

محاكاة استقرارية منظومة قدرة باستخدام طريقة ليبونوف المباشرة Simulation of Power System Stability Using Lyapunov's Direct Method.

Dr. MAJLI NEMA HAWAS AL-KHAZRAJI .

Lecturer/

Technical Electrical & Electronic college.

د.مجلي نعمة حواس الخزرجي

مدرس/

كلية التقنيات الكهربائية والألكترونية

ملخص:

يعرض البحث وصف مختصر لطريقة ليبونوف المباشرة وتعرض كفاءتها مقارنة بطريقة الخطوة - خطوة غير المباشرة من اجل حساب الأستقرارية لمنظومة قدرة كهروميكانيكية، والفوائد العملية لهذه الطريقة التحليلية:
أ. سرعة الحل.
ب. امكانية حساب درجة الاستقرارية
وتعاني هذه الطريقة من الاتي:
1. محدودية النمذجة.
2. في حالة عدم استقرار المنظومة لايمكن تحديد الماكنه او مجموع المكاثن الخارجة عن الاستقرار.
تم تلخيص المفاهيم الاساسيه والتمثيل الرياضي. وتم اعتماد منظومة اختباريه لعرض كفاءة طريقة ليبونوف المباشرة مقارنة مع كفاءة طريقة الخطوة - خطوة غير المباشرة.

Abstract:

This paper presents a brief description of Lyapunov's direct method, and demonstrates its efficiency with respect to previous indirect step by step method, in order to compute the stability of electromechanical power system.

The practical advantages of this direct method of analysis are:

- (i) Rapid solution.
- (ii) Ability to compute the degree of stability.

The limitations that Lyapunov's direct method suffers from:

- a) Severe modeling limitations.
- b) If the system is unstable, the analysis does not indicate how it separates and whether the separated parts survive of collapse.

The basic concepts and the mathematical formulation of the method are summarized. Practical test system are used to demonstrate the superior efficiency of the method relative to step by step method.

قائمة الرموز :

- $t =$ الزمن (بالثانية).
- $H =$ ثابت الماكنة.
- $\omega_{sm} =$ التردد الزاوي للماكنة بالدرجات نصف القطرية الميكانيكية.
- $P_m =$ القدرة الداخلة إلى عمود الإدارة.
- $P_e =$ القدرة الكهربائية العابرة للفجوة الهوائية في الماكنة.
- $P_a =$ القدرة التعجيلية الناجمة عن فقدان التوازن بين P_m و P_e .
- $\omega_s =$ السرعة التزامنية للماكنة بالدرجات نصف القطرية الكهربائية.
- $f =$ الترددذبذبة/ ثانية.
- $x =$ مفاعلة الانتقال.
- $\Delta t =$ الفترة الزمنية المتعاقبة.
- $\Delta\delta_n =$ التغير في الزاوية خلال الفترة الزمنية Δt .
- $\Delta\delta_{n-1} =$ التغير في الزاوية خلال الفترة الزمنية السابقة.
- $P_{a(n-1)} =$ القدرة التعجيلية خلال الفترة الزمنية السابقة.
- $\omega =$ سرعة الدوار (نصف قطرية - ثانية).
- $\pi =$ النسبة الثابتة.
- $V =$ فولتية نقطه الإرسال.
- $V_1 =$ فولتية نقطة الاستلام.
- $P_{max} =$ الطاقة القصوى المنقولة.
- $\tilde{\delta}_i =$ الفرق بين زاوية الدوار للماكنة i والزاوية الابتدائية للدوار $(\delta_i - \delta_o)$.
- $\tilde{\omega}_i =$ الفرق بين سرعة الدوار للماكنة i والسرعة التزامنيه $(\omega_i - \omega_o)$.

1.1 المدخل: Introduction

دراسات الأستقرارية العابرة من الدراسات بالغة الأهمية لتحديد السلوكية الديناميكية لمنظومة القدرة الكهروميكانيكية وتهدف التحليلات الرياضية والدراسات التصحيحية للأستقرارية العابرة إلى معرفة إمكانية بقاء استقرار المنظومة عند حدوث اضطرابات رئيسية مثل أعطال خطوط نقل القدرة والتغيير الفجائي للأحمال الكهربائية والفقْدان الفجائي لوحدات توليد الطاقة الكهربائية. ويسبب ضخامة منظومة القدرة وتوسع الشبكات المختلفة المرتبطة بها قد أدى إلى وجوب التوسيع في دراسات الأستقرارية العابرة لغرض الحصول على درجة عالية جداً من الضبط والدقة في النتائج الكفيلة بإعطاء القرار الصحيح في كيفية استجابة المنظومة للاضطرابات التي يحتمل حدوثها. ويكون للمكائن عادة منظومات إثارة ومنظومات سيطرة، (التحكم التوربيني) يتوجب وضعها في نماذج بشكل دقيق عند تمثيلها في الحاسبة لكي تعكس الاستجابة الديناميكية الصحيحة لمنظومة القدرة في حالة الاضطرابات [2,1].

1.2 معادلة التآرجح: Swing Equation

معادلة التآرجح ذات أهميه بالغة في دراسات الأستقرارية وهي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية وتكتب بالصيغ التالية [3,2].

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \dots(1)$$

إذ أن δ مقياسه بدرجات نصف قطرية ميكانيكية. و ω_{sm} مقياسه بدرجات نصف قطرية ميكانيكية لكل ثانية.

وبالإمكان إعادة كتابة المعادلة (1) على النحو التالي بالنسبة لمنظومة تعمل بالتردد الكهربائي f هيرتز.

$$\frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \dots(2)$$

إذ أن δ مقياسه بدرجات نصف قطريه كهربائية.

$$\frac{H}{180 f} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \dots(3)$$

على اعتبار δ مقياسه بالدرجات الكهربائية.

3.1 تطبيقات معادلة التآرجح: Swing Equation Application

يمكن كتابة معادلة التآرجح بشكل معادلتين تفاضليتين من الدرجة الأولى وكما يأتي:

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad \dots(4)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad \dots(5)$$

وتكمن الغاية من حل معادلة التآرجح في إعطاء العلاقة بين δ و t حيث تكون الزاوية δ عندها عبارة عن دالة زمنية. ويطلق على المخطط البياني لزاوية δ إزاء الزمن t بمنحنى التآرجح الماكنة [5,4].

4.1 طريقة الخطوة - خطوة للأستقرارية: (step-by step method)

هي طريقه لحل معادلة التآرجح وذلك للحصول على منحنى التآرجح. أي الحصول على زاوية الدوار δ بوصفها دالة للزمن t لأزمنة إزالة حرجة معينة. ويتم ذلك بتطبيق عمليات حسابيه تقريبية وتكرارية.

تستخدم طريقة الخطوة- خطوة في الحصول على الحل بواسطة البرمجة في الحاسبة وخاصة عندما تكون هذه المنظومة كبيرة وحاوية مجموعة من المكائن، ويجري الحل بإيجاد قيم الزاوية بوصفها دالة للزمن t ولأي من المكائن لفترة زمنية كاملة، وعندها يجري تمثيل العلاقة فيما بين δ و t بمنحنى زاوية الدوار/ الزمن، لتحديد ما إذا كانت δ ستزداد حتى تصل إلى حد أقصى ثم تبدأ بالتناقص أو تستمر دون حد. والوضع الأخير يعني فقدان استقرارية المنظومة. وان فترة الإزالة الكلية (Overall Clearing Time) هي تلك العائدة لمجموع الزمن المستغرق في إصدار الافلات من قبل أجهزة الحماية والزمن المستغرق في فعل قاطع الدورة لفصل التوصيل الكهربائي [6,3].

هناك عدد من الطرق لتطبيق طريقة الخطوة-خطوة لحل المعادلات التفاضلية من الدرجة الثانية، وهي جميعها أساليب عددية (Numerical Methods) تتعلق بإضافة زيادات جزئية صغيرة جدا إلى الدالة أو تستخدم الحاسبة لأجراء هذه العمليات الحسابية.

وتهدف الحسابات في جميع الأحوال إلى أيجاد التغيرات في الموقع الزاوي للدوار خلال فترات زمنية قصيرة جداً- مستندة إلى الفرضيات الآتية:

أ. اعتبار القدرة التعجيلية P_a المحسوبة في بداية الفترة الزمنية المنتهية (السابقة) ولغاية منتصف الفترة الزمنية الحالية.

ب. اعتبار سرعة الزاوية ثابتة خلال الفترة الزمنية الحالية والتي هي في الحقيقة محسوبة في منتصف هذه الفترة. وتجدر الإشارة إلى أن كلتا الفرضيتين غير صحيحة وذلك لان δ تتغير بشكل مستمر وان كلاً من P_a و ω هي أيضاً دالة للزاوية δ . ولكن يلاحظ انه كلما كانت Δt اقصر اقترب منحنى التآرجح من المنحنى الحقيقي. وذلك

على الرغم من عدم مطابقة أي من الفرضيتين المذكورتين في أعلاه للحقيقة، ولكن المعالجة الحسابية بطريقة الخطوة-خطوة هي التي تؤدي إلى استخراج قيم غير بعيدة عن القيم الحقيقية.^[7,2]

5.1 تقييم الاستقرار العابرة: Transient Evaluation

يمكن تقييم الاستقرار العابرة من خلال منحنيات التارجح لدوار المكائن التزامنيه في منظومات القدرة الكهربائيه، للحصول على منحنيات التارجح هناك طريقتان يتم برمجتها بالحاسبة الرقمية وهما:

1-5-1. طريقة الخطوة- خطوة البسيطة: Simple Step by Step Method

يتم إيجاد منحنيات التارجح في هذه الطريقة لمدى من أزمنة إزالة العطل بتطبيق معادلة الفرق:

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{180f}{H} \cdot (\Delta t)^2 P_{a(n-1)} \quad \dots(6)$$

تحسب الزاوية δ عبر الفترة الزمنية t المتضمنة الفترات المتعاقبة وتصاغ في برامج الحاسبة لكتابة جدول بالنتائج المستخرجة، ويستخدم فيه برنامج فرعي لرسم منحنيات التارجح. وتؤخذ الفترة الزمنية بالثانية مثلاً $\Delta t = 0.01$ وتكون أزمنة إزالة العطل في المدى بين 0.05 إلى 0.5 ثانية وفي ضوء استمرار تزايد زاوية الدوار او تناقصها يتم الحكم على استقرار المنظومة^[8,1].

1-5-2. طرق التكامل العددي: Numerical Integration Methods

تستخدم المعادلتان التفاضليتان من الدرجة الأولى (4) و(5) كما جاء في الفقرة (3) ويتبع في حل هاتين المعادلتين الطريقة الاعتيادية لإيجاد سرعة الماكنة وزاوية الدوار ، يكتب برنامج فرعي دوري للحصول على منحنيات التارجح بتطبيق إحدى الطرق الآتية:

أ. طريقة أويلر (Euler)

ب. طريقة أويلر المحورة (Modified Euler)

ت. طريقة رانج-كوتا Runge-Kutta

وتتم المفاضلة بين الطرق أعلاه على ضوء الضبط في النتائج المستخرجة بكل من هذه الطرق اخذين بنظر الاعتبار ما يلي:

أ. التعقيد في البرمجة ويقصدها حجم البرامج والوقت المستغرق للحل من قبل الحاسبة.

ب. الضبط ويقصد به قصر الفترة الزمنية المستخدمة والوقت المستغرق للحل البرامج من قبل الحاسبة

[9,3]

Lyapunov Method : 3-5-1 طريقة ليبونوف

طريقة ليبونوف تتعامل مع المنظومات الخطيه وغير الخطيه. وهناك اسلوبان لمعالجة مشكلة الاستقرار اسلوب ليبونوف الأول يطبق فقط في حالة الاستقرار المستقرة واسلوب ليبونوف الثاني يطبق ويدعى بطريقة ليبونوف المباشرة ويستخدم في حسابات الاستقرار العابرة للمنظومات غير الخطيه.

ونشير هنا الى الاعتبارات التاليه عند تطبيق طريقه ليبونوف لتقييم الاستقرار العابرة وكما يلي:

1. المولد التزامني يمثل بفولتيه ثابتة خلف المفاعله العابرة.

2. القدره الداخله للمولد ثابتة خلال الفترة العابرة.

3. عزم التخميد يعتبر صفراً.

4. تمثيل الحمل بمسامحة توازي ثابتة.

لتوضيح ذلك سنذكر دالتي ليبونوف احدها تاخذ بنظر الاعتبار مقاومة المنظومة وحسب المعادله (7) و الاخرى

تهمل مقاومة المنظومة وحسب المعادله (8) وكما ياتي

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^2 + \sum_{i=1}^n P_{ai} (\tilde{\delta}_i^s - \tilde{\delta}_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \delta_{ij}^s - \cos \delta_{ij}) - \int_{\tilde{\delta}_i^s + \tilde{\delta}_j^s}^{\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j} D_{ij} \cos \tilde{\delta}_{ij} d(\tilde{\delta}_i + \tilde{\delta}_j) \right] \quad \dots(7)$$

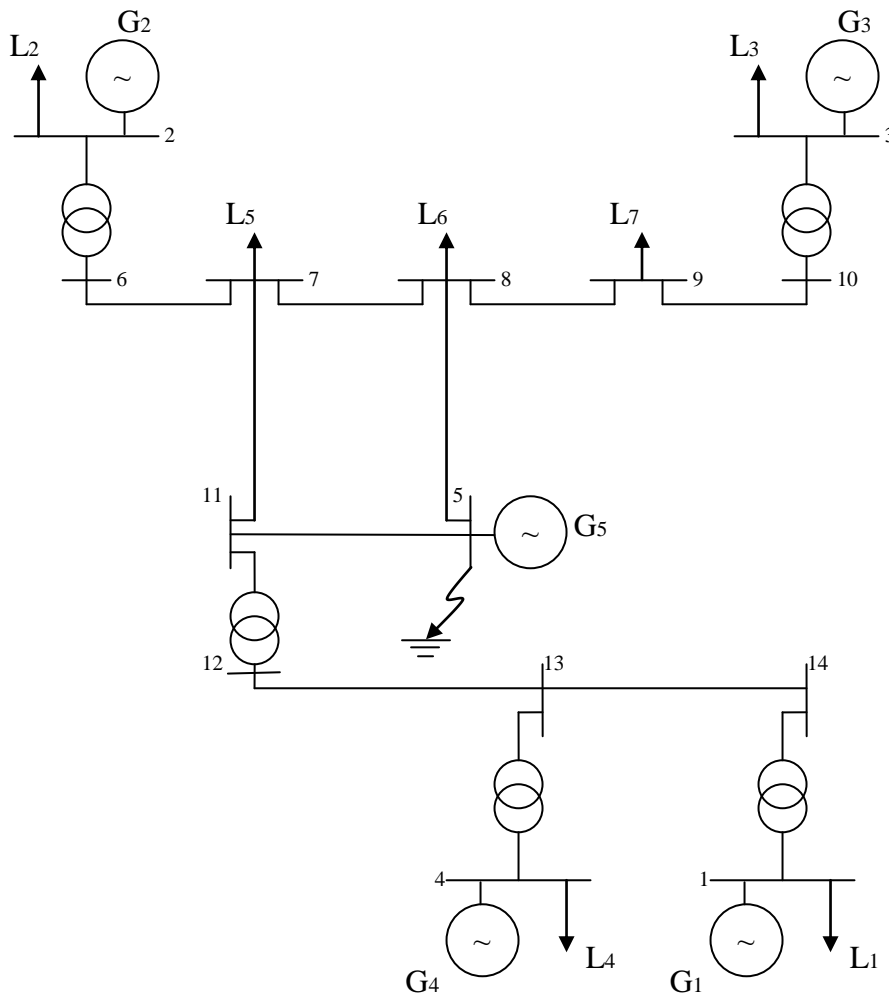
$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^2 + \sum_{i=1}^n P_{ai} (\tilde{\delta}_i^s - \tilde{\delta}_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} (\cos \tilde{\delta}_j^s - \cos \tilde{\delta}_j) \quad \dots(8)$$

لتحديد زمن الازالة الحرج في كل حالة يتم اجراء الخطوات الآتيه:

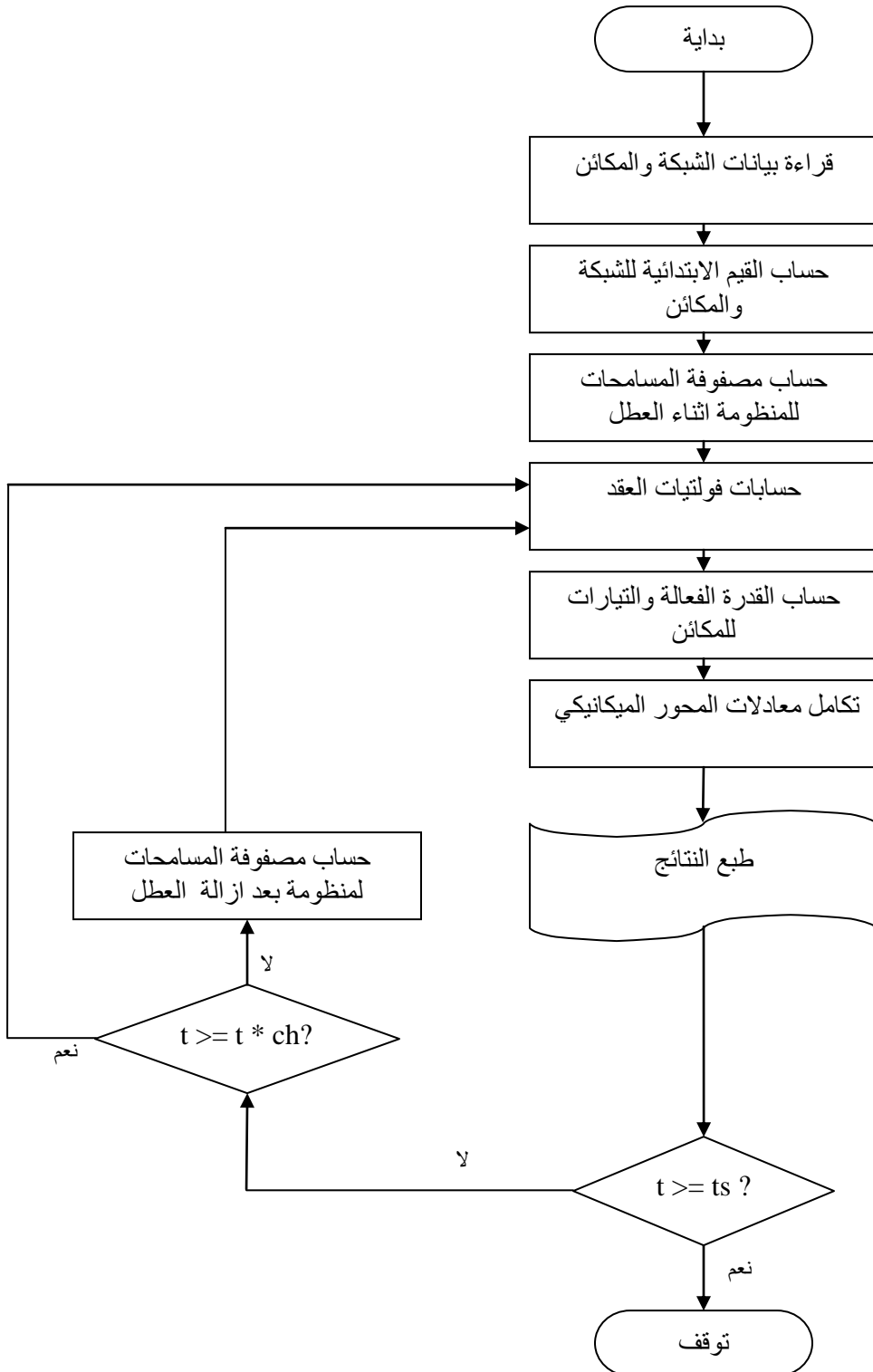
1. تكوين دالة ليبونوف V .
2. نحدد نقطة توازن الاستقرار لما بعد العطل من خلال حساب حدود الاستقرار (V₁).
3. نكامل معادله المنظومه اثناء العطل وخلال كل تكامل نحسب دال ليبونوف V.
4. نقارن دالة ليبونوف V مع V₁.
5. عندما تتساوى دالة ليبونوف V مع V₁ يتم تحديد زمن الازاله الحرج CCT [10,5].

2. طريقة ليينوف المستخدمة:-

تم استخدام طريقة ليينوف المباشرة وحسب المعادلات (8,7) على منظومة القدرة الأختبارية الموضحة في شكل (1). وتم استخدام برنامج (MATHLAB) على حاسبه نوع (P4) ويوضح المخطط الانسيابي للبرنامج المستخدم لحسابات استقرارية منظومة القدرة.



الشكل (1) منظومة اختباريه خمسة مكانن



الشكل (2) مخطط كتلي مبسط يوضح تنظيم حسابات الأستقرارية .

3. النتائج:

نتائج الدراسة كما مبين في الجداول (1) و(2) و(3).

جدول (1) زمن الازالة الحرج CCT بطريقتي ليينوف والخطوة- خطوة .

زمن الازالة الحرج CCT ثانية		المنظومة الأختباريه
طريقة ليينوف	طريقة الخطوة - خطوة	منظومة تحوي خمسة مكائن
0.58	0.62	

جدول (2) الزمن المستغرق للحل بطريقتي ليينوف والخطوة-خطوة⁺

زمن الحل Ts ثانية بواسطة		المنظومه الاختباريه
طريقة ليينوف	طريقة الخطوة-خطوة ⁺⁺	منظومة تحوي خمسة مكائن
7	16	

⁺ الحاسبة المستخدمه P4.
⁺⁺ زمن الحل(T)، ثانية واحدة.

جدول (3) نسبة الخطأ في حساب زاوية الدوار δ حسب طرق الحل العدديه

نسبة الخطأ (% error) في حساب زاوية الدوار δ حسب				فترة
الحل بطريقة رانج - كوتا	الحل بطريقة ايولر المعدلة	الحل بطريقة ايولر	الحل الدقيق	الحل Δt
Runge-Kutta	modified Euler	Euler method	Exact sol.	
0.00012	0.00051	0.03600	0.00000	0.01

4. المناقشة:

يبين الجدول(1) تقارب زمن الازاله الحرج CCT بين طريقة ليينوف المباشرة وطريقة الخطوة - خطوة غير المباشرة.

ويبين الجدول (2) تحقيق انخفاض واضح لزمن الحل من خلال تطبيق طريقة ليينوف المباشرة لتقييم الاستقرارية العابرة لمنظومة القدرة.

ويبين الجدول (3) نسبة الخطأ في حساب زاوية الدوار δ لفترة حل Δt تساوي 0.01 ثانية بتطبيق طرق التكامل العددي حيث أظهرت طريقة رانج - كوتا Runge - Kutta أقل نسبة خطأ وهي الأقرب الى الحل الدقيق، وعلى ذلك تكون طريقة رانج - كوتا Runge - Kutta افضل طريقة تكامل عددي لحل المعادلات (4) و (5) التي وردت في الفقرة (3).

Reference:

1. C. A. Gross, *Power System Analysis*, Wiley, New York, 1979.
2. O. I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory*, McGraw-Hill, New York, 1982.
3. W. D. Stevenson, Jr., *Elements of Power System Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1982.
4. K. R. McClymont et al., "Experience with High- Speed Rectifier Excitation Systems", *IEEE Trans PAS*, vol. PAS-87 , pp. 1464-1470, 1986.
5. P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
6. CIGRE Task force 38.02.16, "Impact of the Interaction Among Power System Controls, Technical Report", 2000.
7. D. J. Glover, *Power System Analysis and Design*, Joh Wiley & sons, New York, 2002.
8. A. Moore and C. Atkeson, "Prioritized Sweeping: Reinforcement learning with less Data and less Real Time", *Machine Learning* vol. 13, pp. 103-103, 1998.
9. C. Druet, D. Emst and L. Wehenkel, "Application of reinforcement Learning to electrical Power system closed-loop emergency control", in *Proceedings of PKDD'2000*, pp. 86-95, 2000.
10. M. Glavic, D. Emst, and L. Wehekel, "A Reinforcement Learning Based Discrete Supplementary Control for Power System Transient Stability Enhancement", *Vollos, Greece*, 2003.