

## خوارزمية لتحسين التأمين المعلوماتي لنظم التحكم المؤتمتة في نظم القدرة الكهربائية

الدكتور هيثم دغرور\*

نبال يوسف\*\*

رزان الرحية\*\*\*

(تاريخ الإيداع 4 / 7 / 2012. قُبِلَ للنشر في 11 / 12 / 2012)

### □ ملخص □

بما أن نظم القدرة الحديثة يتم تشغيلها من خلال مراكز تحكم وتنسيق مركزية وفرعية مؤتمتة، فلا بد من طرق لمعرفة حالة النظام ومراقبته بشكل دائم بهدف التشغيل الاقتصادي والأمن. وأكثر الطرق استخداماً في الوقت الحالي هي طرق تقييم حالة النظام اعتماداً على قياسات تقاس في النظام، وترسلها تجهيزات خاصة عن بعد إلى مراكز التحكم ليصار إلى معالجتها، والخروج بصورة عن حالة النظام أقرب ما يمكن إلى الحقيقية. ولأسباب عدة قد تفشل عملية تقييم الحالة، أهمها عدم كفاية القياسات أو عدم توزيعها بالشكل المناسب في الشبكة. عندها نقول إن الشبكة غير مرئية. يقدم البحث حلاً لهذه المشكلة بتقديمه خوارزمية لتحديد فيما إذا كانت القياسات المتاحة كافية لنجاح عملية التقييم أم لا (مرئية أم لا)، وإذا لم تكن كافية فهي تحدد العقد الأمثل لإضافة قياسات كاذبة تمكن من نجاح تقييم الحالة (تجعل الشبكة مرئية). كتبت الخوارزمية بلغة MATLAB، وطبقت على شبكة IEEE قياسية من 14 عقدة. تبين أن الخوارزمية تتميز بالبساطة، وسهولة التطبيق، والسرعة في حل المشكلة. يعد هذا العمل مساهمة متواضعة في التأمين المعلوماتي لنظم التحكم المؤتمتة في نظم القدرة الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية:** تقييم الحالة ، تحليل رؤية الشبكة ، إمكانية الرؤية ، التأمين المعلوماتي لنظم القدرة الكهربائية.

\* مدرس - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - سورية.

\*\* قائم بالأعمال - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - سورية.

\*\*\* قائمة بالأعمال - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - سورية.

## An Algorithm for Improving the Information Ensuring of Automated Control Systems in Electrical Power Systems

Dr. Daghrou Haitham\*  
NebalYousef\*\*  
Razan Alrhaie\*\*\*

(Received 4 / 7 / 2012. Accepted 11 / 12 / 2012)

### □ ABSTRACT □

The most famous techniques for recognizing the state of modern electrical systems are the state estimation methods, which depend on telemeasurements from remote terminal units (RTUs) installed in some substations. These measurements may be insufficient for many reasons or wrongly distributed in the system and state estimators may fail. Then we say the system is unobservable. To avoid failing, it is very important to check the sufficiency and the reasonability of distribution of the measurements. This check is called "observability analysis". This paper presents an improved algorithm for observability checking and optimal selecting nodes to add pseudomeasurements in order to make the system observable. The Algorithm is written in MATLAB programming Language and tested on IEEE-14 buses network. Testes showed that the suggested algorithm is simple, fast and easy to apply..

**Keywords:** Observability Analysis ; State Estimation of EPS ; Optimal measurement placement.

---

\* Assistant Professor in electrical power department -Faculty of Mech. & Elect. Engineering, Tishreen university-Lattakia-Syria.

\*\* Academic Assistant in electrical power department -Faculty of Mech. & Elect. Engineering, Tishreen university-Lattakia-Syria.

\*\*\* Academic Assistant in electrical power department -Faculty of Mech. & Elect. Engineering, Tishreen university-Lattakia-Syria.

**مقدمة :**

يتم تشغيل نظم القدرة الحديثة والتحكم بها من خلال مراكز تحكم مركزية وإقليمية مؤتمتة (محوّسة) تُسمّى حديثاً "نظم إدارة الطاقة". الهدف الرئيسي لمشغلي النظام هو المحافظة على النظام في الحالة العادية الآمنة في الدرجة الأولى، ثم رفع اقتصادية التشغيل. وبما أن ظروف التشغيل تتغير بشكل دائم فإن تحقيق هدف مشغلي النظام يتطلب مراقبة مستمرة لظروف التشغيل، وتحديد هوية حالة التشغيل، وتحديد الإجراءات الوقائية الضرورية في حال وجد أن حالة النظام غير آمنة أو العمل على نقلها إلى حالة أمثل اقتصادياً [1].

تعني مراقبة ظروف التشغيل مراقبة حالة عمل النظام القائمة في الزمن الحقيقي؛ أي مراقبة توترات العقد، والسريانات في الخطوط، واستطاعات التوليد إلخ. ويتطلب تحقيق مراقبة الحالة تزويد نظام التحكم بنظام فعال لطلب المعطيات، والتحكم الإشرافي SCADA مهمته طلب معطيات (قياسات) متنوعة من كل أجزاء الشبكة، وتقديمها إلى البرمجيات التطبيقية في حواسيب مراكز التحكم (لمعالجتها وتحديد حالة عمل النظام، هل هي آمنة، أو حرجة، أو طارئة، أو عزل، وإصدار أوامر التحكم المناسبة)، ثم توزيع أوامر التحكم على حواكم صمامات البخار والماء في محطات التوليد، والقواطع، ومآخذ محولات التنظيم وغيرها بحسب عناوينها المحددة [1،2].

يمكن أن تكون القياسات تشابهية (مطالات توترات العقد، وسريانات استطاعة فعلية وردية، واستطاعات محقونة injected في العقد، وتيارات، وأخيراً أصبحت تقاس زوايا أطوار التوترات والتيارات بمساعدة منظومة التوضع العالمية GBS ) أو رقمية منطقية (وضعية قواطع الدارة وقواطع العزل "مفتوح/مغلق"، ووضعية مآخذ المحولات وينوك المكثفات...) [1،2].

تعالج القياسات الرقمية المنطقية في مراكز التحكم للحصول على تشكيلة الشبكة (لرسم مخطط الشبكة) بمساعدة برمجيات تسمى مشكّلات الشبكة Network Configurators؛ بينما تتم معالجة القياسات التشابهية بمساعدة برمجيات تسمى مقيّمات الحالة State Estimators، هدفها تقليل آثار الأخطاء المرافقة بالضرورة للقياسات إلى الحد الأدنى، والحصول على أفضل صورة ممكنة عن حالة عمل النظام في مراكز التحكم. وتسمى الحالة المقيّمة Estimated State [1،2،3].

يتم تقديم الحالة المقيّمة إلى كل تطبيقات نظام إدارة الطاقة الأخرى (تقدير الأمان، وتحليل الاستقرار في الحالة الثابتة، والتوزيع الاقتصادي، والتحكم الأوتوماتيكي بالتوليد، وتجنيد الوحدات، وإدارة الاختناق، والتنبؤ بالحمولات...)؛ لتفيد منها. نمطياً تشمل مقيّمات الحالة الوظائف الآتية:

1. معالجة الطوبولوجيا Topology Processing : هدفها صياغة تشكيلة الشبكة (مخططها) القائمة في الزمن الحقيقي نتيجة معالجة معطيات وضعية قواطع الدارة وقواطع العزل وغيرها.
2. تحليل رؤية الشبكة Observability Analysis : هدفه تحديد فيما إذا كان بالإمكان الحصول على حل لتقييم حالة كامل النظام باستخدام مجموعة القياسات المتاحة.
3. حل تقييم الحالة State Estimation Solution : تقييم الحالة هو عبارة عن تقنية رياضية من علم الإحصاء، هدفها حساب أفضل تقييم لحالة النظام؛ أي لكل متغيرات الحالة (طويلات توترات العقد وزوايا أطوارها) اعتماداً على تشكيلة الشبكة (موديلها)، والقياسات المجموعة من أجهزة القياس المتاحة في النظام التي تشمل بالضرورة على أخطاء ذات طبيعة عشوائية؛ وذلك بناءً على معيار ما معتمد.

4. معالجة المعطيات السيئة Bad Data Processor : مهمتها اكتشاف الأخطاء الكبيرة الموجودة في مجموع القياسات، وتحديد هويتها، وأبعادها، على شرط وجود فائض كافٍ في تشكيلة القياسات المتاحة.
5. معالجة أخطاء البنية والبارومتريات Parameter and Structure Processor : مهمتها تقييم مختلف أنواع بارومتريات عناصر الشبكة (خطوط النقل، والمحولات، والمفاعلات، والمكثفات التفرعية،...)، واكتشاف الأخطاء البنوية فيها، وتحديد الوضعية الخاطئة للقواطع؛ وذلك بشرط توافر فائض من القياسات الرقمية المنطقية [1،2،3].
- يمكن القول إن تقييم الحالة بكل وظائفها، يشكل نواة نظام إدارة الطاقة، حيث يعمل بوصفه مرشحاً بين القياسات الخام القادمة من النظام وكل تطبيقات نظام إدارة الطاقة، مساهماً بذلك في رفع موثوقية قاعدة معطيات نظام إدارة الطاقة. وبذلك يقدم هذا العمل مساهمة في التأمين المعلوماتي لنظم التحكم بنظم القدرة (نظم إدارة الطاقة) من خلال تقديم خوارزمية بسيطة لتوزيع القياسات، وتحليل رؤية الشبكة (رؤية حالة عمل النظام الجارية).

### أهمية البحث وأهدافه :

تأتي أهمية البحث من كون تحليل رؤية الشبكة يحدد فيما إذا كان بالإمكان إيجاد حل وحيد لتقييم الحالة اعتماداً على القياسات المتاحة. ويعد إجراء تحليل الرؤية ضرورياً على البارد off-line خلال الطور الأولي لتتصيب برنامج تقييم الحالة؛ وذلك لاختبار ملائمة تشكيلة القياسات الموجودة (القائمة)، فإذا وجد أن النظام غير مرئي عندها يمكن إضافة قياسات في أماكن محددة لجعله مرئياً. ويعد أيضاً إجراء تحليل الرؤية المباشر on-line ضرورياً قبيل تشغيل مقيم الحالة؛ للتأكد من إمكانية حل تقييم الحالة باستخدام القياسات التي حصلنا عليها في آخر مسح للقياسات [3].

إن أخطاء الاتصالات، والتغيرات الطوبولوجية، وأعطال أجهزة القياس يمكن أن تقود عرضياً إلى حالات لا يمكننا فيها تقييم حالة كامل النظام، عندئذ سيحتوي النظام عدة جزر مرئية معزولة، لكلٍ منها زاوية طور مرجعية خاصة بها ومستقلة عن الزوايا المرجعية في الجزر الأخرى. ويهدف البحث إلى تقديم خوارزمية لتحليل رؤية الشبكة رقمياً بهدف اكتشاف مثل هكذا حالات، وتحديد كل الجزر المرئية، ثم توزيع قياسات كاذبة تجعل النظام مرئياً قبيل تنفيذ تقييم الحالة.

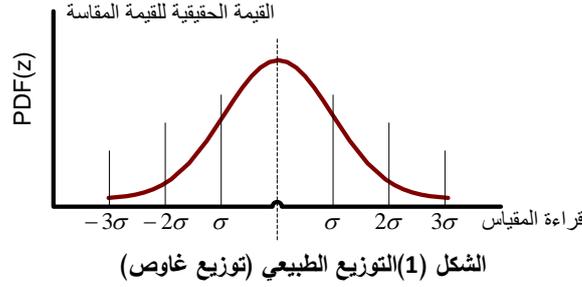
سنقدم في هذا البحث عرضاً موجزاً عن تقييم حالة نظم القدرة الكهربائية، ودور تحليل الرؤية فيه، ثم تقديم خوارزمية المناسبة [1،2،3].

### طرائق البحث ومواده :

#### 3-1 تقييم الحالة State Estimation

يأتينا الشيء الوحيد الذي نعرفه عن منظومة القدرة في مراكز التحكم من القياسات، وعلينا استخدام هذه القياسات لتقييم حالة عمل المنظومة. وتكون القياسات مشوبة دائماً بالأخطاء ؛ أي أن القيمة التي نحصل عليها من جهاز القياس تكون قريبة إلى القيمة الحقيقية للمتغير المقيس، ولكن تختلف عنها بقيمة عشوائية مجهولة، ويكلام آخر يعالج مقيم الحالة مجموعة من القياسات المشوبة بأخطاء ذات طبيعة عشوائية؛ وذلك لتقييم حالة نظام القدرة الكهربائية، وتشكل نتائج تقييم الحالة الأساس لكل وظائف تحليل الأمان المباشرة الموجودة في مركز التحكم.

يمكن تقديم موديل القياسات رياضياً كما يلي :  $z^{meas} = z^{true} + r$  ، حيث :  $z^{meas}$  قيمة القياس مثلما تلقيناه من جهاز القياس،  $z^{true}$  القيمة الحقيقية للكمية المقاسة، و  $r$  الخطأ العشوائي للقياس. يفترض أن تابع الكثافة الاحتمالي PDF لأخطاء القياسات العشوائية معروف، وأنه من النوع العادي (توزيع غاوص) [4]. يُعبر عن تابع الكثافة الاحتمالية لـ  $r$  كما يلي:  $PDF(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-r^2/2\sigma^2)$  ، حيث:  $PDF(r)$  تصف سلوك  $r$  و  $\sigma$  : الانحراف القياسي (المعياري) و  $\sigma^2$  : تباين الرقم العشوائي. انظر الشكل (1) .



تُبنى عملية تقييم الحالة على أساس معيار إحصائي يقيّم القيمة الحقيقية لمتغيرات الحالة بإنهاء المعيار المختار إلى قيمته الأصغرية أو الأعظمية. المعيار الأشهر والأكثر استخداماً هو معيار المربعات الأصغرية الموزونة (Weighted least-squares criterion-WLS) الذي ينهي تابع هدف ما (مجموع مربعات الفروق بين القيم الحقيقية  $z^{true}$ ، والقيم المقاسة  $z^{meas}$  مقسوماً على الانحراف المعياري  $\sigma^2$  لخطأ كل قياس إلى الحد الأصغري)، حيث يعبر  $\sigma^2$  عن الوزن الذي يدخل به خطأ القياس في تابع الهدف [1,2,3].

يُعبّر عن القيمة الحقيقية  $z^{true}$  في معيار WLS بوصفه تابعاً  $f(x)$  لمركبات شعاع الحالة  $x$  المجهولة، وبهذا  $z^{meas} = f(x) + r$  و  $z^{meas} - f(x) = r$ . والآن علينا البحث عن قيم مركبات شعاع الحالة  $x$  التي تحقق الحد الأصغري لمعيار WLS ؛ أي لتابع الهدف  $J(x)$  ونسميها  $x^{est}$  ؛ أي تؤول المسألة إلى الشكل:

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{[z_i^{meas} - f_i(x)]^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

(إذا كنا نقيم مجهولاً واحداً)

حيث:  $m$  عدد القياسات المستعملة، و  $z_i^{meas}$  القياس رقم  $i$ ، و  $f_i(x)$  التابع الذي يعبر عن القيمة المقاسة  $i$  بوصفه تابعاً لمجاهيل الحالة .

أما إذا كان لدينا  $n$  مجهول قيد التقييم و  $m$  قياس تصبح المعادلة (1) على الشكل الآتي :

$$\min_{(x_1, x_2, \dots, x_n)} J(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m \frac{[z_i^{meas} - f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)]^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

هنا:  $x^T = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, V_1, V_2, \dots, V_n)$  ؛ أي أن مركبات شعاع الحالة في نظام القدرة الكهربائي (متغيرات الحالة) هي مطالات وزوايا أطوار توترات كل العقد.

نميز بين تقييم الحالة اللاخطية وتقييم الحالة الخطية. نستخدم في الأول توابع لاخطية لربط القياسات بمتغيرات الحالة، ونستخدم في الثاني توابع خطية تقريبية مبسطة للربط؛ أي يستخدم الموديل الخطي لسريان الاستطاعة الفعلية في خط النقل، والذي يسمى موديل التيار المستمر DC للتيار متناوب (سيرد لاحقاً). وتشير الخبرة إلى أنه من الأنسب

استخدام المقيم الخطي عند دراسة توزيع القياسات، وتحليل الرؤية [3,2,1]؛ لذلك سنقدم إضاءة على تقييم الحالة الخطية.

نحصل على الموديل الخطي لسريان الاستطاعة الفعلية بافتراض أن كل مطالات توترات العقد مساوية لـ  $1p.u$ ؛ وبإهمال كل العناصر التفرعية، ومقاومات الفروع لخط النقل، وأخذ حد منشور تايلور من الدرجة الأولى للتابع اللاخطي الذي يصف  $P_{ij} = f(x)$ . بالنتيجة ينتج الموديل الخطي لسريان الاستطاعة على الشكل الآتي:

$$P_{ij} = (\theta_i - \theta_j)/x_{ij} \quad (3)$$

حيث:  $x_{ij}$  مفاعلة خط النقل الذي يربط قضيبي التجميع  $j$  و  $i$  و  $\theta_j$  و  $\theta_i$  هي زوايا أطوار توترات العقد  $j$  و  $i$  التوالي [4, 3, 2, 1].

إذا استخدمنا المقيم الخطي تكون القياسات مكونة من:

(1) سريانات الاستطاعة الفعلية في بعض خطوط النقل:

$$z_{flow} = P_{ij} = (\theta_i - \theta_j)/x_{ij} + r_{ij} \quad (4)$$

(2) حقونات الاستطاعة الفعلية في بعض قضبان التجميع:

$$z_{inject} = P_i = \sum_{j \in N_j} P_{ij} + r_i \quad (5)$$

أما المجاهيل (مركبات شعاع الحالة) فتكون زوايا أطوار قضبان التجميع  $\theta_i$ ,  $i=1,2,\dots,n-1$  فقط.

عندما تصبح زوايا الأطوار هذه معلومة نتمكن من حساب كل سريانات الاستطاعة، والأحمال، واستطاعات التوليد غير المقيسة (وتسمى قيماً مقبلة).

بالعودة إلى (2)، إذا كانت التتابع  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  تابعاً خطية يكون لهذه المعادلة صيغة حل مغلقة [8,7]. يمكن كتابة التابع  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  كما يلي:

$$f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = h_{i1} \cdot x_1 + h_{i2} \cdot x_2 + \dots + h_{in} \cdot x_n \quad (6)$$

عندئذ يمكن صياغة التتابع، والقياسات، والتباينات في أشعة ومصفوفات كما يلي:

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{bmatrix} = [H] \cdot x \quad \& \quad Z^{meas} = \begin{bmatrix} z_1^{meas} \\ z_2^{meas} \\ \vdots \\ z_m^{meas} \end{bmatrix} \quad \& \quad R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & \\ & \sigma_2^2 & \\ & & \ddots \\ & & & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

حيث:  $[H]$  مصفوفة جاكوبيان للتتابع الخطية التي تربط القياسات بمتغيرات الحالة ذات الأبعاد  $(m \times n)$ . وعناصرها هي مشتقات التتابع الخطية  $f_i(x)$  بالنسبة إلى متغيرات الحالة؛ أي العوامل  $h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{in}$ ، ويمكن صياغة موديل القياسات على شكل معادلة مصفوفية من الشكل:  $Z^{meas} = Hx + \mu$  شعاع أخطاء القياسات). وباستخدام هذه الصيغة في تابع الهدف (2) نحصل على العلاقة الآتية لحساب شعاع الحالة المقيم [1]:

$$x^{est} = [[H]^T [R^{-1}] [H]]^{-1} [H]^T [R^{-1}] z^{meas} \quad (8)$$

نسمي المصفوفة  $G = [[H]^T [R^{-1}] [H]]^{-1}$  مصفوفة الريح، و  $W = R^{-1}$  مصفوفة أوزان أخطاء القياسات [5,4]. بتعويضهما في (8) وبالاستغناء عن الأقواس تأخذ الشكل الآتي:

$$x^{est} = G^{-1} H^T W Z^{meas} \quad (9)$$

في هذه الحالة فإن مجموعة القياسات تشمل:

(1) قياسات الاستطاعة الفعلية المحقونة injected في بعض العقد.

(2) قياسات الاستطاعة الفعلية السارية في بعض الفروع.

(3) قياسات زوايا أطوار التوترات في بعض العقد.

أما القيم المقيمة في هذه الحالة فهي زوايا أطوار التوترات في كل العقد [1-11].

إذا استبدلنا في المعادلة (9)  $x^{est}$  بـ  $est$  ، حيث إن شعاع الحالة هنا مكون من زوايا أطوار التوترات فقط، يمكننا تقديم معادلة مقيم الحالة المستمر الخطي بالعلاقة الآتية :

$$G \cdot \theta^{est} = H^T \cdot W \cdot Z^{meas} (10)$$

يمكن تشكيل أسطر مصفوفة جاكوبيان  $H$  من عوامل توابع القياس كما يلي [2,3,5,6]:

1. في حالة قياسات الاستطاعة الفعلية المحقونة في العقد  $P_i$  :

$$h_{ij} = \begin{cases} \sum i & \text{if } i = j \\ 1 & \text{if } i \text{ connected with } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} (11)$$

2. في حالة قياسات الاستطاعة الفعلية السارية في الفروع  $P_{ij}$ :

$$h_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if measur from } i \text{ to } j \\ -1 & \text{if measur from } j \text{ to } i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} (12)$$

تجب الإشارة إلى أنه في تقييم الحالة إذا كان الفرع لا يحوي أي قياس لسريان الاستطاعة، ولا يوجد أي قياس للحقن injection عند إحدى نهايتيه فلن يظهر في المصفوفة  $H$ ؛ وبهذا لن يؤدي أي دور في تحليل الرؤية أو في تقييم الحالة؛ لذلك يمكن أن يُبعد وألا يؤخذ بالاعتبار لاحقاً [5].

يعتمد التوزيع الأمثل للقياسات في شبكة كهربائية على إيجاد العدد الأصغري من القياسات اللازمة والكافية من أجل حل مسألة تقييم الحالة؛ أي أن تقييم الحالة يكون ممكناً إذا كانت القياسات كافية من حيث العدد وموزعة جغرافياً بشكل جيد [5,6,7,8,9]. في حال لم يكن تقييم الحالة ممكناً؛ أي أن الشبكة غير مرئية يجب إضافة ما يسمى بقياسات كاذبة لتحويل هذه الشبكة إلى شبكة مرئية. والقياسات الكاذبة هي قيم يمكن حسابها أو افتراضها منطقياً، وإضافتها إلى مجموع القياسات دون أن تكون قد قيست فعلاً بواسطة أجهزة قياس موجودة في الشبكة [10].

## النتائج والمناقشة :

### 3-2 تحليل الرؤية :

أحد أهم الأسئلة في تقييم الحالة متعلق برؤية حالة النظام، وهو ببساطة كالاتي: إذا كان معطى لدينا مجموعة من القياسات فهل يمكننا تقييم حالة النظام من هذه القياسات؟ يكون مقيم الحالة قادراً على تقييم حالة النظام إذا كانت القياسات كافية من حيث العدد وموزعة جغرافياً بشكل جيد. ويصمم النظام عادةً ليكون مرئياً في معظم حالات العمل، ولكن يمكن حدوث خلل في نظام الرؤية ناتج من تغيير غير متوقع في طبولوجيا الشبكة أو فشل في نظام الاتصالات، عند هذه الحالة ستواجهنا الأسئلة الآتية:

1. هل توجد قياسات مباشرة كافية لجعل مقيم الحالة ممكناً (أي لجعل الشبكة مرئية) ؟

2. إذا كان الجواب لا، يجب تحديد أجزاء الشبكة التي لا تزال مرئية من خلال القياسات المتوافرة.

3. كيف نقيم حالة هذه الأجزاء المرئية ؟

4. كيف نحدد مكان إضافة قياسات كاذبة إضافية إلى مجموعة القياسات لجعل مقيم الحالة ممكناً ؟

5. كيف نضمن أن تلك القياسات الكاذبة لن تفسد نتائج مقيم الحالة؟

يدعى التحليل الذي يقود إلى الإجابة عن هذه الأسئلة بتحليل الرؤية. نقول إن الشبكة تكون مرئية إذا كانت القياسات كافية لجعل تقييم الحالة ممكناً؛ أي إمكانية إيجاد تقييم وحيد لحالة النظام [3,4,5,6].

وبكلام آخر، نتحدد رؤية شبكة ما (حالة نظام ما) بنوع القياسات المتاحة وأماكن توزعها، إضافة إلى طبولوجيا الشبكة، وبهذا فإن تحليل رؤية الشبكات يعتمد على نظرية الغراف في الشبكات الكهربائية، وعلى معادلات هذه الشبكات اللاخطية والخطية، وحل هذه المعادلات، فضلاً عن نظريات الرؤية المعروفة وطرق تحليلها.

تميز المراجع بين تحليل الرؤية الجبري (الرقمي) والطبولوجي (الغرافي) ولكل خواصه، وقد وجد التحليل الجبري قبولاً وانتشاراً أوسع وهو محل الاهتمام في بحثنا، أما التحليل الطبولوجي فهو خارج مجال هذا البحث. يعتمد تحليل الرؤية الرقمي على معادلة مقيم الحالة المستمر الخطي  $Z^{meas} = Hx + \mu$ ؛ لأن اعتماد النموذج اللاخطي يواجه بعض المشاكل، من أهمها عدم أحادية الحل [3,11].

ليكن لدينا نظام فيه  $m$  قياس بينما عدد المجاهيل (عناصر شعاع الحالة)  $n-1$  (حيث تستثنى الزاوية المرجعية)، ولكي تكون حالة النظام (الشبكة) مرئية من الضروري أن يكون عدد القياسات  $m$  أكبر من أو يساوي عدد مجاهيل الحالة  $n-1$ . وهذا الشرط ضروري (لازم) لكنه غير كافٍ؛ ذلك أن الشرط الكافي للحصول على حل وحيد لأجل  $x$  وفق أحد المعايير المعتمدة (المربعات الأصغرية الموزونة أو غيره) هو أن يكون ترتيب المصفوفة  $H$  مساوياً  $n$ . وهذا يعني أن شروط الضرورة والكفاية هي:  $rank(H) = n$  &  $m \geq n$  [5,6,12,13].

عموماً المصفوفة  $H$  ليست مربعة، والطريقة البسيطة حسابياً لتحديد رتبة هذه المصفوفة تعتمد على ملاحظة أن  $rank(H) = rank(H^T H)$ ، وأن المصفوفة  $H^T H$  مربعة؛ وبهذا يصبح الاختبار الجبري للرؤية مكافئاً لتحديد فيما إذا كان للمصفوفة  $H^T H$  رتبة كاملة full rank. ويمكن تحقيق ذلك بالتحليل المثلثي للمصفوفة  $H^T H$  إلى عواملها المثلثية  $L, U$  أو  $L, U, P$ ، حيث:  $L$  مصفوفة مثلثية سفلى، و  $U$  مصفوفة مثلثية عليا، و  $P$  مصفوفة واحدة؛ أي بتحليلها إلى جداء مصفوفتين مثلثتين عليا  $U$  ودنيا  $L$ :  $H^T H = LU$ ، وبملاحظة أن:

$$\det\{H^T H\} = \det\{L\}\det\{U\} = \prod_i l_{ii} \prod_i u_{ii} \quad (13)$$

حيث  $\Pi$  ترمز للجداء، بينما  $l$  و  $u$  تمثلان عناصر المصفوفتين العليا والدنيا على التوالي؛ وبهذا تكون المصفوفة  $H^T H$  برتبة كاملة إذاً، فقط إذا كانت كل العناصر القطرية للمصفوفتين  $L$  و  $U$  متميزة عن الصفر [2,5]. نحدد من خلال المصفوفة  $U$  فيما إذا كانت مجموعة القياسات الموجودة كافية لجعل الشبكة مرئية أم لا؛ وذلك من خلال القطر الرئيسي لهذه المصفوفة، فإذا كان القطر الرئيسي لا يحوي أصفاراً أو يحوي صفراً واحداً فقط في نهايته تكون الشبكة مرئية. أما في حال وجود أكثر من صفر واحد في القطر الرئيسي تكون الشبكة غير مرئية، ويجب إضافة قياسات جديدة [3,5,6,7].

انطلاقاً من أنه في تحليل الرؤية سنكون معنيين فقط بحقيقة ما إذا كان السريان معدوماً أو لا (صفر أو لا)، وليس بالقيمة الرقمية الفعلية عندما تكون متميزة عن الصفر، يمكن اعتبار قيم كل مفاعلات الخطوط مساوية  $x_{ij} = 1p.u$ ، وكل مطالات الجهد مساوية  $V_i = 1p.u$ ، وكل أوزان القياسات  $\sigma^{-2}$  متساوية وتساوي الواحد [6]. مع هذا الافتراض يمكن التعبير عن السريان في الخط  $k$  بالفرق الزاوي:  $P_{ij} = P_k = \theta_i - \theta_j$ ، وباستخدام مصفوفة

الورود (الارتباط) غير المختصرة  $A^T$  يمكن كتابته  $P = A^T \theta$ ، ومجموعة القياسات تأخذ الشكل  $Z^{meas} = H\theta$ ، وتأخذ مصفوفة الريح الشكل الآتي:  $G_\theta = H^T H$  [5-10].

من البديهي أن نصف الشبكة بأنها مرئية إذا كان بالإمكان رؤية أي سريان في الشبكة بدلالة مجموعة القياسات المتاحة. وانطلاقاً من النظريات المبرهنة في [5]، نخصص كل عناصر شعاع القياسات (القيم المقاسة فعلياً) بالقيمة 0 (صفر)، ونخصص القياسات الكاذبة المضافة بالقيم 0، 1، 2،... على التوالي؛ وذلك حسب عدد المحاور الصفرية الموجودة في المصفوفة المثلثية السفلى للتشكيل المثلثي لمصفوفة الريح. في هذه الحالة يمكن القول إنه عندما يوجد أي سريان متميز عن الصفر في الشبكة، يجب وجود قياس واحد على الأقل متميز عن الصفر. يكافئ هذا الكلام القول إن الشبكة تكون مرئية فقط في حال كانت كل القياسات مساوية للصفر  $H\hat{\theta} = 0$ ، وهذا يعني ضمناً أن كل السريانات تكون مساوية للصفر  $A^T \hat{\theta} = 0$ . وعندما تكون الشبكة غير مرئية فهذا يعني أنه من المحتمل أن تكون كل القياسات فيها صفرية، ومع ذلك لا تزال توجد سريانات غير صفرية في الشبكة  $A^T \hat{\theta} \neq 0$ ، وفي هذه الحالة نسمي الفروع ذات السريانات غير الصفرية فروعاً غير مرئية [5، 6، 13].

هذا التعريف سنصوغه على الشكل الآتي: يقال إن الشبكة تكون مرئية إذا تحقق لأجل كل زوايا أطوار التوترات المقيمة  $\hat{\theta}$  أن  $H\hat{\theta} = 0$  &  $A^T \hat{\theta} = 0$ ؛ أي أن شعاع الحالة المقيم  $\hat{\theta}$  الذي يتحقق لأجله  $H\hat{\theta} = 0$  و  $A^T \hat{\theta} \neq 0$  يسمى حالة غير مرئية  $\hat{\theta}$ . لتكن  $\hat{P} = A^T \hat{\theta}$  لأجل الحالة غير المرئية  $\hat{\theta}$  إذا كانت الاستطاعة الفعلية السارية في الفرع  $k$  المقيمة  $\hat{P}_k \neq 0$  عندئذ نصنف الفرع الموافق  $k$  فرعاً غير مرئي.

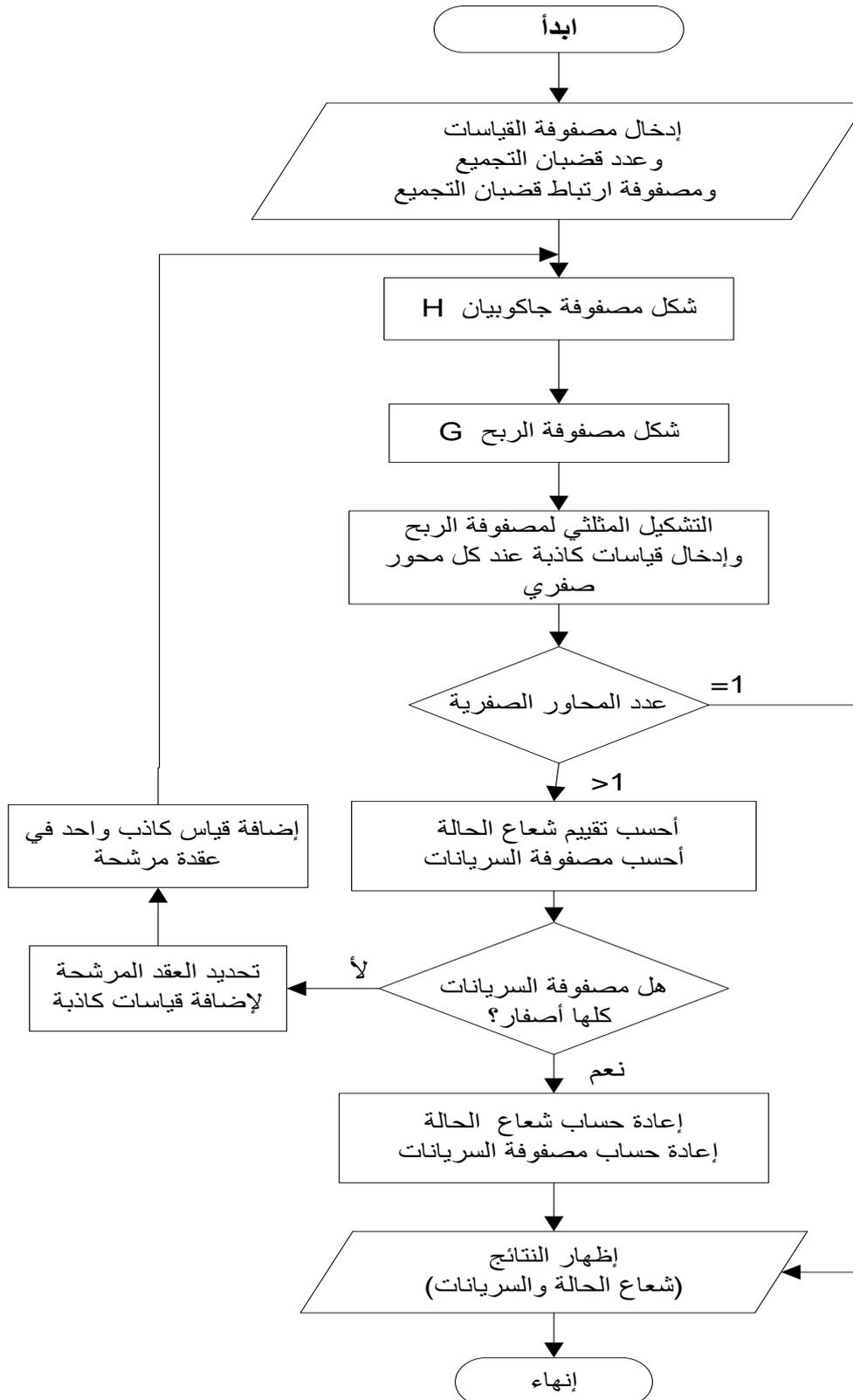
فيما يلي نقدم خوارزمية مبسطة لتحليل الرؤية، وتحديد العقد الأملل لإضافة قياسات كاذبة، والخوارزمية مبنية على النتائج المشتقة من نظرية رؤية الشبكات المطورة والمبرهنة في [1]، ثم قمنا في [13] بكتابة برنامج لتنفيذ الخوارزمية على الحاسوب بلغة MATLAB، وتطبيقه على شبكة IEEE-14 buses في شروط مختلفة.

#### 4 - خوارزمية تحليل الرؤية وتحديد أماكن القياسات الكاذبة:

تتكون الخوارزمية من الخطوات الآتية:

1. ندخل مجموعة القياسات المتاحة (نخصصها كلها بالقيمة صفر).
2. نحُدِّث شبكة القدرة الكهربائية بإزالة كل الفروع التي لا تحوي على قياس لسريان الاستطاعة خلالها أو على قياس واحد للحقن عند إحدى نهايتيها.
3. نشكل مصفوفة جاكوبيان  $H$  وفق المعادلات (11) و(12).
4. نشكل مصفوفة الريح  $G_\theta = H^T H$ .
5. ننجز التشكيل المثلثي لمصفوفة الريح  $G_\theta$ ، فإذا وجد عنصر صفري واحد فقط في نهاية القطر الرئيسي تكون الشبكة مرئية وعندها نتوقف عن الحل، وإلا نتابع خطوات الحل الآتية.
6. نحل معادلة مقيم الحالة المستمر الخطية  $Z^{meas} = H^T \cdot W \cdot G \cdot \hat{\theta}$  بالنسبة إلى  $\hat{\theta}$ ؛ وذلك بعد استبدال العناصر الصفرية في القطر الرئيسي للمصفوفة  $U$  بالقيم 1، وإدخال قياسات كاذبة مقابلة لهذه العناصر تُعطي القيم التالية 0، 1، 2... حسب عدد العناصر الصفرية.
7. نحسب سريانات الاستطاعة المقيمة في الفروع من العلاقة  $\hat{P}_{ij} = (\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j)$ . وفي حال كانت كل سريانات الاستطاعة المقيمة معدومة تكون الشبكة مرئية وعندها نتوقف عن الحل، وإلا نتابع خطوات الحل الآتية.

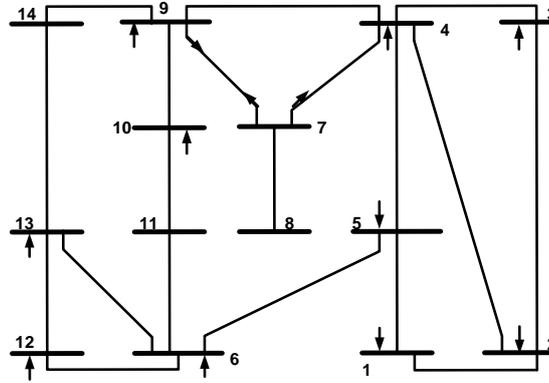
8. نحدد مجموعة العقد (التي لا تحوي قياسات حقن والفروع المرتبطة بها التي تملك سريان استطاعة واحد على الأقل غير صفري)؛ لترشيحها من أجل إضافة قياسات حقن كاذبة.
9. ندخل قياس حقن كاذب عند عقدة واحدة من العقد المرشحة، ونعيد حساب العوامل المثبتة لمصفوفة الربح، ونعود إلى الخطوة رقم 5، ونكرر الحل حتى تصبح كامل الشبكة مرئية. المخطط الصندوقي في الشكل (3).



الشكل (3) المخطط الصندوقي لخوارزمية تحليل الرؤية وتوزيع القياسات

## 5. التطبيق العملي للبرنامج :

1.5 التطبيق الأول: إذا فرضنا أن تشكيلة القياسات في الشبكة المدروسة IEEE-14 buses القياسية هي كما في الشكل(2):



الشكل(2) توزيع مفترض للقياسات في شبكة IEEE\_14 buses القياسية يشير إلى مكان القياس

دخل البرنامج: عدد العقد  $n$ ، ومصفوفة تشكيلة القياسات المفترضة  $p_m$ ، ومصفوفة ارتباط الشبكة  $x$ .

$$p_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 5 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

الخرج :  $teta = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$

$$\hat{p} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

بما أن كل سرينات الاستطاعة (عناصر  $\hat{p}$ )، وكل زوايا الطور (عناصر  $\theta$ ) أصفار، نستنتج أن تشكيلة القياسات المفترضة تجعل الشبكة مرئية.

## 2.5 التطبيق الثاني:

إذا حذفنا قياس الاستطاعة في العقدة رقم 5، نحصل على تشكيلة قياسات أخرى ممثلة بالمصفوفة  $pm$ ،

وتصبح الشبكة ممثلة بمصفوفة الارتباط  $n=14 \times x$

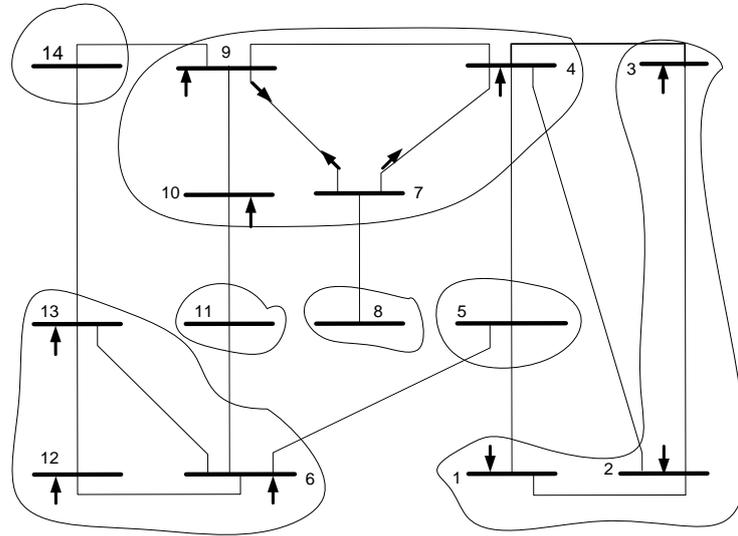
$$pm = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 5 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

الخرج:

$$teta = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6]$$

بالنظر إلى عناصر  $teta$  نجد أنها مكونة من سبع مجموعات متمايضة 0 و 1 و 2 و 3 و 4 و 5 و 6 . هذا يعني أن الشبكة مقسمة إلى سبع جزر مرئية تربط بينها فروع غير مرئية. انظر الشكل (3).



الشكل (3) حالة النظام في حال فقدان القياس في العقدة رقم 5 (سبع جزر معزولة)

هنا يقوم البرنامج بتحديد العقد المرشحة لإضافة قياسات كاذبة واحد بعد آخر حتى تصبح الشبكة شبه مرئية؛ وذلك تجنباً لفشل تقييم الحالة، ومع إضافة أول قياس كاذب ستتغير بالتأكيد تشكيلة القياسات  $p_m$ ، وتتغير النتائج كما يلي:

$$pm = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$pc = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 14]$$

$$teta = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

تشير  $pm$  إلى تشكيلة القياسات عند إضافة أول قياس كاذب، وتشير عناصر  $pc$  و  $p$  إلى أنه بإضافة قياس كاذب في العقدة رقم 14 تتحول كامل الشبكة إلى شبكة مرئية. ونلاحظ بحذف قياس من العقدة 5، وإضافة قياس كاذب إلى العقدة 14 أن الشبكة تبقى مرئية؛ أي أن تشكيلة القياسات التي تجعل الشبكة مرئية ليست وحيدة.

### الاستنتاجات والتوصيات:

1. تتميز الخوارزمية بالبساطة المتناهية، والسرعة، والموثوقية، والاستقرار الحسابي.
2. يمكن استخدام الخوارزمية بوصفها برنامجاً فرعياً ضمن خوارزمية تقييم الحالة.
3. تتطلب فقط التحليل المثلثي لمصفوفة الريح لمقيم الحالة الخطي عندما يكون النظام مرئياً.

4. يحدد العقد الأمثل الذي يجب إضافة قياسات كاذبة فيه لجعل الشبكة غير المرئية مرئية.
5. يعوض استخدام هذه الخوارزمية عن استخدام خوارزمتين منفصلتين لتحليل الرؤية وتوزيع القياسات.
6. يمكن استخدام البرنامج بسهولة لأي عدد من العقد، ولأي مستوى من التوتر.
7. يمكن تطوير البرنامج لاعتماده في مراكز التحكم والتنسيق المؤتمتة، حيث إنه يحدد إمكانية تقييم الحالة اعتماداً على القياسات المتاحة، واقتراح إضافة قياسات كاذبة في العقد الأمثل لجعل تقييم الحالة ممكناً في حال لم يكن ممكناً.
8. يوصى بمتابعة البحث لإيجاد طريقة مناسبة لتقييم حالة الجزر المرئية.
9. يوصى بمتابعة البحث لإيجاد طريقة مناسبة لتقييم حالة نظم القدرة المترابطة.

### المراجع :

- [1] WOOD, A. J. ; WOLLENBERG, B. F. *Power Generation Operation and Control*. John Wiley & Sons, Inc. sec.ed.1996. 444.
- [2] SAKIS MELIOPOULOS, A.P. *Power System Modeling, Analysis and Control*. Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2006, 27 July 2010. Available on: <http://Comcast.net/~energia/>
- [3] ABUR, A. ; EXPOSITO, A. G. *Power System State Estimation Theory and Implementation*, USA, New York, 2004, 305p. Available at [www.dekker.com](http://www.dekker.com)
- [4] CLEMENTS, K.A. KRUMPHOLZ, G.R. ; DAVIS, P.W. *Power System State Estimation with Measurements Deficiency: An Observability / Measurements Placements Algorithm*, IEEE Trans. Apparatus and Systems, Vol .PAS-102, No. 7, July, 1983, 2012-2020.
- [5] MONTICELLI, A. ; WU, F. F. *Network Observability: Theory*. IEEE Trans. Apparatus and systems, Vol.PAS-104, no.5, May 1985. 1042-1048.
- [6] MONTICELLI, A. ; WU, F. F. *Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurements Placement*, IEEE Trans. Apparatus and systems ,Vol.PAS-104, no.5, May 1985, 1035-1041.
- [7] BEI, G. ; ABOUR, A. *Improved Measurement Placement Algorithm for Network Observability*, IEEE Trans. Apparatus and systems ,Vol.PAS-16, No.4, November 2001, 819-824.
- [8] KI-SEON, C. ; JOONG-RIN, S. SEUNG, H.H. *Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver*. In Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, 2001, pp.258–262.
- [9] ABUR, A.; GARNG, H. M. *Power System State Estimation and Optimal Measurement Placement for Distributed Multi-Utility Operation*, Texas A&M University, Power Systems Engineering Research Center, November 2002. Available at <http://www.pserc.wisc.edu>.
- [10] CHRIS, D. J. *An Observability Formulation for Nonlinear Power Systems Modeled a Differential Algebraic System*, A thesis Submitted to the Faculty of Drewxel University, in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor Philosophy, February 2005, 155.
- [11] RAKPENTHAI, C. ; PREMRUDE, S. ; UATRONGJIT, S. ; WATSON, N.R. *Measurement placement for power system state estimation using decomposition technique*, Electric Power Systems Research, vol.75, 2005, 41–49. Available online since 7 April 2005 at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

- [12] WU, Y. ; KOSTIC, T. ; KEZUNOVIC, M. *The Dynamic Utilization of Substation Measurements to Maintain Power System Observability*, PSCE 2006 , *IEEE*, pp. 1966-1704.
- [13] PRUNEDA, R.E. ; SOLARES, C. ; CONEJO, A.J. ; CASTILLO, E. *An efficient algebraic approach to observability analysis in state estimation*, [Electric Power Systems Research](#), [Volume 80, Issue 3](#), March 2010, 277–286.