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems,* **PAS-100** (3): 1259-1265 (1981) . [٤٦]

Probabilistic Performance Indices of Power Generation and Transmission Systems

ALI MUHAMMAD RUSHDI
Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah, SAUDI ARABIA.

ABSTRACT: The capacity function in a general flow network has been studied as a pseudo-switching function in the successes of network branches. In addition, this function has been computed *via* the algorithm of equivalent branches and the algorithm of minimal cutsets. These algorithms are manual recently developed techniques that are suitable for computer programming. Consequently, both algorithms have been utilized in the probabilistic analysis of power generation and transmission networks. This analysis covers the evaluation of certain general indices that are usually employed for measuring the performance of power systems. These indices include both the expectation and the standard deviation of the capacity and the demand not served as well as the loss of load probability, all of which are instantaneous indices assuming a constant load. Moreover, the analysis includes certain average indices, like the expected energy not served (expected unserved energy) and the loss of load expectation, which adopt a more realistic load model allowing stepwise changes in load value during a finite time interval. In addition, some new indices for measuring the importance of various branches in the network are defined, and methods for their evaluation are explained. In most cases, the pictorial property of the Karnaugh map has been utilized in the representation of various algebraic relations, and in the classification of causes of loss of load in the different network states. Finally, the quantitative or qualitative utilization of the indices considered is discussed and several new research topics extending the present work are proposed.