

محاكاة استقرارية منظومة قدرة باستخدام طريقة ليبنوف 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 والإلكترونية
ملخص:

يعرض البحث وصف مختصر لطريقة ليبنوف المباشرة وتعرض كفاءتها مقارنة بطريقة الخطوة – خطوة غير المباشرة من أجل حساب الأستقرارية لمنظومة قدرة كهروميكانيكية، والفوائد العملية لهذه الطريقة التحليلية:
أ. سرعة الحل.
ب. امكانية حساب درجة الاستقرارية وتعاني هذه الطريقة من الاتي:
١. محدودية النمذجة.
٢. في حالة عدم استقرار المنظومة لا يمكن تحديد الماكنه او مجموع الماكنن الخارجة عن الاستقرار.
تم تلخيص المفاهيم الأساسية والتمثيل الرياضي. وتم اعتماد منظومة اختباريه لعرض كفاءة طريقة ليبنوف 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:

$$t = \text{الزمن (بالثانية).}$$
$$H = \text{ثابت الماكنة.}$$
$$\omega_{sm} = \text{التردد الزاوي للماكنة بالدرجات نصف القطرية الميكانيكية.}$$

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

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 والفقدان الفجائي لوحدة توليد الطاقة الكهربائية. وبسبب 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].

2-1. 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 مقاسه بدرجات نصف قطرية ميكانيكية.
و ω_{sm} مقاسه 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 مقاسه بدرجات نصف قطريه كهربائية.

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

على اعتبار δ مقاسه بالدرجات الكهربائية .

٣-١ تطبيقات معادلة التارجح: Swing Equation Application

يمكن كتابة معادلة التارجح 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 التارجح 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 التارجح الماكنة [5,4].

٤-١ طريقة الخطوة - خطوة للأستقرارية: (step-by step method)

هي طريقة لحل معادلة التارجح وذلك للحصول على منحنى التارجح. أي الحصول على زاوية الدوار δ بوصفها دالة للزمن t لأزمة 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 المكانن، ويجري الحل بإيجاد قيم الزاوية بوصفها دالة للزمن t ولأي من المكانن 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 الاقلاات 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 إيجاد 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 لأن 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]

٥-١. تقييم الاستقرار العابرة: Transient Evaluation
يمكن تقييم الاستقرار العابرة من خلال منحنيات التآرجح لدوار المكائن التزامنيه في منظومات القدرة الكهربائيه، للحصول على منحنيات التآرجح هناك طريقتان يتم برمجتها بالحاسبة الرقمية وهما:

١-٥-١. طريقة الخطوة-خطوة البسيطة: Simple Step by Step Method
يتم إيجاد منحنيات التآرجح 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 التآرجح. 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 استقرارية المنظومة [8,1].

٢-٥-١. طرق التكامل العددي: Numerical Integration Methods
تستخدم المعادلتان التفاضليتان من الدرجة الأولى (٤) و(٥) كما جاء في الفقرة (٣) ويتبع في حل هاتين المعادلتين الطريقة الاعتيادية لإيجاد سرعة الماكنة وزاوية الدوار، يكتب برنامج فرعي دوري للحصول على منحنيات التآرجح 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].

٣-٥-١. طريقة ليونوف: Lyapunov Method

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

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

١. المولد التزامني يمثل بفولتيه ثابتة خلف المفاعله العابره.

٢. القدره الداخله للمولد ثابتة خلال الفتره العابره.

٣. عزم التخميد يعتبر صفرأ.

٤. تمثيل الحمل بمسامحة توازي ثابتة.

لتوضيح ذلك سنذكر دالتي ليينوف احدها تاخذ بنظر الاعتبار مقاومه المنظومه وحسب المعادله (٧) و الاخرى تهمل مقاومه المنظومه وحسب المعادله (٨) وكما ياتي

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

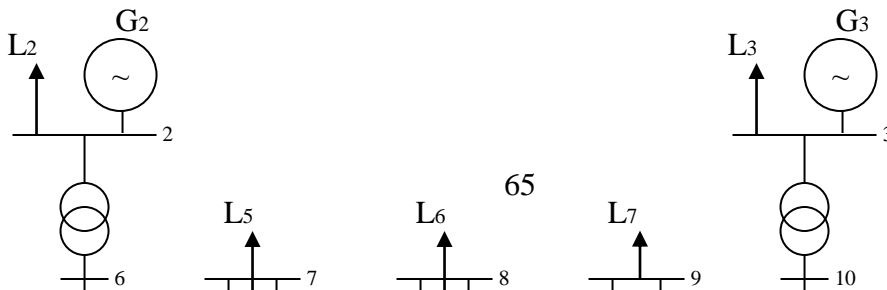
$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^2 + \sum_{i=1}^n P_{ai} (\tilde{\delta}_i^s - \tilde{\delta}_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} (\cos \tilde{\delta}_{ij}^s - \cos \tilde{\delta}_{ij}) \dots(8)$$

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

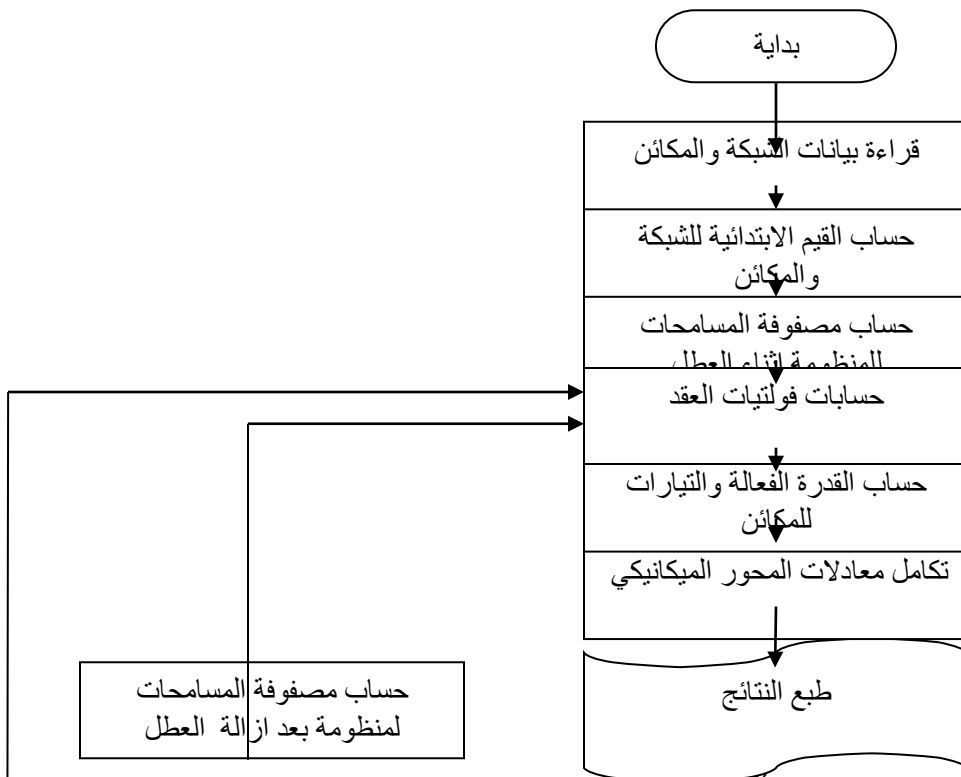
١. تكوين دالة ليينوف V .
٢. نحدد نقطة توازن الاستقرار لما بعد العطل من خلال حساب حدود الاستقرار (V₁).
٣. نكامل معادله المنظومه اثناء العطل وخلال كل تكامل نحسب دال ليينوف V .
٤. نقارن دالة ليينوف V مع V₁.
٥. عندما تتساوى دالة ليينوف V مع V₁ يتم تحديد زمن الازاله الحرج CCT [10,5].

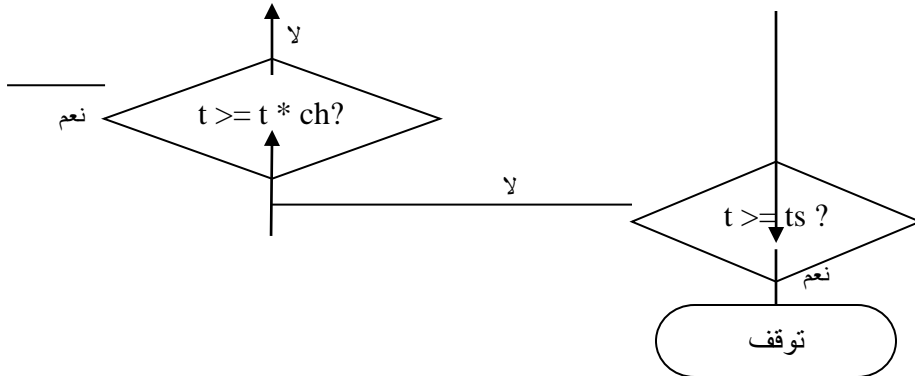
٢. طريقة ليينوف المستخدمة:-

تم استخدام طريقة ليينوف المباشرة وحسب المعادلات (7,8) 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 مكائن





الشكل (٢) مخطط كتلي مبسط يوضح تنظيم حسابات الأستقرارية .

٣. النتائج:

نتائج الدراسة كما مبين في الجداول (١) و(٢) و(٣).

جدول (١) زمن الازالة الحرج CCT بطريقتي ليبنوف والخطوة- خطوة .

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

جدول (٢) الزمن المستغرق للحل بطريقتي ليبنوف والخطوة-خطوة +

زمن الحل 'I's ثانيه بواسطه		المنظومه الاختباريه
طريقة ليبنوف	طريقة الخطوة-خطوة ++	منظومة تحوي خمسة مكائن
7	16	

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

جدول (٣) نسبة الخطأ في حساب زاوية الدوار δ حسب طرق الحل العددية

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

٤. المناقشة:

يبين الجدول(١) تقارب زمن الازاله الحرج CCT بين طريقة ليبنوف المباشرة وطريقة الخطوة – خطوة غير المباشرة.

ويبين الجدول (٢) تحقيق انخفاض واضح لزمن الحل من خلال تطبيق طريقة ليبنوف المباشرة لتقييم الاستقرارية العابرة لمنظومة القدرة.

وبين الجدول (٣) 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 اقل نسبة خطأ وهي الأقرب الى الحل الدقيق، وعلى ذلك تكون طريقة رانج – كوتا Runge – Kutta افضل طريقة تكامل عددي لحل المعادلات (٤) و (٥) التي وردت في الفقرة (٣).

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.