

## خوارزمية لتعويض القياسات المفقودة في نظم التحكم والتنسيق المؤتمتة الخاصة بنظم القدرة الكهربائية

نبال يوسف\*

(تاريخ الإيداع 19 / 7 / 2018. قَبْلَ للنشر في 17 / 9 / 2018)

### □ ملخّص □

يهدف هذا البحث إلى تحقيق الرؤية لأي شبكة كهربائية عن طريق تعويض القياسات المفقودة نتيجة حدوث خلل ما، مما يتيح إمكانية تقييم حالة الشبكة الكهربائية، أي الحصول على حل وحيد لتقييم الحالة، وذلك عن طريق تحليل رؤية الشبكة باستخدام مجموعة القياسات المتاحة، وإضافة قياسات افتراضية كاذبة في حال كانت الشبكة غير مرئية. ويتم إجراء ذلك باستخدام خوارزمية عددية تكرارية تضمن الحصول على العدد الأصغري والأمثل من القياسات الحدية الكاذبة المضافة بحيث لا تؤثر سلباً على نتائج تقييم الحالة. تعتمد الخوارزمية على حل معادلة مقيم الحالة الخطي وعلى التحليل إلى العوامل المتثلثة لمصفوفة الريح وعلى طريقة سهلة لترتيب محور مصفوفة جاكوبيان أي مصفوفة القياسات لضمان الحصول على المجموعة الأصغر من القياسات الكاذبة المرشحة لتكون قياسات مضافة. تم تنفيذ الخوارزمية العددية التكرارية في بيئة MATLAB وتم اختبار تأثير نتائج خوارزمية تحليل الرؤية وإضافة القياسات الكاذبة على تقييم الحالة. وقد اختبرت نتائج البرنامج على شبكة IEEE القياسية المكونة من 14 عقدة، وأظهرت النتائج أنه في حال فقد عدد من القياسات سيتم تعويضها بقياسات كاذبة حدية، كما أظهرت نتائج تقييم الحالة قيماً صغيرة لنسبة الخطأ بين القيم المقيمة باستخدام القياسات الحقيقية وبين القيم المقيمة بعد إضافة القياسات الكاذبة الحدية.

**الكلمات المفتاحية:** تقييم الحالة، رؤية الشبكة الكهربائية، القياسات الكاذبة

\* قائم بالأعمال، قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، طرطوس، سورية

## An Algorithm for Compensation Lost Measurements in Automated Control Systems in Power Electrical Systems

Nibal Yousef \*

(Received 19 / 7 / 2018. Accepted 17 / 9 / 2018)

### □ ABSTRACT □

This research aims to achieve the observability of any electrical network by the possibility compensation the lost measurements due to a defect, allowing the possibility of state estimation of the electrical network ,ie, obtaining a single solution for a state estimation. This is done by means of the network observability analysing using the available set of measurements and adding virtual pseudo-measurements if the network is not observable. this is done using a numerical algorithm that ensures obtaining the minimum and optimal number of added critical pseudo-measurements so that the result of state estimation was not adversely affected. The algorithm depends on solving the equation of the linear state estimation and the analysing to the triangular factors of the gain matrix and an easy way to arrange the axis of the jacobian matrix ,ie, the measurements matrix to ensure getting the minimum set of candidate pseudo- measurements to be added to real measurements, the numerical algorithm was acheived by environment in the MATLAB and tested to present the results on the network observabilty analysing and adding the pseudo-measurements algorithm on state estimation .The results of the program were tested on IEEE-14 network, and they showed that if a number of measurements were lost, they would be compensated by critical and pseudo-measurements. The results of state estimation showed small error ratio between estimated values using the real measurements and the estimated values after added the critical pseudo-measurements.

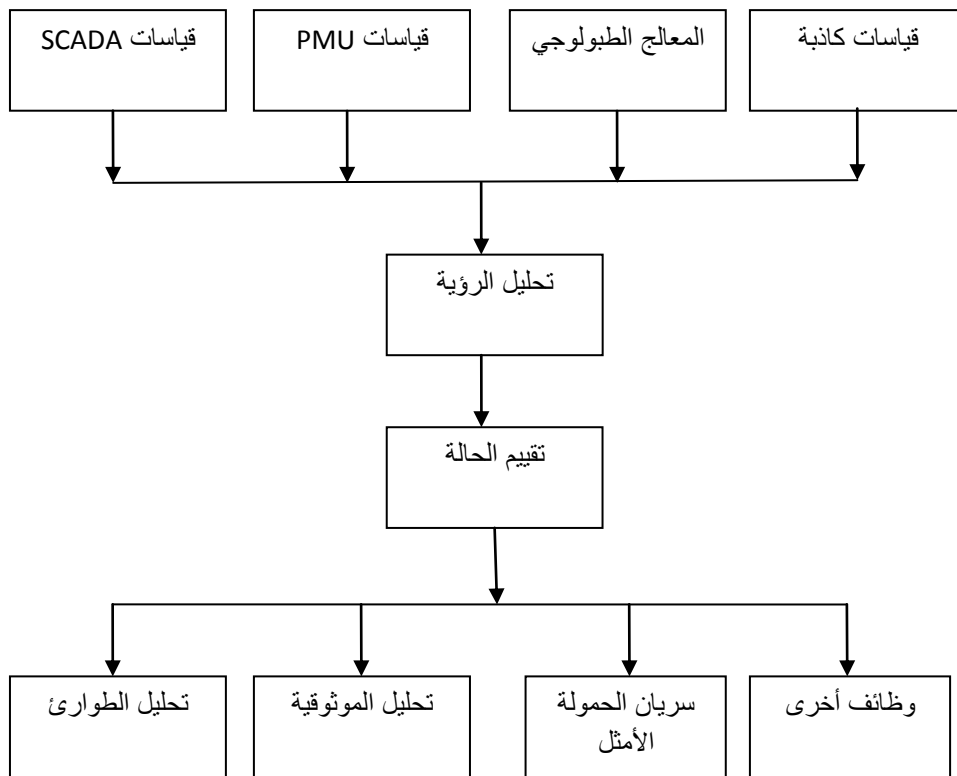
**Keywords:** state estimation, network observability, pseudo-measurements

---

\* Academic Assistant, Department of Renewable Energy Technologies, Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria.

## مقدمة:

يعد مقيم الحالة (state estimator) المفتاح الرئيسي لبرامج إدارة الطاقة Energy Management Systems (EMS) في مراكز التحكم والتنسيق المؤتمتة [11,1]. التي تهدف إلى تحسين توزيع ونوعية وموثوقية الطاقة، إذ أنه يزود مركز التحكم ووظائف النظام الأخرى بمعطيات الزمن الحقيقي، وحتى يتمكن مقيم الحالة من أداء وظائفه يجب أن تكون القياسات الموجودة في الشبكة الكهربائية كافية من حيث العدد وموزعة جغرافياً بشكل جيد [3,2]. تسمى العملية المسؤولة عن تحديد حالة القياسات وكفائتها بتحليل رؤية الشبكة الكهربائية (network observability analysing) [2]. و يبين المخطط الموضح في الشكل (1) العلاقة التي تربط تقييم الحالة مع تحليل رؤية الشبكة الكهربائية و مع وظائف إدارة الطاقة بالإضافة إلى القياسات اللازمة لتحليل رؤية الشبكة الكهربائية وهي عبارة عن: القياسات التقليدية التي نحصل عليها من نظام التحكم الرقابي وتحصيل البيانات (SCADA) phasor measurements unit، وحدات قياس الطور، Supervisory Control And Data Acquisition، قياسات كاذبة pseudo-measurement وقياسات المعالج الطبولوجي لتشكيل مخطط الشبكة.



الشكل (1) علاقة تقييم الحالة مع تحليل رؤية الشبكة الكهربائية و مع وظائف إدارة الطاقة

يصمم نظام الطاقة الكهربائية عادةً ليكون مرئياً في معظم حالات العمل ولكن يمكن أن يحدث خلل في نظام الرؤية ناتج عن تغير غير متوقع في طوبولوجيا الشبكة أو فشل غير متوقع في نظام الاتصالات. وعندها يمكن تقسيم الشبكة إلى أجزاء مرئية تسمى جزراً مرئية (observable island) وتقييم حالة كل جزيرة على حدى [3]. أو نضيف قيمياً محسوبة مسبقاً للقياسات تسمى قياسات كاذبة (pseudo-measurements)، في أماكن محددة من الشبكة الكهربائية غير المرئية لإعادة الرؤية إلى كامل الشبكة الكهربائية [4,3].

تم الاطلاع على العديد من الدراسات السابقة التي تطرقت لحل مشكلة إضافة القياسات الكاذبة أو الافتراضية لإعادة الرؤية إلى الشبكة الكهربائية غير المرئية. اعتمدت أغلب الطرق على البرمجة العددية وعلى مصفوفة الريح للحصول على العدد الكافي من القياسات المضافة واعتمدت على التكرار بحيث يضاف قياس كاذب واحد في كل تكرار [5-9]. نقدم في هذا البحث خوارزمية عددية تكرارية للحصول على العدد الأصغري والأمثل من القياسات الكاذبة المضافة اعتماداً على ترتيب محور مصفوفة جاكوبيان لضمان الحصول على العدد الأصغري والأمثل من القياسات الكاذبة المضافة غير الفائضة بحيث لا تؤثر سلباً على نتائج تقييم الحالة. يتم تنفيذ الخوارزمية التكرارية عن طريق تصميم برنامج في بيئة MATLAB واختبار أثر إضافة القياسات الكاذبة الناتجة على نتائج تقييم الحالة أيضاً عن طريق برنامج صمم في بيئة MATLAB .

### أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في تعريفه بأنواع القياسات الموجودة في الشبكة الكهربائية واقتراح طريقة لتعويض القياسات المفقودة من خلال اختيار العدد الأصغري والأمثل من القياسات الكاذبة المضافة اعتماداً على ترتيب محور مصفوفة جاكوبي القياسات كي لا تؤثر سلباً على نتائج تقييم الحالة. كما يبين البحث أهمية استخدام MATLAB في تصميم برامج تساهم في حل مسألة رؤية الشبكة الكهربائية وتقييم حالتها وتعويض القياسات المفقودة. كما يمكن تطبيق البرامج المصممة بسهولة في مراكز التحكم بالإضافة إلى إمكانية تطبيقها على أي شبكة كهربائية مهما بلغ عدد عقد هذه الشبكة.

### طرائق البحث ومواده

لقد أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسة العديد من البحوث المنجزة في هذا المجال والتوقف عند نتائجها وتوصياتها. كما تم الاعتماد على الحزمة البرمجية MATLAB لكتابة برامج واستخلاص النتائج.

### 1- تقييم حالة منظومة القدرة الكهربائية:

تقييم حالة منظومة القدرة الكهربائية هو عملية تحديد متغيرات الحالة لمنظومة القدرة الكهربائية والتي هي عبارة عن مطالات الجهد وزوايا الطور عند كل قضبان تجميع الشبكة اعتماداً على قياسات من تلك المنظومة وفقاً لطريقة إحصائية معينة [11]. وقد يتم تقييم الحالة اعتماداً على مقيم المربعات الأصغرية الموزونة weighted least-square (WLS) [10] وهي الطريقة المعتمدة في هذا البحث. أو يتم تقييم الحالة اعتماداً على مقيم القيمة المطلقة الصغرى least absolute value (LAV) [10].

تعطى المعادلة الخطية لمقيم الحالة المستمر وفقاً لمعيار المربعات الأصغرية الموزونة بالمعادلة (1).

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

حيث :

$x^{est}$  : شعاع متغيرات الحالة المقيمة .

[H] : مصفوفة عوامل توابع القياس .

[R] : مصفوفة التأثير المتبادل بين القياسات .

$z^{meas}$  : الشعاع الذي يحوي القيم المقاسة ذاتها .

تعرف مصفوفة الريح G بالعلاقة (2):

$$G = [H]^T [R]^{-1} [H] \quad (2)$$

وتعطي المعادلة اللاخطية لمقيم الحالة وفقاً لمعيار المربعات الأضغرية الموزونة بالعلاقة (3).

$$X^{est} = [H]^T [R]^{-1} [H]^{-1} [H]^T [R]^{-1} [z^{meas} - Z(X^k)] \quad (3)$$

حل معادلة مقيم الحالة بعد الحصول على القياسات من الشبكة سيعطي القيم المقيمة أي سيعطي قيم مطالات الجهد وزوايا الطور عند كل قضبان تجميع الشبكة.

### القياسات في شبكة القدرة الكهربائية:

تحتوي مجموعة القياسات الموجودة في الشبكة الكهربائية على القياسات التالية:

- 1- قياسات منطقية: تتضمن حالة قواطع الدارة وقواطع العزل والتبديل وترسل هذه النوعية من القياسات إلى المعالج الطبولوجي لتساعد بالإضافة إلى بارمترات الخطوط ووضعيات مآخذ المحولات في تشكيل مخطط الشبكة [4]
- 2- قياسات تشابهية: تضم في الشبكات التقليدية، قياسات مطالات الجهود عند قضبان تجميع الشبكة، قياسات الاستطاعة الفعلية والرديية المحقونة في العقد، قياسات الاستطاعة الفعلية والرديية السارية في الخطوط [4]، يضاف إليها في الشبكات الذكية أو عند توفر وحدات قياس طورية (PMU)، قياس زوايا أطوار الجهود عند العقد وقد تضاف قياسات زوايا أطوار التيار في الخطوط وذلك حسب عدد قنوات وحدات PMU المركبة [10].
- 3- قياسات كاذبة: تؤخذ من تقييم الحالة الأسبق [4] أو من قيم التنبؤ بالحمولة أو التنبؤ بالاستطاعة المولدة أو من السجلات [10].

يستخدم مقيم الحالة مجموعة القياسات التشابهية على التوازي مع استخدام مخطط النظام الناتج عن المعالج الطبولوجي بالإضافة إلى القياسات الكاذبة عند عدم كفاية القياسات وذلك لتقييم حالة الشبكة الكهربائية [10]. مع الأخذ بالاعتبار ضرورة مزامنة القياسات إذا احتوت الشبكة على نوعي القياسات أي القياسات التقليدية المعروفة بقياسات SCADA بالإضافة إلى وحدات قياس الطور PMU. إذ يتم تحديث قياسات PMU حوالي 30 مرة في الثانية الواحدة أما القياسات التقليدية فيتم تحديثها كل ثانيتين أو كل 6 ثواني [10].

### تحليل رؤية الشبكة الكهربائية:

تحليل رؤية الشبكة الكهربائية هو تحديد إمكانية الحصول على حل وحيد لمقيم الحالة من مجموعة القياسات المتاحة [6]. ويعتمد تحليل الرؤية على إمكانية حساب سريانات الاستطاعة في جميع أفرع الشبكة المدروسة. وبما أن سريانات الاستطاعة الفعلية والرديية تكون مترافقة، لذلك يمكن الاعتماد على نوع واحد من سريان الاستطاعة إما الفعلية أو الرديية [3] وعادةً يتم الاعتماد في تحليل الرؤية على نموذج الاستطاعة الفعلية [10]. يتعامل تحليل رؤية الشبكة الكهربائية مع فكرة إمكانية تحديد وجود استطاعة سارية وليس مع القيمة العددية للاستطاعة السارية أي أننا نعتمد في تحليل الرؤية على القيم المنطقية 0,1. يعطى سريان الاستطاعة الفعلية بين قضيبي تجميع m و k بالعلاقة (4):

$$P_{mk} = 1/(\theta_m - \theta_k) \quad (4)$$

حيث:  $\theta_k, \theta_m$  زاويتي طور الجهد عند قضيبي التجميع  $m$  و  $k$  على التوالي

بما أن رؤية الشبكة الكهربائية تعتمد على قياسات الاستطاعة الفعلية وقياس زاوية الطور، إذ أنها مستقلة عن قيم بارمترات الخط وعن حالة عمل النظام [10]، أي أنه يمكن أن نفرض أن كل أفرع النظام تملك ممانعة واحدة أي  $x=1p.u$  وكل جهود قضبان التجميع تساوي الواحد أي  $v=1p.u$  وذلك عند تحليل الرؤية فقط [10]، بالتالي تصبح المعادلة رقم (4) كما هو موضح في المعادلة (5):

$$P_{mk} = \theta_m - \theta_k \quad (5)$$

يكتب سريان الاستطاعة بدلالة مصفوفة الارتباط  $A$  بالعلاقة (6):

$$P_{mk} = A' . \theta = [1 \quad -1] \theta \quad (6)$$

كما يكتب شعاع الحالة  $\theta$  بدلالة مجموعة القياسات بالمعادلة (7):

$$\theta = H . \theta \quad (7)$$

حيث  $H$  هي مصفوفة جاكوبيان القياسات أي مصفوفة المشتقات الجزئية لتتابع القياس.

تكون الشبكة مرئية إذا كان بالإمكان رؤية كل سريانات الاستطاعة في الشبكة الكهربائية من خلال مجموعة القياسات المتاحة [5]. أي عند وجود سريان استطاعة واحد لا يساوي الصفر يتوجب وجود قياس واحد على الأقل لا يساوي الصفر. ويمكن مكافئة هذا القول كالتالي: تكون الشبكة مرئية إذا كانت كل القياسات تساوي الصفر فإن كل سريانات الاستطاعة تساوي الصفر. أي تكون الشبكة مرئية إذا تحقق الشرط التالي:

$$H . \theta = 0 \Rightarrow A' . \theta = 0 \quad (8)$$

### أنواع القياسات اللازمة لتشكيل مصفوفة جاكوبيان:

بما أننا سنعتمد في تحليل الرؤية على نموذج القياسات الفعلية لذلك فإن القياسات اللازمة لتشكيل مصفوفة الجاكوبيان هي القياسات الفعلية فقط وهي:

1- قياس الاستطاعة الفعلية السارية في الخط: يعطى القياس رقم  $i$  للاستطاعة الفعلية السارية من قضيبي التجميع  $k$  إلى قضيبي التجميع  $m$  بالعلاقة (10):

$$meas_i = [h_i \quad -h_i] . \theta \quad (10)$$

2- قياس الاستطاعة الفعلية المحقونة في العقدة: يعطى القياس رقم  $i$  للاستطاعة الفعلية المحقونة عند قضيبي التجميع  $k$  الموصول عبر عدة أفرع مع قضبان التجميع  $l, m, n$  بالعلاقة (11):

$$meas_i = [-h_l \sum h \quad -h_m \quad -h_n] . \theta \quad (11)$$

$$\sum h = h_m + h_l + h_n$$

3- قياس زاوية الطور: يعطى القياس رقم  $i$  لزاوية طور الجهد عند قضيبي التجميع  $i$  بالعلاقة (12):

$$meas_i = 1 . \theta \quad (12)$$

وفي حال كانت وحدة قياس الطور pmu تملك قنوات إضافية لقياس أطوار التيار في الخطوط الموصولة مع قضيبي التجميع  $k$ ، فإن القياس رقم  $i$  لزاوية طور الجهد ولزاوية طور التيار في الأفرع  $l, m, n$  الموصولة مع  $k$  تعطى بالعلاقة (13):

$$meas_i = [1 \ 1 \ 1 \ 1] \cdot \theta \quad (13)$$

وبالتالي يمكن تشكيل أسطر المصفوف  $H$  وفقاً لنوع القياس الموجود:

1- قياسات الاستطاعة الفعلية المحقونة في العقدة:

$$H_{ij} = \begin{cases} \sum X_i & \text{if } i = j \\ 1 & \text{موصول مع } j \\ 0 & \text{غير ذلك} \end{cases} \quad (14)$$

2- قياسات الاستطاعة الفعلية السارية في الخط:

$$H_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{القياس من } i \text{ إلى } j \\ -1 & \text{القياس من } j \text{ إلى } i \\ 0 & \text{غير ذلك} \end{cases} \quad (15)$$

3- قياس زاوية طور الجهد في العقدة :

$$H_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{إذا وجد قياس في العقدة } i \\ 0 & \text{غير ذلك} \end{cases} \quad (16)$$

4- قياس زاوية طور التيار المار في الخط :

$$H_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{القياس من } i \text{ إلى } j \\ -1 & \text{القياس من } j \text{ إلى } i \\ 0 & \text{غير ذلك} \end{cases} \quad (17)$$

### تحديد أماكن القياسات الكاذبة المضافة لإعادة الرؤية :

إذا ظهر أن الشبكة غير مرئية لابد من إضافة قياسات لإعادة رؤية الشبكة الكهربائية، وبالتالي يجب تحديد المجموعة الأصغرية من القياسات الإضافية التي تجعل الشبكة مرئية مع ضمان أن هذه القياسات الإضافية لن تفسد نتائج مقيم الحالة للجزر المرئية [3]. وهنا يجب الإشارة إلى أنه إذا اختيرت المجموعة الأصغرية من القياسات الإضافية غير الفائضة التي تجعل الشبكة بالكاد مرئية فإن نتائج تقييم الحالة للجزر المرئية لن يتأثر [3].

تسمى القياسات المضافة بالقياسات الكاذبة، والقياسات الكاذبة المرشحة هي: قياسات الاستطاعة المحقونة في العقد المتصلة المنتمية إلى جزر مرئية مختلفة [6].

يعتمد الحل الرياضي لتحديد أماكن القياسات الكاذبة المضافة على تحليل مصفوفة الريح إلى العوامل المتثلثة وعلى حل معادلة مقيم الحالة المستمر الخطي مع اعتبار مصفوفة أوزان أخطاء القياسات مصفوفة واحدة قطرية لأن أخطاء القياس لن تؤثر على تحليل الرؤية [10]، أي يمكن كتابة المعادلة (2) بالشكل التالي:

$$G = H' * H \quad (18)$$

ونكتب معادلة مقيم الحالة المستمر الخطي بالنسبة ل  $\theta$  :

$$G_{\theta} \hat{\theta} = H'_{P\theta} W_P Z_P \quad (19)$$

الآن يمكن القول أن الشبكة تكون مرئية إذا كان ل  $H$  ترتيباً كاملاً أي  $\text{rank}(H)=n$  حيث  $n$  عدد عقد الشبكة

وهذا يتحقق عندما تكون مصفوفة الريج المحسوبة من المعادلة (18) مصفوفةً مربعةً ذات محددٍ غير صفري (nonsingular) أي عند وجود عنصر واحد فقط يساوي الصفر في نهاية محور الشكل المثلثي لمصفوفة الريج  $G$  [10] وفي حال وجود أكثر من عنصر صفري في محور المصفوفة تكون الشبكة غير مرئية. يعتمد عدد القياسات الكاذبة المضافة على عدد العناصر الصفرية في محور الشكل المثلثي لمصفوفة الريج [10].

في حال عدم وجود قياس لزاوية الطور فإننا نحتاج إلى قضيبي جميع مرجعي وهنا نأخذ في الدراسة لاستخدام المصفوفة  $\overline{H}$  بدلاً من  $H$  والتي نحصل عليها من مصفوفة جاكوبيان  $H$  بحذف أي عمود منها [10]. لضمان الحصول على المجموعة الأصغرية من القياسات الكاذبة المرشحة اعتمدنا في هذا البحث على ترتيب أسطر مصفوفة جاكوبيان أي ترتيب مجموعة القياسات مما يؤدي إلى ترتيب محور التشكيل المثلثي لمصفوفة الريج، إذ أن عدم ترتيب محور مصفوفة جاكوبيان سيعطي عدد أكبر من مجموعة القياسات المرشحة كما ستظهر النتائج. نضيف قياس مرشح واحد فقط في كل تكرار تكون فيه الشبكة غير مرئية حتى نحصل على شبكة مرئية وبذلك نضمن أن القياسات لن تكون فائضة.

ولضمان الحصول على المجموعة الأمثل من القياسات المضافة اعتمدنا أيضاً في هذا البحث على استبعاد إضافة قياسات في الجزر التي تحوي قياس كاذب مضاف. بإتباع هذه الأساسيات سنضمن الحصول على المجموعة الصغرى والأمثل من القياسات الكاذبة المضافة غير الفائضة.

### ترتيب مصفوفة جاكوبيان:

اعتمدنا في ترتيب مصفوفة جاكوبيان على إيجاد العوامل  $l, u, p$  للمصفوفة  $H$  اعتماداً على تعليمة  $[l, u, p] = \text{lup}(H)$  الموجودة في MATLAB وصياغة برمجية سهلة لترتيب المصفوفة وفق الخطوات التالية:

1- إيجاد العوامل  $l, u, p$  للمصفوفة  $H$ .

حيث:

l: مصفوفة مثلثية سفلى.

u: مصفوفة مثلثية عليا.

p: مصفوفة واحدة

2- نرتب محور المصفوفة  $p$  بتحويلها إلى مصفوفة قطرية واحدة.

3- نعيد حساب  $H$  من العلاقة (20):

$$H = \text{inv}(p) * l * u \quad (20)$$

حيث:  $\text{inv}(p)$  هو مقلوب المصفوفة  $p$  بعد ترتيبها.

### خوارزمية تحديد مجموعة القياسات الكاذبة المضافة:

1- نحدد مجموعة القياسات المتاحة وعدد عقد الشبكة. ونحدد المخطط الطبولوجي للشبكة عن طريق مصفوفة ارتباط عقد الشبكة.

2- نشكل مصفوفة عوامل توابع القياس أي مصفوفة جاكوبيان  $H$  وفقاً لنوع القياسات المتوفرة وذلك اعتماداً على المعادلات (13) و (14) و (15) و (16).

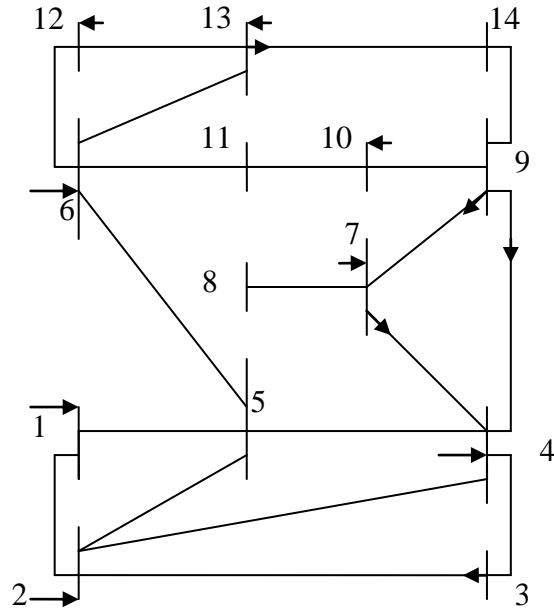
3- نوجد العوامل  $l, u, p$  لمصفوفة جاكوبيان  $H$  ونعيد ترتيب المصفوفة  $p$  ثم نحسب  $H$  من المعادلة (20).



- 4- نشكل مصفوفة الريح  $G$  من المعادلة (18).
- 5- نوجد العوامل المثلثية لمصفوفة الريح  $G$ .
- 6- نأخذ المصفوفة المثلثية العليا من التشكيل المثلثي لمصفوفة الريح ونحدد عدد العناصر الصفرية في محور هذه المصفوفة المثلثية، ففي حال وجد عنصر واحد فقط صفري في نهاية محور المصفوفة ستكون الشبكة مرئية ولن نضيف قياسات أما في حال وجود أكثر من عنصر صفري فالشبكة غير مرئية ويجب إضافة قياسات.
- 7- نحل المعادلة (19) بإعطاء كل قيم  $\theta$  المقابلة للقياسات أي المقابلة للعناصر المحورية غير الصفرية قيمةً مساوية للصفر، وإعطاء قيم  $\theta$  المقابلة للعناصر المحورية الصفرية القيم التالية:  $\theta = 0, 1, 2, \dots$  حسب عدد المحاور الصفرية.
- إذا كانت كل قيم  $\theta$  مساوية للصفر تكون الشبكة مرئية وإلا نتابع خطوات الحل. وهنا يجب الإشارة إلى أن قيم  $\theta$  هي التي تحدد عدد الجزر المرئية أي أن الجزيرة المرئية هي مجموعة العقد التي تملك نفس قيمة  $\theta$  في تحليل الرؤية.
- 8- نحسب مصفوفة الاستطاعات السارية من العلاقة (5)، في حال كانت كل الاستطاعات السارية مساوية للصفر تكون الشبكة مرئية وفق العلاقة (8) ولا داعي لإضافة قياسات، أما في حال وجود استطاعة سارية واحدة على الأقل لا تساوي الصفر، يجب إضافة قياسات وعندها نتابع خطوات الحل كالتالي:
- 9- نحدد مجموعة العقد المرشحة لتملك قياساً كاذباً مضافاً وهي العقد التي لا تملك قياساً للاستطاعة المحقونة ولا قياساً لزوايا الطور ومتاخمة للفروع التي تحوي استطاعة سارية واحدة على الأقل لا تساوي الصفر لأنها فروع غير مرئية بحسب المعادلة (8).
- 10- ندخل قياساً كاذباً واحداً فقط إما قياس استطاعة محقونة أو قياس زاوية طور الجهد، ونعيد حساب العوامل المثلثية لمصفوفة الريح.
- 11- نعيد حل المعادلة (19) ففي حال كانت الشبكة مرئية، نتوقف عن الحل، أما إذا كانت ماتزال غير مرئية نتابع خطوات الحل كالتالي:
- 12- نستبعد الجزر التي تحوي قياساً كاذباً مضافاً ونعود إلى الخطوة رقم 7 ونكرر الحل حتى تصبح كامل الشبكة مرئية.
- تمت صياغة هذه الخوارزمية من خلال كتابة برنامج في بيئة MATLAB مستخدمين التعليمات اللازمة.

### التطبيق العملي:

سوف نختبر الخوارزمية على شبكة IEEE القياسية المكونة من 14 عقدة والمبينة في الشكل (2).



الشكل (2) توزيع القياسات في شبكة IEEE القياسية المكونة من 14 عقدة  
(حيث  $\rightarrow$  يمثل قياس)

لدينا قيم التوليد والحملات الفعلية في عقد وخطوط هذه الشبكة معطاة بالقيم الواحدية في الجدول (1)، ولدينا قيم مفاعلات الخطوط لهذه الشبكة معطاة بالجدول (2).

الجدول (1)

رقم العقدة	$P(\text{generated})(p.u)$	رقم العقدة	$P(\text{load})(p.u)$	$p(\text{generated})(p.u)$	رقم العقدة
1	2.32	8	0	0	1
2	0.4	9	0.217	0	2
3	0	10	0.942	0	3
4	0	11	0.478	0	4
5	0	12	0.076	0	5
6	0	13	0.112	0	6
7	0.72	14	0	0	7

الجدول (2)

رقم الخط	المفاعلة $(p.u)(x)$	رقم الخط	المفاعلة $(p.u)(x)$
1-2	0.0177	6-11	0.0596
1-5	0.0669	6-12	0.0767
2-3	0.0594	6-13	0.0391
2-4	0.0529	7-8	0.0528
2-5	0.0522	7-9	0.033

0.0253	9-10	0.0513	3-4
0.0811	9-14	0.0013	4-5
0.0576	10-11	0.0627	4-7
0.06	12-13	0.1669	4-9
0.1044	13-14	0.0756	5-6

إذا أخذنا قيم التوليد والحمولات الحقيقية في العقد كما هي معطاة في الجدول (1) واعتبرناها قياسات وأدخلناها مع قيم المفاعلات إلى برنامج تقييم الحالة سنحصل في النتيجة على شعاع زوايا الطور المقيمة (teta) (بالراديان) وعلى مصفوفة الاستطاعات السارية المقيمة (ps) (p.u) مع اعتبار التوليد في العقد بإشارة موجبة والحمولات في العقد بإشارة سالبة لأنها استطاعة مستهلكة وليست استطاعة مولدة).

$$teta = [0 - 0.08482 \quad -0.2123 \quad -0.1709 \quad -0.1674 \quad -0.2657 \quad -0.2481 \quad -0.2892 \\ -0.2755 \quad -0.2808 \quad -0.2767 \quad -0.2863 \quad -0.2861 \quad -0.3015]^T$$

$$P_s = \begin{bmatrix} 2.32 & 1.5233 & 0 & 0 & 0.7967 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.5233 & 0.183 & 0.684 & 0.5178 & 0.5045 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.684 & -0.942 & -0.258 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5178 & 0.258 & -0.478 & -0.8118 & 0 & 0.3936 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.7967 & -0.5045 & 0 & 0.8118 & -0.076 & 0.4134 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.4134 & -0.112 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0586 & 0.0748 & 0.168 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.3936 & 0 & 0 & 0.72 & 0.85 & 0.2636 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.85 & -0.85 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.2 & 0 & 0 & -0.2636 & 0 & -0.295 & 0.0664 & 0 & 0 & 0 & 0.1022 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0664 & -0.09 & -0.0236 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0568 & 0 & 0 & 0 & 0.0236 & -0.035 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0748 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.061 & 0.0138 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.168 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0138 & -0.135 & 0.0468 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1022 & 0 & 0 & 0 & -0.0468 & -0.149 \end{bmatrix}$$

إذا أخذنا تشكيلة القياسات الموضحة في الشكل (2) مع اعتبار القياس في العقدة 4 قياس زاوية طور وأجرينا تحليل الرؤية فإن النتائج ستظهر بأن الشبكة غير مرئية وأنها مقسمة إلى أربع جزر مرئية وفقاً لقيم  $\theta$  الناتجة:

$$\theta = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 3 \quad 3]$$

بتطبيق خوارزمية إضافة القياسات الكاذبة سيعطي البرنامج مجموعة العقد التي يجب أن نضيف فيها قياس حقن كاذب لإعادة الرؤية إلى الشبكة ووفقاً لتشكيلة القياسات السابقة ستكون النتيجة التي يظهرها البرنامج أنه بإضافة قياس حقن كاذب في العقدة 14 ستتحقق الرؤية.

$$meas_{add} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 14]$$

مع أن مجموعة القياسات المرشحة لإضافة قياس كاذب فيها هي:

$$meas_{add} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 11 \ 0 \ 0 \ 14]$$

نضيف إلى تشكيلة القياسات السابقة قياس حقن في العقدة 14 وندخلها إلى مقيم حالة الشبكة الكهربائية فنحصل في النتائج على القيم المقيمة.

$$teta = [0 -0.0845 \ -0.2098 \ -0.1709 \ -0.1674 \ -0.2654 \ -0.2456 \ -0.2864 \\ -0.2717 \ -0.2764 \ -0.2723 \ -0.2893 \ -0.2909 \ -0.3031]^T$$

$$P_s = \begin{bmatrix} 2.317 & 1.5202 & 0 & 0 & 0.7971 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.5202 & 0.1765 & 0.6718 & 0.5189 & 0.506 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.6718 & -0.942 & -0.2428 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5198 & 0.2428 & -0.478 & -0.795 & 0 & 0.3934 & 0 & 0.1999 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.7971 & -0.506 & 0 & 0.795 & -0.076 & 0.4132 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.4132 & -0.112 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0585 & 0.0748 & 0.1679 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.3934 & 0 & 0 & 0.7201 & 0.8499 & 0.2636 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.8499 & -0.8499 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1999 & 0 & 0 & -0.2636 & 0 & -0.295 & 0.0665 & 0 & 0 & 0 & 0.1022 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0665 & -0.09 & -0.0236 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0565 & 0 & 0 & 0 & 0.0236 & -0.035 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0748 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.061 & 0.0138 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1679 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0138 & -0.135 & 0.0468 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1022 & 0 & 0 & 0 & -0.0468 & -0.149 \end{bmatrix}$$

نلاحظ أن أعلى نسبة للخطأ لم تتجاوز 1.6% بالنسبة لتقييم الزوايا ولم تتجاوز 3.5% بالنسبة لتقييم الاستطاعات. إذا حذفنا من تشكيلة القياسات المبينة في الشكل (2) قياسين إضافيين وهما قياس الاستطاعة المحقونة في العقدة 10 وقياس الاستطاعة السارية في الخط (7-9) فإننا حسب نتائج خوارزمية إضافة القياسات الكاذبة سنحتاج إلى إضافة قياسي حقن في العقدة 11 وفي العقدة 14 حتى تعود الشبكة مرئية.

$$meas_{add} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 11 \ 0 \ 0 \ 14]$$

نضيف قياسي الحقن السابقين ونقيم حالة الشبكة لنحصل على النتائج التالية:

$$teta = [0 - 0.0845 \quad -0.2098 \quad -0.1709 \quad -0.1674 \quad -0.2654 \quad -0.2456 \quad -0.2864 \\ -0.2717 \quad -0.2764 \quad -0.2723 \quad -0.2893 \quad -0.2909 \quad -0.3031]^T$$

$$P_s = \begin{bmatrix} 2.317 & 1.5202 & 0 & 0 & 0.7971 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.5202 & 0.1765 & 0.6718 & 0.5189 & 0.506 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.6718 & -0.942 & -0.2428 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5198 & 0.2428 & -0.478 & -0.795 & 0 & 0.3934 & 0 & 0.1999 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.7971 & -0.506 & 0 & 0.795 & -0.076 & 0.4132 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.4132 & -0.112 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0585 & 0.0748 & 0.1679 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.3934 & 0 & 0 & 0.7201 & 0.8499 & 0.2636 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.8499 & -0.8499 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1999 & 0 & 0 & -0.2636 & 0 & -0.295 & 0.0665 & 0 & 0 & 0 & 0.1022 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0665 & -0.09 & -0.0236 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0565 & 0 & 0 & 0 & 0.0236 & -0.035 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0748 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.061 & 0.0138 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1679 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0138 & -0.135 & 0.0468 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1022 & 0 & 0 & 0 & -0.0468 & -0.149 \end{bmatrix}$$

نلاحظ أن أعلى نسبة خطأ لم تتجاوز أيضاً 1.6% بالنسبة لتقييم الزوايا ولم تتجاوز 3.5% بالنسبة لتقييم الاستطاعات.

بالرغم من أن إضافة قياس كاذب في العقدة 10 بدلاً من العقدة 11 سيحقق الرؤية أيضاً ولكن تم استبعاد العقدة 10 لأنها تنتمي إلى جزيرة قد أضيف إليها قياس كاذب سابقاً.

بالمقارنة مع نتائج الأبحاث السابقة فقد تراوحت نسبة الخطأ في المراجع [4] و [11] من 8% حتى 24%. ولم يذكر أي مرجع من المراجع السابقة عدد القياسات الكاذبة المضافة كنسبة من القياسات الحقيقية المتاحة إنما اعتمدت جميعها على أنه طالما كانت القياسات الكاذبة حدية فإنه يمكن إضافتها. ولكن تم الاستنتاج في هذا البحث بعد تطبيق الخوارزمية السابقة و بعد حذف عدد من القياسات الحقيقية واستبدالها بقياسات كاذبة حدية أن نسبة الخطأ يمكن أن تتجاوز 8% إذا تجاوز عدد القياسات الكاذبة المضافة نسبة 10% من القياسات الحقيقية المتاحة لذلك نقترح بألا تتجاوز القياسات الكاذبة المضافة هذه النسبة.

### الاستنتاجات والتوصيات:

1- تم الحصول على المجموعة الأصغرية والأمثل من القياسات الكاذبة المرشحة عن طريق ترتيب محور مصفوفة القياسات

2- تم الحصول على المجموعة الأصغرية والأمثل من القياسات المضافة عن طريق إضافة قياس مرشح واحد في كل تكرار واستبعاد إضافة قياسات في الجزر التي أضيف إليها قياس كاذب في تكرار سابق.

3- تم الحصول على المجموعة الصغرى والأمثل من القياسات الكاذبة المضافة مع عدم التأثير السلبي على نتائج مقيم الحالة للجزر المرئية.

- 4- أظهرت خوارزمية إضافة القياسات الكاذبة نسبة خطأ صغيرة ومقبولة في الفروقات بين نتائج التقييم بدون إضافة قياسات كاذبة وبين نتائج التقييم مع إضافة قياسات كاذبة.
- 5- يفضل أن لا تتجاوز نسبة القياسات الكاذبة المضافة 10 % من قيمة القياسات الحقيقية المتوفرة.
- 6- يمكن تطبيق الخوارزمية المعتمدة في البحث على أي شبكة كهربائية أخرى مهما بلغ عدد عقد الشبكة.

### المراجع:

- 1- JAIN,K.SHEHRAWAT,S-*Comparison of PMU Placement Techiques for Complete Observability of Network Using State Estimation*.International Jurnal of Electronics&CommunicatinmTecnology India.vol.7,No.2,2016,pp21-26
- 2-PRESADA,V.EREMIA,M.TOMA,L-*Modified State Estimation in Presence of PMU Measurements*.U.P.B.Sci.Bull.,Series c,vol.76,No.1,2014,pp237-248
- 3-GOUVEA.J.P.S,COSTA.A.J.A-*Critical Psedo-measurements Plasement in Power System State Estimation*.12thPower Systems Computation Conference Dresden.1996,pp1993-1999
- 4-SINGH,G-*An Algorithm for Observability Determination in Bus System State Estimation using Matlab Simulition*.International Jornal of Scientific&Engenering Research India.Vol.4,No.10,2013,pp947-954
- 5-GOU,B.ABUR,A-*A Direct Numerical Method for Observability Analysis*.IEEE Transaction on Power System.Vol.15,No.2,2000,pp625-630
- 6-GOU,B.ABUR,A-*An Improved Measurements Placement Algorithm for Network Observability*.IEEE Transaction on Power System.Vol.16,No.4,2001,pp819-824
- 7- KORRES.G.N-*A Gram Matrix-based Method for Observability Restoration*.IEEE Transaction on Power System.Vol.26,No.4,2011,pp2569-2571
- 8-MAGNAGO,F,H.ABUR,A-*A Unified Approach to Robust Meter Placement Against Loss of Measurements and Branch Outages*.IEEE Transaction on Power System.vol.15.no.3,2000,pp945-949
- 9-DONMEZ,B.ABUR,A-*A Computationally Efficient Method to Place Critical Measurements*.IEEE Transaction on Power System.Vol.26,No.2,2011,pp924-931
- 10-GOL,M-*Incorporation of PMUs in Power System State Estimation*,Northeastern University,Boston,2014.
- 11- SINGH,G.HATIWARI,P.KUMAR,P.SRIVASTAVA,T-*Observability Analysis of Larg Bus System Using Matlab Simulation*.International Journal of Engineering Researchand Aplication.vol.3,No.2,2013,pp307-310.