مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (5) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (5) 2012

تطبيق نظرية اللعبة في اختيار استراتيجية ملائمة لتوسيع شبكة كهربائية

الدكتور أحمد سليمان أحمد*
الدكتور تمّام حيدر**
ميساء قصير***

(تاريخ الإيداع 18 / 6 / 2012. قُبِل للنشر في 29/ 7 / 2012)

□ ملخّص □

يعتبر موضوع تخطيط وتوسيع الشبكات الكهربائية موضوعاً هامّاً وحسّاساً لارتباطه بالنمو الاقتصادي للبلد وتأمين مصادر الطاقة والنموّ السكاني، وغيرها من العوامل.

يزداد الطلب على القدرة الكهربائية بشكل كبير، ويترافق ذلك مع تغيرات هامّة في سوق القدرة الكهربائية كتحرير السوق، ودخول موزعي القدرة المستقلين، بالإضافة إلى تنامي الاهتمام بمصادر الطاقة المتجددة وفرض معايير تتعلق بالبيئة، وغيرها. أدّت هذه التطورات مجتمعة إلى ضرورة دراسة موضوع تخطيط الشبكات الكهربائية مع اعتبار المعايير الجديدة. اختيرت نظرية اللعبة بهدف الحصول على حلّ توفيقي أمثل من بين مجموعة من الحلول المقترحة وذلك من وجهة نظر مجموعة من المعايير متعارضة الأهداف. نقوم في هذا العمل بتوصيف الصياغة الرياضية لمواقف اتخاذ القرار، وبناء خوارزمية تقوم بتحديد استراتيجية الحل التوفيقي الأمثل لهذه المواقف. تمّ بناء برنامج يعتمد على نظرية اللعبة بمساعدة البيئة البرمجية Matlab، لاختيار الحلّ التوفيقي الأمثل. اختبرت فعالية الطريقة بتطبيقها على شبكة كهربائية تحتاج إلى توسيع.

كلمات مفتاحيه: تخطيط الشبكات الكهربائية– تصميم الشبكات الكهربائية– نظم القدرة الكهربائية– نظرية اللعبة– إيجاد الحل الأمثل وفق باريتو

* أستاذ مساعد– قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين– سورية.
** مدرّس– قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين– سورية.
*** طالبة دراسات عليا (ماجستير)– قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين– سورية .

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (5) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (5) 2012

Selection of Suitable Strategy for Expanding a Power System Network Using Game Theory

Dr.Ahmad Sleiman Ahmad[•]
Dr. Tammam Haidar[••]
Maissa Kasseir[•••]

(Received 18 / 6 / 2012. Accepted 29 / 7 / 2012)

□ ABSTRACT □

Power system planning and expanding is an important and sensitive subject, because of its correlation with the economic development of the country, power resources, population growth and many other factors.

In the recent decades, the demand of the electric power has increased dramatically. This is associated with the important changes in power market that are the result of many factors: the liberalization of energy market, the emergence of independent power producers, the growing interest in renewable energy resources, and the application of new criteria concerned with the environment, and other issues. All of these changes require the study of electric power-system planning putting in mind the new criteria.

The game-theory is chosen to obtain an optimal compromising solution among a set of the recommended solutions; this is in the light of the criteria with opposing goals.

In this work, we provide a description of the mathematical formula for the decision making positions and we aim to develop an algorithm that determines the optimal-compromising solution strategy for such positions. The Matlab environment helps to construct a software for choosing the optimal-compromising solution based on the game-theory. The effectiveness of such approach has been demonstrated by being applied to an electrical network suffering from specific problems and in need to be expanded.

Key words: Power system planning, Power system designing, Electric power system, Game theory, Pareto optimum.

[•] **Assistant Professor, Department of Electric Power System, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
[••] **Assistant Professor, Department of electric power system, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
[•••] **Postgraduate Student, Department of Electric Power System, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدّمة:

بدأ الطلب على القدرة الكهربائية يزداد بشكل هائل في العقود الأخيرة، مع التقدم الكبير في الصناعة والتكنولوجيا، وخاصّة في الدول النامية بما فيها سوريا، كما تنامى الاهتمام بطرق توليد الطاقة الكهربائية النظيفة، والحدّ من الانبعاثات الضارة، مما أضاف معايير جديدة يجب أخذها بالحسبان في عملية التصميم والتخطيط [1]. فبالإضافة إلى تخطيط التوليد والنقل أصبحت لدينا حدود جديدة متعلقة بتعرفة القدرة الكهربائية وانبعاث الغازات ومتطلبات الزبائن الخاصّة والقيود المتعلقة بمسالك خطوط النقل وأهداف التوصّل إلى استخدام محطّات التوليد المعتمدة على الطاقات المتجددة، كلّ ذلك بالإضافة إلى المعايير الاقتصادية التقليدية [2].

كما أنّ تغيرا ملحوظا وهامّاً واجه قطاعات توليد ونقل الطاقة الكهربائية في العقود الأخيرة بتحوّلها من شركات إقليمية وحيدة القطب (مسيطرة) إلى سوق حرّة (تنافسية).

في سوق الكهرباء التنافسية تسعى جميع الهيئات المشاركة بما فيها منتجي الطاقة الكهربائية المستقلين (Independent power producers (IPPs')) إلى رفع عوائدها إلى الحدّ الأقصى، من أجل التوصّل إلى هذا الهدف، عليهم أن يأخذوا بالحسبان خيارات بناء وحدات توليد جديدة أو شراء الكهرباء من مؤسسات أخرى أو من مزوّدي الطاقة الكهربائية المستقلين ('IPPs). لذلك تكتسب عملية توسيع الشبكة في الوقت الراهن أهمية استثنائية بوجود السوق التنافسية.

تعتمد منهجية الطرق الرياضية المستخدمة في تخطيط التوليد التقليدي على: البرمجة الخطية، البرمجة اللاخطية، البرمجة الديناميكية وتقنيات البرمجة الصحيحة المختلطة [3].

بسبب الطبيعة اللاخطية والمتقطعة المعتبرة في تخطيط وتوسيع التوليد يصبح حلّ المشكلة أكثر صعوبة مما استوجب تطوير طرق جديدة لإيجاد الحل الأمثل تعتمد على تقنيات الذكاء الصنعي Artificial Intelligence (AI) مثل: الخوارزمية الجينية Genetic Algorithm (GA) والنظم الخبيرة Expert Systems وخلايا النحل particle swarm وغيرها.

تأخذ هذه الطرق عدداً محدوداً من المعايير مثل الكلفة والموثوقية والانبعاثات وذلك لأنه من الصعب إدخال العدد الكبير من المعايير المطلوبة في عملية الحل [3].

تعدّ نظرية اللعبة (Game Theory) منهجية تستخدم لتحليل المسائل التي تتضمن خلافا بين عدّة متخذي قرار مرتبطين بعضهم بالبعض، و يعتبرها البعض تعميما لنظرية القرار، التي يمكن تعريفها على أنها مدخل تحليلي يهدف إلى اختيار أفضل البدائل المتاحة لحل مشكلة ما، وتستخدم هذه النظرية على نطاق واسع في مجال الإدارة والسياسة وغيرها، حيث تعتبر أي مسألة تتطلب اختيار عنصر ما أو إجراء ما من بين مجموعة متاحة ومعروفة من العناصر أو الإجراءات هي مسألة خاضعة لنظرية القرار. [4].

ترتكز نظرية اللعبة على العلاقات بين عدّة لاعبين، يحاول كلّ منهم أن يجعل ربحه أعظمياً، وتهدف إلى نمذجة حالات يكون فيها عدد من المشاركين يؤثّرون ويتأثّرون بعضهم بالبعض من حيث كمية الربح التي يحققونها [5]. تزوّدنا نظرية اللعبة بطريقة موّصفة لتحليل مجموعة الاستراتيجيات المحتملة واختيار الاستراتيجية المثلى لكل لاعب.

أهميّة البحث و أهدافه

تعتمد الطرق التقليدية في تخطيط الشبكات الكهربائية على دراسة مجموعة من الحلول التي تحقق الشروط الفنية، ودراسة كل حل حتى النهاية ومن ثم المقارنة بين الحلول من الناحية الاقتصادية. لكنّ وجود عدد كبير من المعايير في ظل الظروف الراهنة لقطاع سوق الطاقة الكهربائية فرض دراسة موضوع التخطيط على أنه مسألة أمثلة متعدّدة المعايير، تدرس الحلّ الأمثل من عدّة وجهات نظر معاً. وهذا ما تستطيع أن تقدّمه نظرية اللعبة، التي توصّف عملية التخطيط على أنها حالة تنافسية بين عدّة لاعبين هم معايير التخطيط المرغوب اعتمادها في عملية التخطيط، وتقوم بالنتيجة باختيار حلّ هو الحلّ التوفيقي بين وجهات النظر المختلفة والمتنافسة فيما بينها.

نقوم في هذا العمل باختيار نمط اللعبة المناسبة لمسألة تخطيط الشبكات، ومن ثمّ اختيار اللاعبين المشاركين في اللعبة والذين يمثلون معايير التخطيط، ثم بناء خوارزمية تعتمد في بنيتها على نظرية اللعبة وقوانينها لاختيار الحل التوفيقي الأمثل لعملية التخطيط وذلك من بين مجموعة حلول مقترحة.

طرائق البحث و موادّه

1. نظرية اللعبة

يمكن تعريف نظرية اللعبة على أنها دراسة نموذجية للتعاون، أو الصراع بين عدة أطراف. تطبّق التصورات والأسس النظرية للعبة عندما تكون تصرفات أو أفعال عدة أطراف (لاعبين) متعلقة بعضها ببعض، حيث أنّ هذه الأطراف قد تكون عبارة عن أفراد أو مجموعات أو هيئات أو حتى أي تركيب من كلّ ما سبق. يقدم تصور نظرية اللعبة طريقة لتوصيف وبناء وأيضاً تحليل وفهم الخيارات (scenarios) الاستراتيجية للاعبين بهدف تحقيق الربح الأكبر. هناك صيغتان أساسيتان لعرض اللعبة، وهما الصيغة الموسّعة (Extensive form) والصيغة الاستراتيجية (Strategic form) والتي تدعى أحياناً الصيغة العادية (Normal form)، إن اختيار الطريقة المناسبة يتعلق بكمية التفاصيل المطلوب إظهارها في النموذج.

تستخدم نظرية اللعبة مجموعة من المفاهيم الأساسية وأهمّها [6]:

- اللاعبون (Players): ندعو $N = \{1, \dots n\}$ مجموعة اللاعبين، ندلّ على كل لاعب بالدليل i، وهم الأطراف اللذين يشملهم موقف اللعبة، ويدلّ تعبير لاعب على أية وحدة لاتخاذ القرار.
- قواعد اللعبة (Rules of the game): وهي مجموعة القواعد والإجراءات التي تعطي كل لاعب ميزات معينة، وتحدّد الهيكل التنظيمي للعبة، والتتابع الممكن لكلّ حركة أو خطوة أو دور من أدوار اللعبة.
- الاستراتيجية (Strategy): يرمز لها بالرمز S_i، هي خطّة العمل التي يمكن للاعب i أن يحدد على أساسها كيفية توزيع خياراته بين التصرفات المتاحة في اللعبة.
- الاستراتيجية الصرفة (Pure Strategy): هي إحدى الاستراتيجيات الممكنة للعبة والتي يمكن أن يختارها وبمفردها اللاعب أثناء اللعب، أي أن اللاعب يوزّع جهده الاحتمالي لاختيار خيار واحد فقط، وتسمى أيضاً الاستراتيجية المفردة.
- الاستراتيجية المزيجة (Mixed Strategy): وهي الاستراتيجية المؤلفة من مزيج من الاستراتيجيات المفردة الممكنة للعبة، ويتم استخدام كلّ منها في اللعب وفق جدول للتكرارات النسبية مقابل لتلك

الاستراتيجيات المفردة، أي عندما يحدّد اللاعب توزيعاً احتمالياً يحدّد فيه احتمال اختيار كل بديل من البدائل المتاحة فإننا نقول أنه اختار استراتيجية مزيجة.

- العائد أو الربح (Pay-Off): ويرمز له بالرمز $u_i(s)$ وهو عبارة عن قيمة متحول عشوائي، مجموعة تعريفه هي مجموعة النتائج المتحققة في مسألة المنافسة، ويسعى إلى تحقيقه كل طرف مشارك في اللعبة. ولا يعتمد العائد على استراتيجية اللاعب المختارة فقط وإنما يعتمد أيضاً على استراتيجيات اللاعبين الآخرين.
- توازن ناش (Nash equilibrement): ويدعى أيضاً التوازن الاستراتيجي، وهو مجموعة الاستراتيجيات (استراتيجية لكل لاعب) التي تتصف بأنّ أيّاً من اللاعبين لا يمكنه الحصول على ربح أعلى فيما لو غيّر استراتيجيته تلك.
- العقلانية (Rationality): يوصف اللاعب بالعقلاني إذا كان يهدف من خلال تصرفاته إلى جعل ربحه الشخصي أعظمياً، ويفترض عادةً أن يكون جميع اللاعبين عقلانيين.
- الاستراتيجية المسيطرة (Dominating strategy): تسيطر استراتيجية معينة لأحد اللاعبين على استراتيجية أخرى، إذا كانت هذه الاستراتيجية تعطي ربحاً أكبر للاعب، بغضّ النظر عن سلوك اللاعبين الآخرين. تعتبر الاستراتيجية S مسيطرة بقوة (strong dominance) على الاستراتيجية $\hat{S}$ إذا كان الربح الذي يحققه اللاعب في حال اختيارها هو الأفضل أياً كانت خيارات اللاعبين الآخرين، بينما تعتبر الاستراتيجية مسيطرة بشكل ضعيف (weak dominance) إذا مثّلت الخيار الأفضل للاعب من أجل خيارات معينة للاعبين الآخرين، وبنفس الوقت لم تكن الأسوأ من أجل خيارات أخرى لبقية اللاعبين.
- من الجدير بالذكر أن اللاعب يفضّل الاستراتيجية S على الاستراتيجية $\hat{S}$ إذا كان $u_i(S) > u_i(\hat{S})$

2. تصنيف الألعاب

يمكن تصنيف الألعاب بعدّة طرق، وفقاً لعدد اللاعبين أو لعدد الاستراتيجيات أو لطبيعة تابع المدفوعات، أو لطبيعة التفاوض السابق للعب [6] .

وفقاً لعدد اللاعبين:

- ألعاب بين لاعبين Two-Person games
- ألعاب بين n لاعب N-Person games حيث $n \geq 3$.
- وفقاً لعدد الاستراتيجيات:
- ألعاب محدودة Finite game حيث عدد الاستراتيجيات المتاحة منتهٍ.
- ألعاب مستمرة Continuous game حيث عدد الاستراتيجيات المتاحة غير منتهٍ.
- وفقاً لطبيعة تابع المدفوعات:
- ألعاب ذات مجموع صفري Zero-Sum games حيث ما يربحه الطرف الأول يخسره الطرف الثاني.
- ألعاب ذات مجموع غير صفري Non-Zero-Sum games حيث لا يشترط أن يكون مجموع عوائد الطرفين مساوياً للصفر.
- وفقاً للمفاوضات قبل اللعب:

- ألعاب تعاونية Cooperative games حيث يشكل اللاعبون تحالفات وينسقون استراتيجياتهم عن طريق بناء التحالفات قبل اللعب.
- ألعاب غير تعاونية Non– Cooperative games حيث الاتصال والتنسيق بين اللاعبين غير ممكن.
- هناك طرق وتقنيات متعددة تستخدم في حل الألعاب وأشهرها طريقة نقطة التوازن، وطريقة السيطرة، كما تستخدم الطرق البيانية أيضاً لحل الألعاب ذات عدد اللاعبين 2n أو عدد الاستراتيجيات 2m، كما تساعد البرمجة الخطية في حلّ الألعاب بشكل عام.

3. إدراج اللعبة في عملية تخطيط الشبكات الكهربائية

من أجل دراسة تخطيط شبكة كهربائية باستخدام نظرية اللعبة لا بدّ في البداية من اختيار نمط اللعبة المناسب لتوصيف هذه الحالة. يمكن تمثيل موضوع تخطيط الشبكات الكهربائية بلعبة بين عدّة لاعبين (يمثّل اللاعبون المعايير المتعددة التي سيتمّ اعتبارها في عملية التخطيط)، ذات مجموع غير صفري، كما يمكن إجراء تحالفات في اللعبة (إذ أنّ أحد اللاعبين قد يتخلى عن ربح معين يكسبه جراء اختياره لسيناريو معين إذا كان ذلك يصب في زيادة الربح العام لمجموعة اللاعبين)، كما تعتبر هذه اللعبة لعبة معادة، وتلعب اللعبة المعادة في جولات وتمثل نتيجة كلّ جولة القاعدة للجولة التالية.

تمّ اختيار الصيغة الاستراتيجية في التعبير عن لعبة تخطيط الشبكات في هذا العمل، وذلك لأن الصيغة الموسّعة يمكن تحويلها إلى الصيغة الاستراتيجية كما أنّ هذا التمثيل يسهل التعامل معه رياضياً لأننا نستطيع عرض نتائجه على شكل مصفوفات. ويمثل كل معيار من المعايير التي يجري اعتمادها في الدراسة (كالموثوقية والاقتصادية وغيرها) لاعباً مشاركاً في لعبة التخطيط.

وكما هو معروف في نظرية اللعبة يكون اللاعبون عقلانيين، ويعرفون توابع ربحهم (نفعهم)، يكون هدف اللاعبين العقلانيين هو جعل ربحهم أعظمياً. كما أن الاستراتيجية التي يحقق اللاعب جرّاء اختيارها ربحاً أعظمياً تدعى الاستراتيجية المثلى للاعب، وذلك بغضّ النظر عن سلوك باقي اللاعبين. وتكون هذه الاستراتيجية عندها مسيطرة بالنسبة لهذا اللاعب.

يعني البحث عن حلّ يأخذ بعين الاعتبار مصالح جميع اللاعبين، البحث عن حلّ فعّال وهو ما يسمى إيجاد الحل الأمثل وفق باريتو "Pareto optimum". بتعبير آخر يعني الحلّ الذي ينتمي إلى مجموعة حلول Pareto، الحل الذي لا يخضع للسيطرة من قبل أيّ حلّ آخر.

ولكن يبقى الهدف الأساسي هو اختيار حلّ من بين مجموعة حلول Pareto، من أجل تحقيق هذا الهدف نقوم بإدخال تابع نفع عام حيث أننا نستطيع باستخدام هذا التابع الحصول في نهاية عملية الأمثلة على حلّ وحيد وبالتالي نتمكن من التخلص من ورطة الاختيار من مجموعة حلول Pareto.

4. خوارزمية الحل

سنعرّف المتحولات التالية وذلك من أجل التوصيف الرياضي للعبة:

- المجموعة N وهي مجموعة اللاعبين $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ ، حيث:

$$N_i \in N \quad i = (1,2, \dots, n)$$

- المجموعة S وهي مجموعة الاستراتيجيات المتاحة $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$
- حيث: $S_i \in S \quad j = (1,2, \dots, k)$

- المجموعة M وهي مجموعة تراكيب الاستراتيجيات المتاحة $M = \{M_1, M_2, \dots, M_t\}$
- حيث: $M_t \in M \quad t = (i, \dots, 2^k)$
- المجموعة E وهي مجموعة النتائج $E = \{E_1, E_2, \dots, E_t\}$ ، حيث: $E_t \in E \quad t = (i, \dots, 2^k)$
- المجموعة P وهي مجموعة الأرباح أو الدفوعات $P = \{u_{t,1}, \dots, u_{t,n}\}$

حيث: $u_{t,i} \in P \quad t = (i, \dots, 2^k) \ , \ i = (1, \dots n)$

الاستراتيجيات هي الإجراءات التي يجب تطبيقها في الشبكة، والتي يجري اقتراحها من لاعبين مختلفين، ويمكن تركيبها بعضها مع بعض، حيث نحصل نتيجة التركيب على عدد يساوي 2^k من التراكيب وذلك من أجل عدد k من الاستراتيجيات المقترحة.

يحدد تابع النفع $u_i(M_t)$ لكل لاعب على حدة، النفع الذي يحققه اللاعب عند النتيجة E_t بناءً على استخدام تركيب محدد من الاستراتيجيات M_t والذي يتم الحصول عليه من مجموعة الدفوعات P كما هو مبين بالعلاقة الآتية، حيث أنه من أجل $N_i \in N$ و $M_t \in M$ فإن:

$$P = \{u_i(M_t) ; M_t \in M\}$$
$$= \{u_1(M_t) \dots, u_n(M_t)\}$$

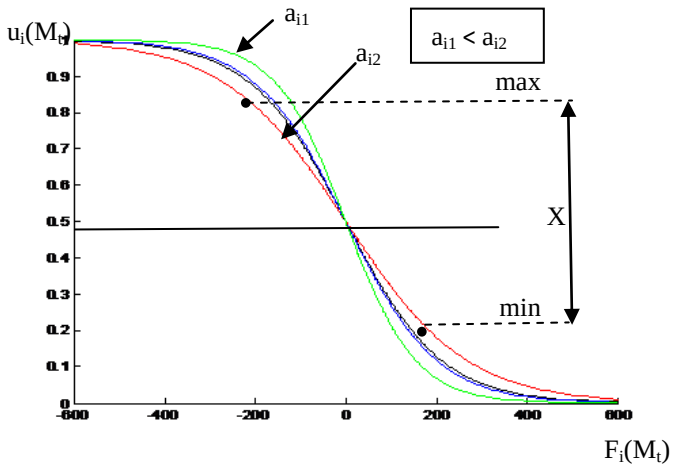
نقوم بترتيب أرباح جميع الاستراتيجيات لكل لاعب على حدة في المصفوفة $[u]$، وتمثل عناصر المصفوفة $[u]$ نفع كل من اللاعبين وذلك عند كل سيناريو.

يمكن استخدام التابع $u_i(M_t)$ من أجل حساب تابع النفع الشخصي (الخاصّ) وذلك بهدف نمذجة العلاقات وتحويل قيم النتائج المختلفة للحسابات المتعلقة بكل معيار على حدة من أجل نقلها من نظام وحداتها الأساسية (وحدة نقد، وحدة استطاعة، وحدة طاقة، ...) إلى نظام قياسي.

من أجل $N_i \in N$ و $M_t \in M$ و $S_1 \in S$ يكتب النفع الشخصي $u_i(M_t)$ بالعلاقة:

$$u_i(M_t) = \frac{1}{1+e^{a_i(F_i(M_t)-F_i(S_1)}}$$

حيث $F_i(M_t)$ هي قيمة التابع من الحساب في نظام الوحدات الأساسية، بينما تمثل $F_i(S_1)$ قيمة التابع في السيناريو الأساسي (الحالة الراهنة للشبكة).



الشكل (1) المنحني الإحصائي المستخدم لتحويل القيم إلى نظام قياسي

يصف المعامل a_i في العلاقة السابقة مقدار تقعّر التابع $u_i(M_t)$. يجب تحديد قيمة هذا المعامل من أجل كل لاعب (معيار). في السيناريو الأساسي الذي يجرى الانطلاق منه تكون قيمة التابع $F_i(M_t)$ مساوية للقيمة $F_i(S_1)$، وبالتالي تصبح في هذه الحالة قيمة $u_i(M_t)$ واحدة لجميع اللاعبين N_i وتساوي إلى القيمة (0.5).

يؤدي اختيار أيّ سيناريو من الحلول المقترحة إلى تغيير قيمة u_i المقابلة، إما باتجاه التحسن أو التراجع.

يقود تغيير إشارة a_i إلى الحصول على نظير التابع السابق على المحور y=0.5، تفيد هذه الخاصية في تحويل اتجاهات الأهداف المختلفة إلى نظام النفع الواحد (المتجانس). وإن قيمة التابع u_i، وعن طريق اختيار إشارة a_i، تبين التحسن أو التراجع في النفع مقارنة بالسيناريو الأساسي الذي تم الانطلاق منه، وذلك من أجل كل لاعب على حدة.

إذا كان المعامل a_i سالبا فهذا يعني أنه يمكن تحقيق الأهداف عند قيم عالية للتابع المدروس$F_i(M_t)$ بشكل أفضل مما هو عليه عند القيم الصغيرة، أما إذا كان المعامل a_i موجباً، فيكون الهدف هو الوصول إلى قيم منخفضة قدر الإمكان في النظام الأصلي.

يتم اختيار قيمة هذا المعامل في البداية بشكل اعتباطي، ولكن هذه القيمة تكون واحدة لجميع اللاعبين، وبعد الجولة الأولى من جولات اللعبة، يجب ربط قيمة هذا المتحول بخوارزمية الحل بحيث نعطي قيمة خاصّة للمعامل a_i لكل لاعب. تحدد قيمة a_i لكل لاعب باتّباع الخطوات التالية:

في جولة اللاعب الأولى نحسب عرض المجال X للتابع المبين بالشكل (1) باستخدام قيم النفع العظمى والصغرى لكل لاعب على حدة، وذلك باستخدام العلاقة الآتية:

$$X = u_{imax} - u_{imin}$$

ومن ثمّ يتم اختيار a_i بحيث نحصل على نفس عرض المجال X لجميع اللاعبين.

نعرّف فيما يلي ما يسمّى بتابع النفع العامّ ($u_{t,G}$)، وهو تابع مهمته المحافظة على استقرار اللعبة، ويتم ذلك عن طريق مراقبة تلك الاستراتيجيات التي يتحسن تابع نفعها العامّ مقارنةً مع الجولة السابقة، من أجل ذلك نطبق العلاقة التالية من أجل كل جولة ($r=1,2,\dots,r_{end}$):

$$u_{t,G} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} u_i(M_t)}{n-1}$$

باستخدام تابع النفع العام وعن طريق حساب القيمة المتوسطة الحسابية لتوابع النفع الخاصّة، يجري تحديد نقطة التوازن للمعايير، وعند هذه النقطة يكون ممكناً عند الحاجة تثقيل المعايير وذلك من أجل مراعاة رغبات خاصّة للمصممين، أو الاهتمام بأحد المعايير أكثر من غيره.

لتحديد اللاعب المسيطر، نقوم بتحديد عدد مرات تحسن الربح (Z_i) التي يحصل عليها كل من اللاعبين فمن أجل $M_t \in M$ و $N_i \in N$ نعتبر أن اللاعب قد تحسّن ربحه من جولة إلى أخرى إذا تحقق الشرط التالي:

$$(u_{t,G} > u_{t_{r-1},G}) \wedge (u_{t,i} > u_{t_{r-1},i})$$

بعد تحديد (Z_i) عدد مرات تحسن ربح اللاعب، نحدد اللاعب المسيطر، وهو اللاعب الذي حقّق أكبر عدد مرات تحسن في ربحه، أي الذي حصل على(Z_i^*) حيث:

$$Z_i^* = \max_{N_i \in N}(Z_i)$$

ومن ثمّ يجري اختيار السيناريو الأفضل للاعب المسيطر $u_i^*(M_t^*)$ كسيناريو أساسي للجولة التالية من اللعبة، وهو السيناريو الخاصّ باللاعب المسيطر الذي تم تحديده والذي يحقق له أفضل نفع فردي أي أنه يحقق المعادلة الآتية:

$$\left(Z_i^* = \max_{N_i \in N}(Z_i)\right) \wedge \left(u_i^*(M_t^*) = \max_{M_t \in M}(u_i(M_t))\right)$$

عند حصول مجموعة من اللاعبين على نفس العدد من تحسينات الربح، يتم اختيار الاستراتيجية التي تحقق النفع الفردي الأعظمي لأحد هؤلاء اللاعبين، في الجولات التالية يتم حساب استراتيجيات أخرى وتراكيب من الاستراتيجيات الأخرى، وبعد كل خطوة يجري تحليل سيناريو جديد بناءً على قواعد اللعبة.

يتم أخذ الاستراتيجيات المثلى من أجل كل خطوة تصميمية لاحقة، وتتم إعادة الخوارزمية عدد من المرات حتى لا يبقى لاعب مسيطر، وهذا يعني إيجاد الحل الأمثل، حيث يحاول كل لاعب تحسين نتيجته الشخصية ولكنه يتخلى عن تحسينات معينة إذا ما أدّت استراتيجية أخرى إلى تحسين النفع العام أي النتيجة العامة لجميع اللاعبين.

5. المعايير المدروسة

الاقتصادية

تحسب التكاليف الاقتصادية لكلّ من الحلول المقترحة باستخدام العلاقة:

$$AC_K = FC + cf \times VC$$

تمثل هذه التكاليف المجموع المؤلف من تكاليف الاستثمار FC وتكاليف التشغيل $cf \times VC$ ، حيث cf معامل يتعلق بالقدرة المنتجة. هذه التكاليف يجب دفعها في مرحلة التصميم، وتتضمن تكاليف التشغيل أيضا التكاليف الأخرى [7].

هذه القيمة المعرفة بالشكل الموصوف أعلاه تعطي قيمة الكتلة النقدية التي يجب أن تكون متوفرة عند لحظة الإقلاع، وذلك لتغطية كل التكاليف التي ستطرأ في المستقبل.

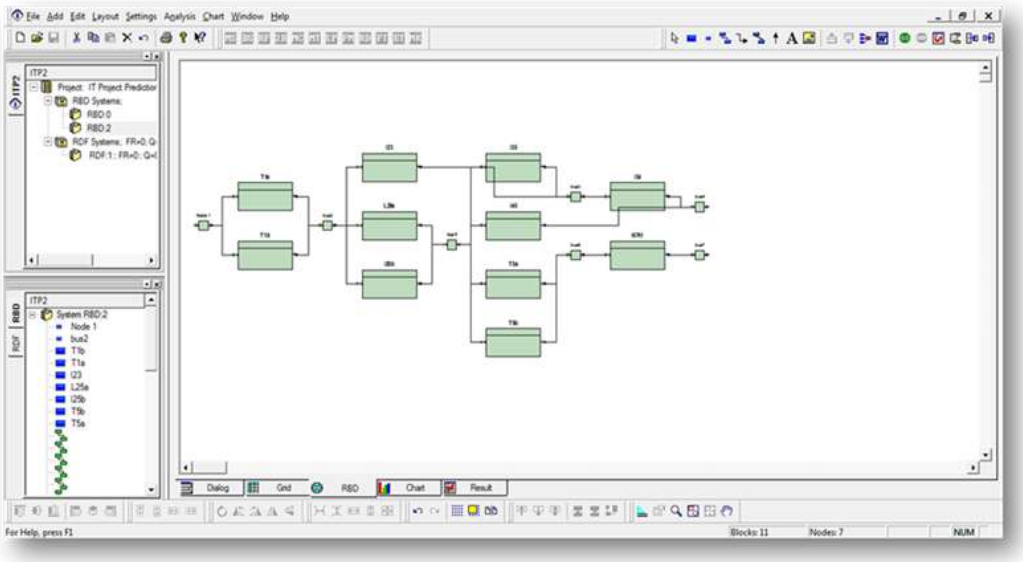
يتمّ حساب التكاليف الاقتصادية لكل سيناريو وفق المعادلة المذكورة، وتستخدم النتائج في الحصول على مصفوفة النفع وذلك بعد تحويلها إلى النظام القياسي كما ذكر سابقاً

الموثوقية

من أجل حساب الموثوقية لكل سيناريو من السيناريوهات المقترحة تمّ استخدام برنامج حساب الموثوقية (Item Toolkit)، يعتمد البرنامج في بنيته على ما يدعى "مخطط الموثوقية الصندوقي" (Reliability Block Diagram)، الذي يمكن تعريفه على أنه تمثيل منطقي للنظام وحالات عمله المختلفة، والعلاقات التي تربط بين مختلف هذه الحالات [8]. حيث يعبّر في هذا التمثيل عن العناصر المؤلفة للنظام والحوادث الممكنة بصناديق، والعلاقة بين هذه الصناديق هي توابع الموثوقية، حيث يتم تمثيل الحوادث التي تسبب عطلاً في النظام عند وقوعها بصناديق موصولة على التسلسل، أما الحوادث التي لا تسبب عطلاً في النظام إلا عند اجتماعها مع حوادث أخرى فتمثّل بصناديق موصولة على التفرع، وتكون النظم بشكل عام مختلطة بين الوصل التفرعي والتسلسلي.

يعتبر النظام في حالة عمل عندما يكون لدينا على الأقل مسار ناجح بين دخل وخرج المخطط، وبالتالي فإن مجموعة الطرق أو المسارات الناجحة المحتملة تبين لنا مجموعة حالات عمل النظام.

يقدّم خيار مخطط الموثوقية في برنامج حساب الموثوقية Item Toolkit وسيلة فعّالة ومرنة لبناء المخطط الصندوقي للموثوقية، وذلك باستخدام تقنيات النقر والسحب والإدراج للعناصر في صفحة العمل، مما يسمح لنا ببناء المخطط بشكل فعّال، كما أن إمكانات التحرير التي يقدمها البرنامج تمنحه مرونة إضافية وذلك من حيث إمكانية إدخال المعلومات الخاصّة بالأعطال وأيضاً إمكانات خاصّة بشكل إظهار المخطط من حيث ألوان الصناديق والخطوط وطباعة المخطط. يبين الشكل (2) أحد مخططات الموثوقية الصندوقية المبنية بمساعدة برنامجItem Toolkit.



الشكل (2) مخطط الموثوقية الصندوقي للشبكة الكهربائية المدروسة

إمكانية التحقيق

تتم إضافة معيار هامّ هو معيار إمكانية التحقيق من أجل التمييز بين السيناريوهات المقبولة والسيناريوهات التي لا تؤدي إلى حلّ مشاكل الشبكة التي استدعت الدراسة والتوسيع.

يجب أن يضمن أي حلّ من الحلول مجموعة من القضايا حتى يكون مقبولاً يمكن تلخيصها بالبنود التالية:

- يجب تزويد جميع الأحمال بالطاقة.
- عناصر النظام غير محملة تحميلاً زائداً.
- العناصر مصممة لتتحمل تيارات القصر المحتملة والقوى الناتجة عنها.
- تتحمل العازلية التوترات المتوقّعة.
- تتحمل عناصر النظام تحميلاً زائداً لفترة زمنية قصيرة.
- الميزانية المتوفرة.
- متطلبات الزبائن (على سبيل المثال: ما يتصل بالموثوقية).
- استقرار التوتر.
- الحدود الحرارية لعناصر النظام.

جرى تمثيل هذا المعيار، بعد الحساب باستخدام برنامج سريان الحمولة واختبار تحقق الشروط، باستخدام تابع قفزة كتابع نفع، يعطى هذا التابع القيمة [0] إذا كان تركيب الاستراتيجيات M_t الموافق غير قابل للتحقيق، بينما يعطى القيمة [1] إذا كان قابلاً للتحقيق، كما يمكن إعطاء بين [0] و [1] من أجل التعبير عن الاستراتيجيات القابلة للتحقيق بشكل جزئي. ويقصد بتعبير القابلة للتحقيق بشكل جزئي أنها تحلّ بعض مهام الشبكة وليس كلها.

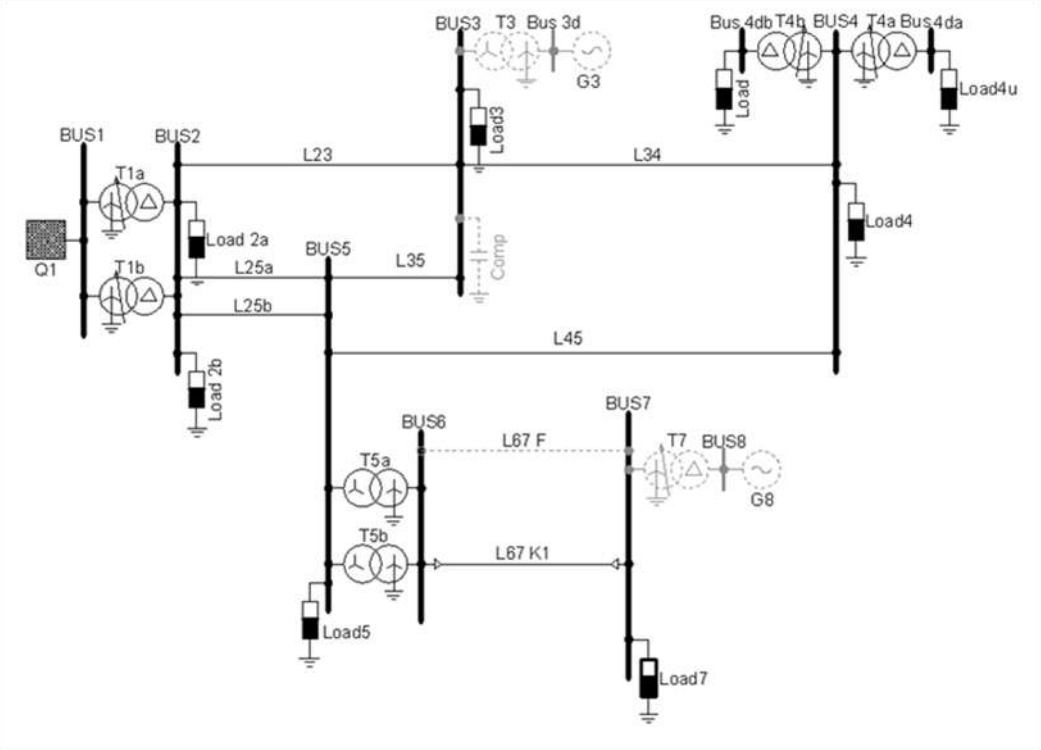
النتائج والمناقشة

من أجل الشبكة المبينة بالشكل (3) وهي شبكة 110kV تتم تغذيتها من محولتين استطاعة كل منهما 400MVA، يبلغ الحمل الكلي للشبكة 334MVA، هناك مهمتان للحل الأولى هي التحميل الزائد للخط L67k1 الثانية هي هبوط التوتر الذي قد يتجاوز الحدّ المسموح على قضيب التجميع 4 وذلك نظراً للزيادة المتوقعة للحمل.

الحلول المقترحة: المهمّة الأولى يمكن حلّها باستخدام خط نقل هوائي يربط على التوازي مع الخط L67k1، أو عن طريق ربط مجموعة تغذية مستقلة (ولتكن محطة ريحية) على قضيب التجميع 7، المهمة الثانية يمكن حلها باستخدام مجموعة تعويض استطاعة ردية أو باستخدام محطة طاقة حرارية يجري تركيبها على قضيب التجميع 3. كما يقترح فصل المحولة T5b لخفض نفقات التشغيل. تظهر الحلول المقترحة في الشكل (3) بخط متقطع. ويمكن ترتيب هذه الحلول في الجدول)1(الآتي:

رقم الاستراتيجية (الحلّ)	الاستراتيجية (الحلّ)
0	الاستراتيجية الأساسية (الحالة الراهنة)
1	خط نقل هوائي بين قضيبي التجميع 6 و7
2	محطة ريحية على قضيب التجميع 7
3	مجموعة تعويض استطاعة ردية على قضيب التجميع 3
4	محطة توليد حرارية على قضيب التجميع 3
5	فصل المحولة T5b

الجدول (1) مجموعة الاستراتيجيات المقترحة



الشكل (3) شبكة 110kV مع الحلول المقترحة

تدرس الحلول الخمسة المقترحة والتي يمكن من خلالها تركيب (2^k= 32) سيناريو، (حيث k عدد الحلول) من وجهة نظر ثلاثة لاعبين هم على الترتيب: الاقتصادية، الموثوقية، إمكانية التحقيق. حيث أجرينا الحسابات الاقتصادية للحلول المقترحة اعتماداً على قيم وسطية تم الحصول عليها من مصادر متعددة، كما تمّ رسم مخطط الموثوقية الصندوقي للنظام بمساعدة برنامج حساب الموثوقية Item Toolkit، من أجل دراسة موثوقية النظام، كما درست حالات إمكانات التحقيق للسيناريوهات المختلفة.

بعد حساب قيم كل من اللاعبين الثلاثة المقابلة للسيناريوهات المختلفة ومن ثم تحويلها إلى النظام القياسي عبر التابع $u_i(M_t)$، نقوم بترتيب النتائج في مصفوفة النفع المبينة في الجدول (2) الآتي:

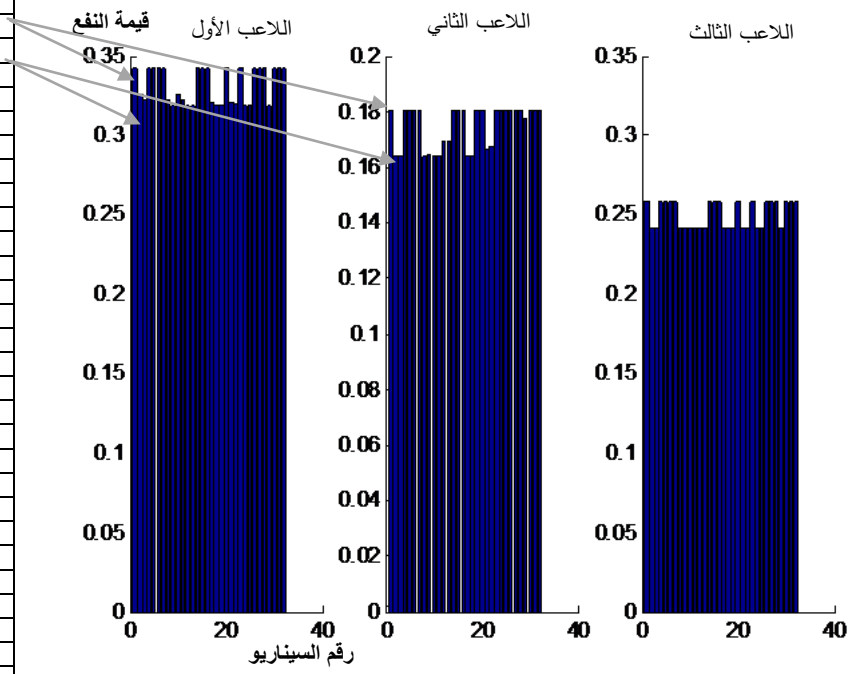
U_{11}	U_{12}	U_{13}
U_{21}	U_{22}	U_{23}
.	.	.
.	.	.
$U_{32\,1}$	U_{m2}	$U_{32\,3}$

الجدول (2) مصفوفة النفع

في الجولة الأولى للبرنامج سيبدأ كل لاعب من اللاعبين بقيمة نفع مساوية إلى 0.5 ماعدا لاعب التحقيق الذي سيبدأ بالقيمة 0 لأن الشبكة تتطلب توسيعاً بشكل سريع.

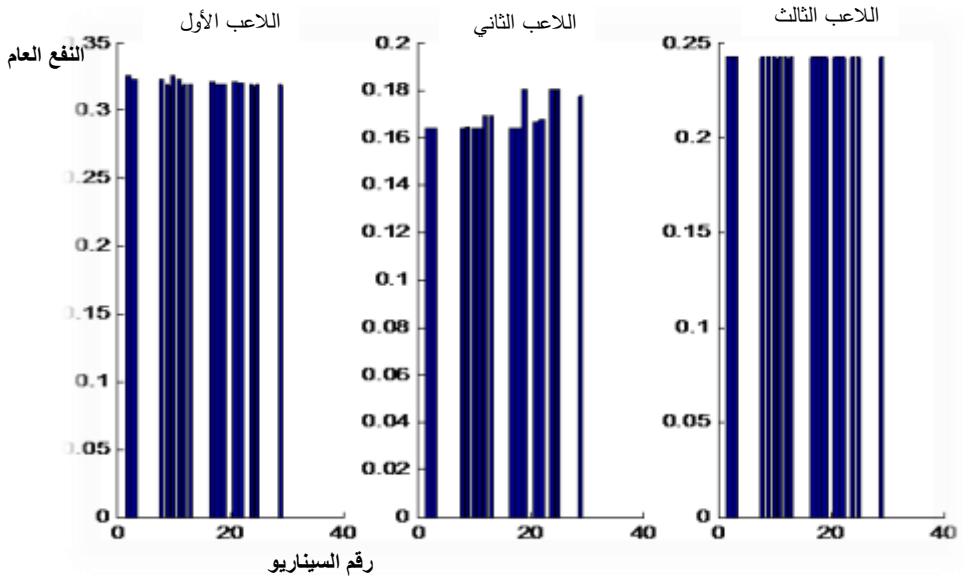
ثم في الجولات التالية يجري حذف الاستراتيجيات المسيطر عليها من قبل استراتيجيات أخرى وتحديد مجموعة "Pareto" ومن ثم من أجل اختيار الحل التوفيقي الأمثل من مجموعة باريتو يجري استخدام تابع النفع العام وتحديد اللاعب المسيطر واستراتيجيته المثلى، يتم في كل جولة استبدال قيمة التابع عند السيناريو الأساسي $F_i(S_1)$ في معادلة النفع الشخصي $u_i(M_t)$ بالقيمة المقابلة للاستراتيجية التي تم تحديدها، أي أن هذه الاستراتيجية أصبحت أساساً للجولة التالية. يبين الشكل (4) قيم مصفوفة النفع العام المقابلة لتراكيب الحلول المختلفة المبينة في الجدول المرافق للشكل، وذلك من أجل كل لاعب من اللاعبين المقترحين، في الجولة الأولى للبرنامج وقبل حذف الاستراتيجيات المسيطر عليها.

5	4	3	2	1	رقم الحل رقم السيناريو
					1
				x	2
			x		3
		x			4
	x				5
x					6
			x	x	7
		x		x	8
	x			x	9
x				x	10
		X	X		11
	X		X		12
X			X		13
	X	X			14
X		X			15
X	X				16
		X	X	X	17
	X		X	X	18
X			X	X	19
	X	X		X	20
X		X		X	21
X	X			X	22
	X	X	X		23
X		X	X		24
X	X		X		25
X	X	X			26
	X	X	X	X	27
X		X	X	X	28
X	X		X	X	29
X	X	X		X	30
X	X	X	X		31
X	X	X	X	X	32



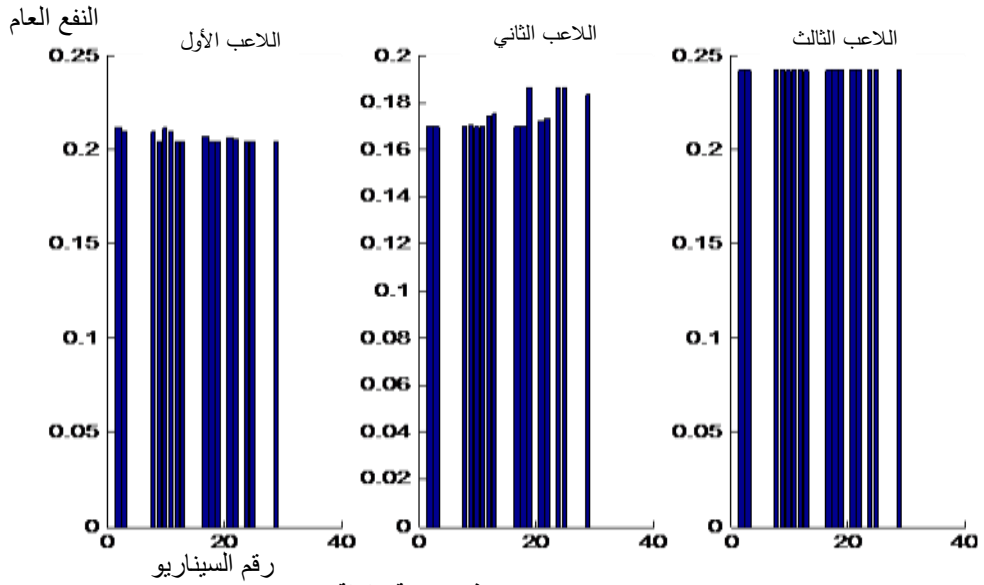
الشكل (4) قيم النفع العام للاعبين في الجولة الأولى قبل حذف الاستراتيجيات المسيطر عليها مع جدول السيناريوهات المحتملة المقابلة

العام المقابل لهذه الاستراتيجيات من خلال الشكل (5). نلاحظ انخفاض عدد السيناريوهات المطلوب ومقارنتها مع سيناريوهات أخرى بشكل واضح بعد اتخاذ إجراء السيطرة.

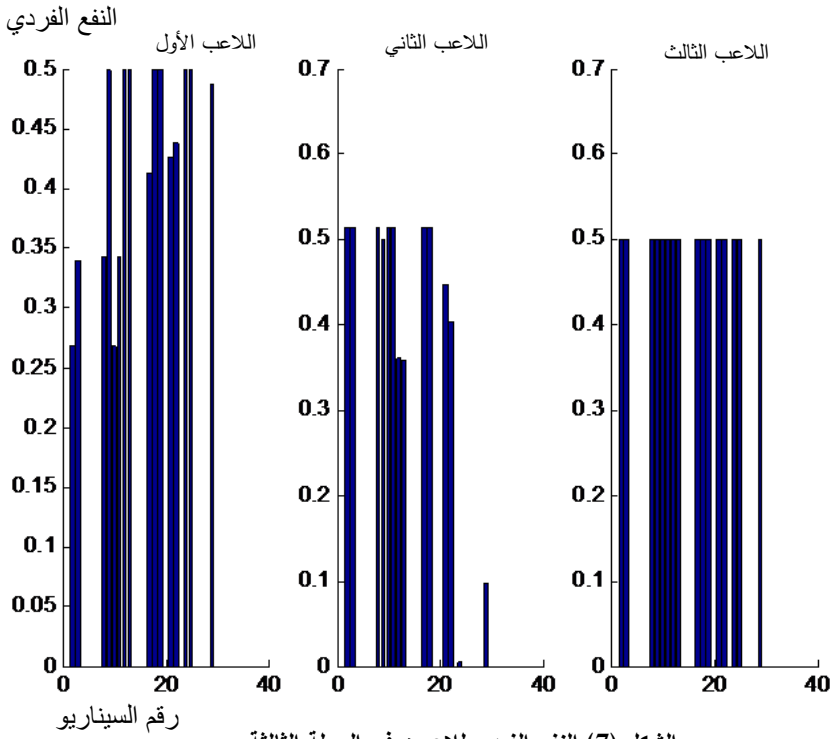


الشكل (5) قيم النفع العام للاعبين في الجولة الأولى بعد حذف الاستراتيجيات المسيطر عليها

يبين الشكل (6) تغيّر قيم النفع العام في الجولة الثالثة، كما يبين الشكل (7) قيم النفع الفردي للاعبين في الجولة الثالثة، حيث لا تقدم حسابات إضافية بعدها أيّ تحسن في النتيجة وبالتالي يتوقف البرنامج عن الحساب ويستقرّ البرنامج بعد ثلاث جولات ويختار التركيب المقابل للحل التالي: بناء خط نقل هوائي بين قضيبي التجميع 6 و 7 + ربط محطة توليد حرارية على قضيب التجميع 3.



الشكل (6) النفع العام للاعبين في الجولة الثالثة



الشكل (7) النفع الفردي للاعبين في الجولة الثالثة

حصلنا من خلال تطبيق نظرية اللعبة على نتيجة أمثلة يمكن تعريفها على أنها الحل التوفيقي الأمثل بين مجموعة أهداف مختلفة للمعايير المدخلة.

الاستنتاجات والتوصيات

قدمت هذه الدراسة طريقة جديدة في حل مسألة توسيع وتخطيط الشبكات الكهربائية في ظل ظروف تحرير سوق الطاقة الكهربائية، حيث أن التغيرات الهامة الطارئة على موضوع تخطيط الشبكات تفرض بشكل من الأشكال استخدام طريقة أمثلة متعددة المعايير. النتيجة التي حصلنا عليها هي حل أمثل توفيقي بين مجموعة معايير (وجهات نظر) وليس المعيار الاقتصادي وحده، وقد تكون هذه المعايير متضاربة بعضها مع البعض في الأهداف (يسعى لاعب الاقتصادية إلى زيادة ربحه بما يتضارب مع هدف لاعب الموثوقية في رفع موثوقية الشبكة، ويكون الهدف هو الحصول على النقطة التي تحقق الحلّ الأمثل التوفيقي بينهما)، أي أن الحلّ الأمثل الذي حصلنا عليه يخصّ عدّة وجهات نظر معاً، وهذا ما يميّز استخدام نظرية اللعبة عن غيرها من الطرق. وقد تمّ اعتماد معايير محددة في هذه الدراسة (الموثوقية، الاقتصادية، إمكانية التحقيق). يمكن توسيع الدراسة مستقبلاً بإضافة معايير أخرى مثل الانبعاثات الضارة، والجودة، ورغبات الزبائن الخاصّة، وغيرها. كما يمكن في دراسات قادمة أتمتة العمل بشكل كامل بحيث يتم ربط البرنامج الرئيسي مع برنامج حساب الموثوقية وبرنامج تحليل الشبكات.

المراجع:

1. FuzhanNasiri and GeorgesZaccour, "An exploratory game-theoretic analysis of biomass electricity generation supply chain". Energy Policy 37 (2009) 4514–4522.
2. A.J.C. Pereira, J.T. Saraiva, "A decision support system for generation expansion planning in competitive electricity Markets", Electr. Power Syst. Res. (2010), doi:10.1016/j.epsr.2009.12.003.
3. D Sung-Ling Chen, Tung-Sheng Zhan, Ming-Tong Tsay "Generation expansion planning of the utility with refined immune algorithm" Electric Power Systems Research 76 (2006) 251–258.
4. Theodore L. Turocy, Bernhard von Stengel, "Game Theory" CDAM Research Report LSE-CDAM-2001-09 October 8, 2001.
5. Noam Nisan,Tim Roughgorden, Eva Tordos, Vijay V. Vazirani, " Algorithmic Game Theory," first edition, Cambridge university press.2007.
6. Theodore L. Turocy "Game Theory" Texas A&M University Bernhard von Stengel London School of Economics CDAM Research Report LSE-CDAM-2001-09 October 8, 2001.
7. Steven Stoft, IEEE Press & WILEY-NTERSCIENCE "Power System Economics" 2002.
8. Salvatore Distefano, Antonio Puliafito "Dynamic Reliability Block Diagrams VS Dynamic Fault Trees" 0-7803-9766-5/07/ 2007 IEEE.