

## التقويم الكمي لتأثير التردد في مقاومات ومحارسات الخطوط الهوائية لنظم القدرة الكهربائية في ظروف التشغيل العابرة

د. غادة الدهيم<sup>(1)</sup>

### الملخص

الحالات العابرة في نظام القدرة الكهربائية هي العمليات التي تنشأ لدى تعرض النظام لاضطراب ما. وتصنف هذه الحالات العابرة حسب تردداتها إلى ثلاث مجموعات: الحالات العابرة الكهرومغناطيسية ومجالها الترددي يتراوح من 1 - 2 كيلو هرتز إلى 5-9 ميغا هرتز، والحالات العابرة الكهروميكانيكية ومجالها الترددي يتراوح بين الميغالي هرتز و1 هرتز، والحالات العابرة الكهرومغناطيسية ميكانيكية (ويمكن تسميتها بالحالات العابرة المختلطة) ومجالها الترددي يتراوح بين 1 و1000-2000 هرتز. ومن المعروف كيفياً أن مقاومات ومحارسات الخطوط الهوائية تتعلق بالتردد أكثر من أي عنصر آخر في النظام لدى أخذ الأرض بالحسبان، بينما يمكن اعتبار السعة غير متعلقة بالتردد وإهمال الناقلية التسريعية G.

يهدف هذا البحث إلى إنجاز التقويم الكمي (العددي) لتأثير التردد في مقاومات ومحارسات الخطوط الهوائية وأثر ذلك في النماذج الرياضية للخطوط الممثلة بمحددات مجمعة، والمعدة لحساب أداء نظام القدرة في حالة الحالات العابرة المختلطة. ويتضمن البحث إنجاز النموذج الرياضي والخوارزمية وتصميم برنامج حاسوبي في بيئة ماتلاب، وإجراء تطبيق عملي بوساطته وتحليل نتائج الحساب، علماً أن هذه البرامج غير متاحة في المنشورات العلمية المتوفرة. ويختتم البحث باستنتاجات مهمة ومفيدة في مجال تحليل الشبكات الكهربائية عموماً وتحليل الحالات العابرة بشكل خاص.

الكلمات المفتاحية: العمليات العابرة في نظم القدرة، الخطوط الهوائية، تبعية الممانعات للتردد، برنامج ماتلاب

<sup>(1)</sup> قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

## Quantitative Evaluation of Frequency Impact on Resistances and Inductances of Power System's Overhead Lines in Transient Operation Conditions

Dr. Ghada Aldahim<sup>(2)</sup>

### ABSTRACT

Transient processes in electrical power systems are processes that arise when a system is disturbed. These transients are classified according to their frequencies into three groups: electromagnetic transients with a frequency range from 1 to 2 kHz to a few MHz, electromechanical transients with a frequency range of 1 MHz to 1 Hz, electromagnetic transients mechanical (can be called mixed crossings) and their frequency range between 1 and 1000-2000 Hz. It is well known that overhead resistances and inductances relate to frequency more than any other element of the system when the earth is taken into account while amplitude can be considered non-frequency and negligent G.

This paper aims at quantitative (numerical) evaluation of the effect of frequency on the resistances and inductances of overhead lines and their effect on the mathematical models of lines represented by lamped parameters, designed to calculate the performance of the power system in the case of hybrid transits. The paper includes the formulation of the mathematical model and the algorithm, the design of a software program in the Matlab environment, the computing practical examples, and analysis of computation results. The paper concludes with conclusions which are useful for the analysis and design of electrical power systems in general and in transient cases in particular.

**Keywords:** Transient operations in power systems, Overhead lines, Frequency impedance dependency, Matlab program

---

<sup>(2)</sup> Department of Electrical Power Engineerin , Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Damascus University

## 1- مقدمة :

نانو ثانية إلى ميلي ثانية) ومجالها الترددي يتراوح من 1-2 كيلو هرتز إلى 5-9 هرتز.

### - الحالات العابرة الكهروميكانيكية

**Electromechanical Transients** : وتحدث في

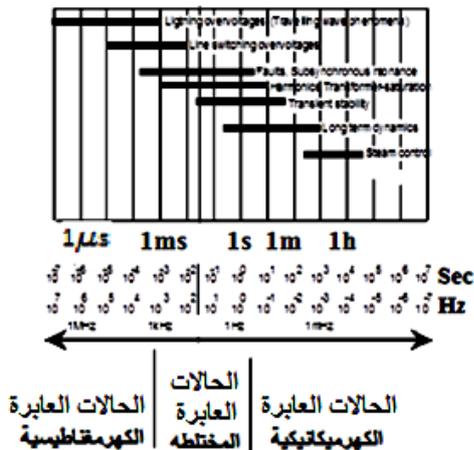
الآلات الكهربائية الدوارة وهي عوابر بطيئة من مرتبة الثانية (أي المجال ميلي ثانية إلى دقيقة) مثل تلك الناجمة عن تغيرات فجائية في الحمل، وعمل تجهيزات التحكم بصمام البخار للعنفة. المجال الترددي لهذه الحالات العابرة يتراوح بين الميلي هرتز والهرتز.

### - الحالات العابرة الكهرومغناطيسية الميكانيكية

**Electromagnetic Mechanical Transients Hybrid** (ويمكن تسميتها الحالات العابرة المختلطة

**Transients**) : وهي ظواهر متوسطة السرعة ومجالها

الزمني من مرتبة الميلي الثانية (أي المجال ميلي ثانية إلى ثانية) بترددات تتراوح بين 1 هرتز و1000-2000 هرتز. وتتدرج ضمن هذه المجموعة الحالات العابرة الناجمة عن فصل الحمل والأعطال وتأثير تجهيزات التحكم في الكميات الكهربائية للنظام... الخ. ويبين الشكل 1 المجالات الزمنية والترددية للعوابر المختلفة.



الشكل (1) المجالات الزمنية والترددية للحالات العابرة

يعمل نظام القدرة الكهربائية في ظروف عابرة شبه دائمة بسبب مكوناته الدوارة وغير الخطية وداراته التحكمية، حتى لو لم يتعرض لاضطراب ما. ولكن مع ذلك يمكن إجراء بعض الدراسات التحليلية لنظام القدرة بافتراض أنه يعمل في الحالة الثابتة steady state، أي باعتبار محدداته الفيزيائية المميزة ثابتة. وتُعمد حالة العمل الثابتة في دراسة جريان الحمل التي تُؤلف أساساً لدراسات أخرى كتقدير الحالة state estimation، وتحديد الوحدات unit commitment، وتقدير الأمان security assessment... الخ. وهي أيضاً ضرورية لتعيين حالة الشبكة قبيل إجراء دراسات الحالة العابرة. ولكي يتمكن من تخطيط نظام قدرة وتصميم أمثل فنياً واقتصادياً لابد من إجراء دراسات لأثر الاضطرابات التي يُحتمل أن يتعرض لها النظام مثل الأعطال، وعمليات الفصل والوصل، وضربات البرق، وفصل الأحمال وربطها... الخ. هذه الاضطرابات تؤدي إلى نشوء عمليات أو ظواهر عابرة (نسميها الحالات العابرة) transients في نظام القدرة. وتمتاز الحالات العابرة بوجود اهتزازات oscillations (قد تكون متخامدة أو متنامية) في منحنيات تيارات وتوترات الشبكة، ذات ترددات تتراوح بين الميلي هرتز وبضع ميغاهرتز حسب نوع الاضطراب الواقع على الشبكة وفترة استمراره. وتبعاً لهذه الترددات تصنف الحالات العابرة إلى ثلاث مجموعات [1]:

### - الحالات العابرة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Transients

وهي ذات طبيعة موجية، وأبرز مثال لها الحالات العابرة الناجمة عن ضربات البرق على خطوط القدرة. وهذه الحالات العابرة سريعة جداً إذ إن مجالها الزمني من مرتبة الميكرو ثانية (أي المجال

أخرى. لذلك من الأفضل أن يتم إنجاز برامج حاسوبية خاصة بالمسألة المدروسة.

انطلاقاً من هذه المبررات فقد هدف هذا البحث إلى إنجاز برنامج حاسوبي في بيئة ماتلاب Matlab مهمته التقويم الكمي (العددي) quantitative evaluation لتأثير التردد في مقاومات ومحارضات الخطوط الهوائية وأثر ذلك في النماذج الرياضية للخطوط الممثلة بمحددات مجموعة Lumped Parameters، والمعدة لحساب أداء نظام القدرة لأجل الحالات العابرة المختلطة. ويشمل البحث إنجاز المراحل اللازمة لتصميم البرنامج، وهي صياغة نموذج رياضي متكامل وخوارزمية مناسبة. ويتضمن البحث أيضاً حل تطبيق عملي بوساطة البرنامج المنجز وتحليل نتائج الحساب، وتجدر الإشارة إلى أن هذه البرامج غير متاحة في المنشورات العلمية المتوفرة، إذ إن الباحثين عادة لا يضمّنون برامجهم الحاسوبية في أبحاثهم المنشورة في المجلات العلمية. ويختتم البحث باستنتاجات مهمة ومفيدة في مجال تحليل الحالات العابرة لنظم القدرة الكهربائية.

## 2- النموذج الرياضي Mathematical Model

### :Model

ينكون النموذج الرياضي للمسألة المدروسة من المعادلات الرياضية التي تحسب مقاومات ومحارضات الخطوط الهوائية، وهي المقاومة المتبادلة والمحارضة المتبادلة لناقلين، وكذلك المقاومة الذاتية والمحارضة الذاتية لناقل ما وذلك لوحدة الطول وبأخذ وجود الأرض بالحسبان في جميع الأحوال، كمسار عودة للتيارات في ظروف التشغيل العابرة لنظام القدرة الكهربائية. تُولف الأرض ناقلاً محدود الناقلية بسبب تأثير التجاور Proximity effect، و أثر الحافة Skin effect [7][6]. يعتمد النموذج الرياضي المنجز بشكل رئيس على ثلاثة أسس رياضية: الأساس الأول: هو المعادلات الرياضية المعروفة لحساب

تمتاز العمليات العابرة بوجود اهتزازات عالية التردد (توافقيات في منحنيات التوتر والتيار مرافقة للاهتزازات ذات التردد الأساسي. وتتحدد ترددات هذه التوافقيات بوساطة محارضات وسعات عناصر نظام القدرة. ويتعلق مطال التوافقيات وزمن تخامدها بمحددات عناصر النظام (المقاومة والمحارضة والسعة والناقلية التسريعية، أي G, C, L, R على الترتيب). وتبين الدراسات المخبرية والميدانية والبحوث العلمية المنشورة أن ترددات الحالات العابرة المختلطة لا تتجاوز 2000 Hz .

يُفترض بتقريب مقبول أن محدّدات الخطوط تبقى ثابتة لأجل نماذج الخطوط المستخدمة في دراسة حالات التشغيل الثابتة لنظام القدرة الكهربائية. أما حالات التشغيل العابرة فتقتضي أخذ الأرض بالحسبان، الأمر الذي يجعل مقاومات ومحارضات الخطوط الهوائية تتغير حسب التردد أكثر من أي عنصر آخر في النظام، بينما يمكن اعتبار السعة غير متعلقة بالتردد وإهمال الناقلية التسريعية (G) leakage conductance [1].

لقد كان J. R. Carson أول من اقترح حسابات محارضات خط النقل التابعة للتردد باعتبار وجود الأرض كمسار عودة للتيارات [2]. تعطي طريقة Carson المحارضة متكامل خاص يتم حله على صورة متوالية لانتهائية. ونظراً للشكل المعقد للحل فقد حاول باحثون آخرون في وقت لاحق إيجاد حلول تقريبية أبسط [10-3]، وتوصلوا لنماذج رياضية تتفاوت بدرجة تعقيدها ووضوحها والمحددات التي تناولتها. ويوجد بعض البرمجيات التجارية مثل ATP/EMTP [11] التي يمكن استخدامها لحساب محدّدات الخطوط، ولكنها غير متوفرة مجاناً من جهة، وتحتاج إلى بذل جهد بحثي كبير مسبق لفهمها والتعامل معها بسبب كونها كبيرة الحجم ومتعددة الأغراض من جهة

و  $k$  من مركبتين: ممانعة المحارضة المتبادلة  $L_{ik}$  بين الناقلين وممانعة المسار الأرضي  $Z_{gm}$  التي تمثل مسار العودة لتيارات الناقلين،

$$Z_{ik} = j\omega L_{ik} + Z_{gm} \quad (1)$$

الحد الأول يجسد تأثير الحقل الكهرومغناطيسي في الهواء، وبحسب من أبعاد الخط، وعليه فهو غير تابع للتردد:

$$L_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ik'}}{D_{ik}} \quad (2)$$

حيث  $\mu_0$  ثابت النفاذية المغناطيسية في الخلاء ويساوي

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$$

أما الحد الثاني  $Z_{gm}$  فيجسد تأثير الناقلية المحدودة للأرض المتجانسة. وحسب Carson وبإهمال تيارات الإزاحة الكهربائية في الأرض نجد [8]:

$$Z_{gm} = R_{gm} + j\omega L_{gm} \quad (3)$$

$$R_{gm} = 4\omega \times 10^{-7} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 k_m \cos\theta + b_2 [(C_2 - \ln k_m) k_m^2 \cos 2\theta + k_m^2 \sin 2\theta] + b_3 k_m^3 \cos 3\theta - d_4 k_m^4 \cos 4\theta - \dots \right\} \quad (4)$$

$$L_{gm} = 4 \times 10^{-7} \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln k_m) + b_1 k_m \cos\theta - d_2 k_m^2 \cos 2\theta + b_3 k_m^3 \cos 3\theta - b_4 [(C_4 - \ln k_m) k_m^4 \cos 4\theta + k_m^4 \sin 4\theta] \right\}$$

المقاومات والمحارضات غير المتعلقة بالتردد للممانعة التسلسلية للخط الهوائي في الحالة الثابتة دون أخذ الأرض بالحسبان. والأساس الثاني: هو طريقة Carson (Carson's Method) الموضحة في [2] والتي لازالت تعدُّ الطريقة القياسية لحساب تأثير الأرض في الممانعة التسلسلية للخطوط الهوائية. والأساس الثالث: هو استخدام توابع بيسيل لحساب الممانعة الداخلية للنواقل. واختصاراً، سنكتفي بكتابة المعادلات النهائية اللازمة للحساب دون الخوض باشتقاقها.

## 1-2 الممانعة المتبادلة لناقلين باعتبار الأرض

### :Mutual Impedance

نفرض ناقلين  $i$  و  $k$  كما هو مبين في الشكل 2 حيث:  $i'$  و  $k'$  خيالات images الناقلين  $i$  و  $k$  على الترتيب،  $r =$  نصف القطر ويرمز له  $r_B$  إذا كان الناقل حزمياً

### ،Bundled Conductor

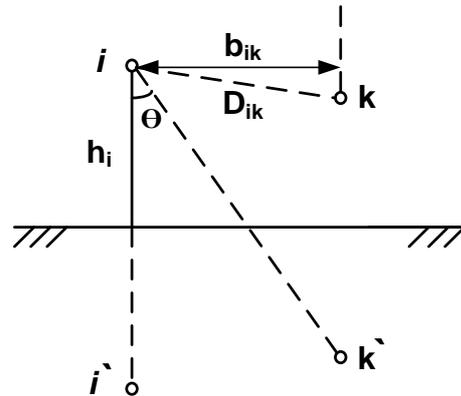
$h =$  ارتفاع الناقل عن الأرض،

$D_{ik} =$  المسافة بين الناقلين،

$b_{ik} =$  البعد الأفقي بين الناقلين،

$\rho_E =$  المقاومة النوعية للأرض،

$\theta =$  الزاوية بين  $i-i'$  و  $i-k'$ .



الشكل (2) الناقلان  $i$  و  $k$

تتألف الممانعة المتبادلة لوحدة الطول بين الناقلين  $i$

نستنتج من العلاقات أعلاه أن الممانعة المتبادلة لوحدة

الطول تتألف من: مقاومة تابعة للتردد  $R_{gm}$ ، ومحارسة

غير تابعة للتردد  $L_{ik}$ ، ومحارسة تابعة للتردد  $L_{gm}$ .

2-2 الممانعة الذاتية لدارة ناقل - أرض Self

### : Impedance

تتألف الممانعة الذاتية لوحدة الطول  $Z_{kk}$  لناقل k مع

اعتبار الأرض من ثلاث مركبات: ممانعة المحارسة

الذاتية  $L_{kk}$  بافتراض كلا الناقل والأرض موصلين جيدين

Perfect Conductors، والممانعة الداخلية  $Z_C$  لناقل،

وممانعة الأرض  $Z_g$  أي :

$$Z_{kk} = j\omega L_{kk} + Z_C + Z_g \quad (14)$$

حيث:

$$L_{kk} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_k}{r_k} \quad (15)$$

وهي لا تتعلق بالتردد.

تحسب الممانعة الداخلية  $Z_C$  لناقل k بشكل تقريبي

بافتراض الناقل مصمماً بمساعدة توابع بيسيل وفقاً للعلاقات

الآتية [10-8]:

$$Z_C = R_C + j\omega L_C \quad (16)$$

$$R_C = 0.74 R_{dc} \sqrt{m+1} \quad (17)$$

حيث  $R_{dc}$  مقاومة الناقل للتيار المستمر لوحدة الطول

وتعطى بالعلاقة:

$$+ \dots \} \quad (5)$$

حيث:

$$b_1 = \frac{\sqrt{2}}{6}, \quad b_2 = \frac{1}{16}, \quad b_i = b_{i-2} \frac{\text{sign}}{i(i+2)} \quad (6)$$

$\text{sign} = +1$  لأجل  $i = 1, 2, 3, 4$

$\text{sign} = -1$  لأجل  $i = 5, 6, 7, 8$

$$C_i = C_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2}, \quad (7)$$

$$C_2 = 1.3659315, \quad (8)$$

$$d_i = \frac{\pi}{4} b_i. \quad (9)$$

$$k_m = 4\pi\sqrt{5} \times 10^{-4} D'_{ij} \sqrt{f/\rho} \quad (10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{b_{ik}}{h_i + h_k} \right) \quad (11)$$

وعليه:

$$Z_{ik} = R_{gm} + j\omega(L_{ik} + L_{gm})$$

$$= R_M + j\omega L_M \quad (12)$$

حيث  $R_M$  المقاومة المتبادلة و  $L_M$  المحارسة

المتبادلة:

$$R_M = R_{gm}; \quad L_M = L_{ik} + L_{gm} \quad (13)$$

$$R_S = R_C + R_g; L_S = L_{kk} + L_C + L_g \quad R_{dc} \quad (26) = \frac{\rho_k}{\pi r_k^2} \quad (18)$$

نستنتج من العلاقات أعلاه أن جميع حدود الممانعة الذاتية تابعة للتردد ماعدا  $L_{kk}$ .

$$= 0.74 R_{dc} \sqrt{m-1} \quad L_C \quad (19)$$

2-3 ممانعات خط هوائي ذي  $n$  ناقل باعتبار الأرض لأجل خط هوائي مؤلف من  $n$  ناقلا تكون معادلة الممانعة التسلسلية له معادلة مصفوفية Matrices

$$m = \sqrt{1 + \frac{r_k^4}{2^4} \left( \frac{\omega \mu_k}{\rho_k} \right)^2} \quad (20)$$

:equation

$$[Z] = [Z_{air}] + [Z_{ground}] + [Z_{internal}] = [R(\omega)] + j\omega[L + L(\omega)] \quad (27)$$

حيث الكميات ضمن القوسين [ ] تمثل مصفوفات أبعاد كل منها  $n \times n$ . المصفوفة  $[Z_{air}]$  تمثل الحقل الكهرطيسي في الهواء وهي غير تابعة للتردد، والمصفوفة  $[Z_{ground}]$  تجسد تأثير الأرض، وتحسب عناصرها بمساعدة تكاملات كارزون المشار إليها في متن البحث. أما المصفوفة  $[Z_{internal}]$  فهي مصفوفة قطرية تمثل الممانعة الداخلية للنواقل.

وعليه فكلا المقاومة الداخلية  $R_C$  والمحاورة الداخلية  $L_C$  تابعتان للتردد.

المركبة الثالثة للممانعة الذاتية هي ممانعة الأرض  $Z_g$ :

$$Z_g = R_g + j\omega L_g \quad (21)$$

$$R_g = 4\omega \times 10^{-7} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 k + b_2 [(C_2 - \ln k)k^2] + b_3 k^3 - d_4 k^4 - \dots \right\}, \quad (22)$$

$$L_g = 4\omega \times 10^{-7} \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln k) + b_1 k - d_2 k^2 + b_3 k^3 - b_4 [(C_4 - \ln k)k^2] + \dots \right\}, \quad (23)$$

$$k = 4\pi\sqrt{5} \times 10^{-4} (2h_i) \sqrt{f\rho} \quad (24)$$

وعليه:

$$Z_{kk} = R_C + R_g + j\omega(L_{kk} + L_C + L_g) = R_S + j\omega L_S \quad (25)$$

حيث  $R_S$  المقاومة الذاتية، و  $L_S$  المحاورة الذاتية:

### 3- الخوارزمية Algorithm :

انطلاقاً من النموذج الرياضي المنجز، تم بناء خوارزمية مناسبة لدراسة تأثير التردد في حساب مركبات الممانعة التسلسلية للخطوط الهوائية تمهيداً لتشكيل الدارة المكافئة للخط الهوائي (موديل الخط) التي يتعين استخدامها في دراسة حالات التشغيل العابرة لنظام القدرة الكهربائية. يبين الشكل 3a المخطط الانسيابي للخوارزمية المنجزة.

تأسيساً على النموذج الرياضي والخوارزمية، تم تصميم برنامج حاسوبي في بيئة ماتلاب Matlab و يتكون البرنامج من: وحدة الدخل Input unit، ووحدة الحسابات Computing unit، ووحدة الخرج Output unit، و يبين الملحق البرنامج ونتائج الحسابات على صورة جدول. لقد تم التثبيت من صحة البرنامج من خلال حل أمثلة نموذجية

c	12.527
p	35.727

الأبعاد الأفقية للنواقل بافتراض الطور b الواقع في أقصى اليسار هو مبدأ القياس:

a: 3360 mm, c: 7720 mm,  
p: 3360 mm

	ACSR	R cm	$\rho_{Al}$ $\Omega.m$	R $\Omega/km$
a, b, c	3X380/5 0	1.35	0.028	0.0757
p	1X210/5 0	1.05	0.028	0.136

$$\rho_E = 100 \Omega m$$

المسافة البينية لنواقل الحزمة: q = 50 cm

وعليه فنصف القطر المكافئ للنواقل الحزمي  $r_B$

$$r_B = \sqrt[3]{r \times q^2} = 15 \text{ cm}$$

والمطلوب استخدام برنامج ماتلاب المنجز لحساب الممانعة المتبادلة  $Z_{ik}$  للطورين b و c والممانعة الذاتية  $Z_{kk}$  للطور c لأجل الترددات من 20Hz إلى 20kHz بهدف تمثيل علاقة المقاومات والمحارضات بالتردد بهدف التوصل لاستنتاجات عامة تسهم في تصميم نموذج الخط الهوائي لدراسة الحالات العابرة لنظام القدرة الكهربائية.

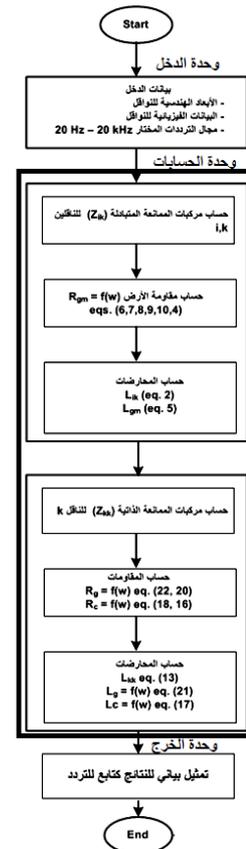
#### 5- نتائج الحساب وتحليلها

تم حساب الممانعات الذاتية والمتبادلة لوحدة الطول من الخط للترددات 20 Hz إلى 20 kHz بواسطة برنامج الحاسوب المنجز، وقد تم الحصول على النتائج العائدة للمقاومات والمحارضات لكلا الممانعات المتبادلة والممانعات الذاتية. وفيما يأتي تحليل النتائج الحاصلة.

#### 5-1 تحليل نتائج حساب المقاومات :

• تتزايد المقاومة  $R_{gm}$  للممانعة المتبادلة بشكل غير خطي (أسي تقريبا) مع التردد كما هو مبين في الشكل 4،

بوساطته وتحليل النتائج ومناقشتها. وتجدر الإشارة إلى أن إيجاد محددات الخطوط الهوائية لا يتم إلا حسابيا، ومن ثم لا توجد طرق مخبرية لهذا الغرض. أما التثبت من صحة البرنامج فيكون أولا من خلال توصله لنتائج، أي Run ناجح دون أخطاء برمجية، وثانيا من خلال تحليل النتائج واستنتاج منطقيتها.



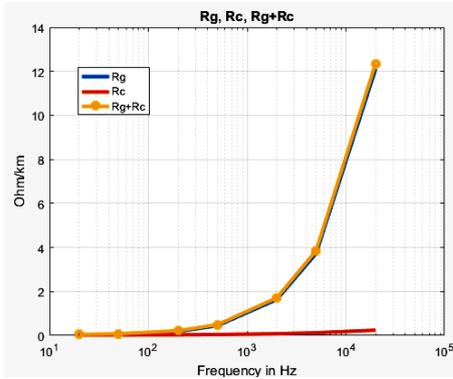
الشكل (3) المخطط الانسيابي للخوارزمية

#### 4- تطبيق عملي :

خط نقل ثلاثي الطور 380 ك ف مكون من الأطوار a, b, c المؤلف من نواقل حزمية ثلاثية، ومن الناقل الحياضي p بالأبعاد الآتية [1]:

	الارتفاع الوسطي للنواقل عن الأرض h [m]
a	20.927
b	12.527

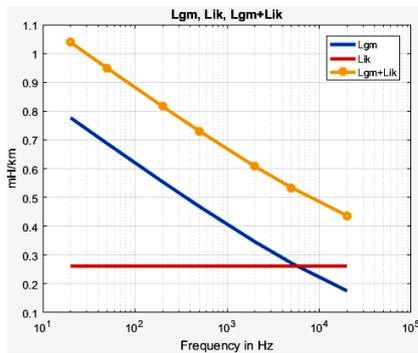
الشكل (6) تغير المقاومة الداخلية للناقل RC مع التردد إن معدل تزايد هذه المقاومة أقل بكثير من معدل تزايد  $R_g$  كما يبين الشكل 7. وتجدر الإشارة إلى أننا إذا استخدمنا قيمة ثابتة للمقاومة  $R_C$  وهي قيمتها عند التردد 50 هرتز بدلاً من اعتبار قيمها المقابلة للتردد الواقعي فإن الخطأ الحاصل في حساب المقاومة الاجمالية للممانعة الذاتية لا يتعدى 3.3%. لذلك يمكن إهمال تبعية مقاومة الناقل الداخلية  $R_C$  للترددات الأكبر من 50 Hz.



الشكل (7) المقاومتان  $R_g$  و  $R_c$  للممانعة الذاتية كتابع للتردد

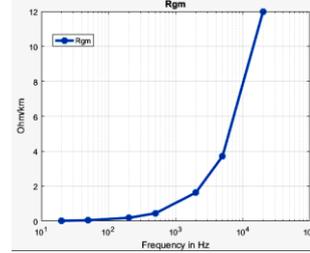
2-5 تحليل نتائج حساب المحاضرات :

• يبين الشكل 8 أن إحدى محاضرتي الممانعة المتبادلة ثابتة ( $L_{ik}$ )، أما الأخرى وهي  $L_{gm}$  فتتناقص خطياً مع ارتفاع التردد حيث تنقص إلى النصف تقريباً بين التردد 50 إلى 2000 هرتز.



الشكل (8) المحاضرتان  $L_{gm}$  و  $L_{ik}$  للممانعة المتبادلة

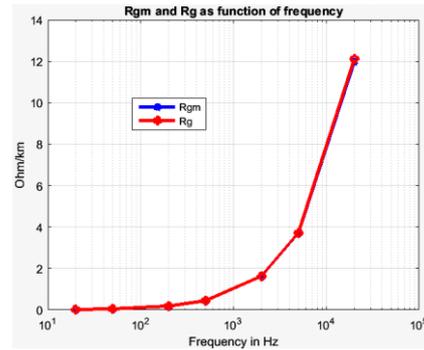
فقيمتها لأجل التردد 2000 هرتز تساوي 34.1 مرة قيمة المقاومة لأجل التردد 50 هرتز.



الشكل (4) المركبة الحقيقية للممانعة المتبادلة

كتابع للتردد

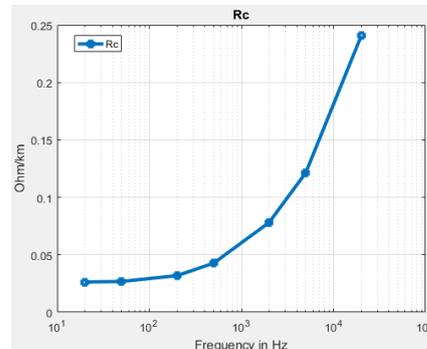
• كما نلاحظ أن تغير المقاومة  $R_g$  للممانعة الذاتية تبعا للتردد (الشكل 5) يتطابق تقريباً مع منحنى  $R_{gm}$  للممانعة المتبادلة، وبتعبير أدق فإن قيم  $R_g$  أكبر دوماً من قيم  $R_{gm}$  بحوالي 1% كحد أقصى.



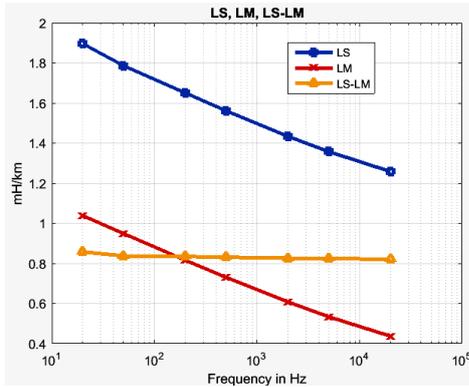
الشكل (5) علاقة  $R_{gm}$  للممانعة المتبادلة و  $R_g$

للممانعة الذاتية كتابع للتردد

• المقاومة الداخلية للناقل  $R_C$ ، والتي هي المركبة الثانية لمقاومة الممانعة الذاتية، ترتفع بشكل ملحوظ لأجل ترددات أعلى من 200 هرتز (الشكل 6).



الإجمالية  $L_S$  هما مستقيمان (تقريباً) متوازيان لأجل الترددات 50 هرتز فما فوق. أي أن الفرق بينهما ثابت تقريباً بانحراف لا يتجاوز 2%، وهذا يعني بتقريب مقبول أن فرق المحارستين لا يتعلق بالتردد.

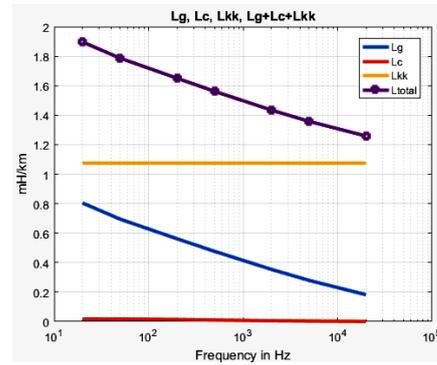


الشكل (11) المحارسة الذاتية الإجمالية والمحارسة المتبادلة الإجمالية وتفاضلها

#### 6- استنتاجات Conclusions :

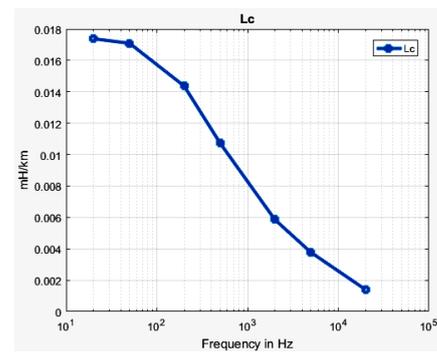
- ❖ تم إنجاز النموذج الرياضي الكامل والموسع للتقويم الكمي لتأثير التردد في مقاومات ومحارسات الخطوط الهوائية بما فيه تكاملات Carson وتوابع بيسيل.
- ❖ تم تطوير خوارزمية الحل وتصميم برنامج حاسوبي في بيئة ماتلاب لحل المسألة المدروسة وإجراء تطبيقات عملية بوساطته وتحليل نتائج الحساب، علماً أن البرنامج المنجز غير متوفر في المنشورات العلمية.
- ❖ تتساوى تقريباً، وبفرق لا يتجاوز 1%، قيم مقاومتي الأرض  $R_{gm}$  و  $R_g$  للممانعة المتبادلة والممانعة الذاتية على الترتيب وتتزايدان رأسياً مع تزايد التردد. التفسير الفيزيائي لتساوي المقاومتين الأرضيتين هو أن الأرض هي مسار عودة سواء كان هناك ناقلان ( $R_{gm}$ ) أو ناقل واحد ( $R_g$ ).
- ❖ بخصوص الممانعة الذاتية للناقل، على الرغم من تزايد المقاومة الداخلية  $R_C$  رأسياً وتناقص المحارسة الداخلية  $L_C$  بشكل شبه خطي مع تزايد التردد، فيمكن

- يوضح الشكل 9 تبعية محارسات الممانعة الذاتية للتردد حيث:
  - $L_{kk}$  ثابتة دوماً.
  - تتناقص  $L_g$  خطياً مع تزايد التردد بميل يطابق تقريباً ميل تناقص  $L_{ik}$  وبقيم أعلى بحوالي 3% كحد أقصى.



الشكل (9) محارسات الممانعة الذاتية كتابع للتردد

- المحارسة الداخلية  $L_C$  تهبط مع تزايد التردد (الشكل 10) بشكل شبه خطي، ويمكن إهمال تبعيتها للتردد واعتماد قيمتها لأجل التردد 50 هرتز ولا يتجاوز الخطأ عندها في حساب المحارسة الإجمالية للممانعة الذاتية 2%.



الشكل (10) المحارسة الداخلية للناقل  $L_C$  كتابع للتردد

- يبين الشكل 11 نتيجة مهمة وهي أن منحنى تغير المحارسة المتبادلة الإجمالية  $L_M$  وتغير المحارسة الذاتية

إهمال تبعيتهما للتردد واعتماد قيمهما لأجل 50Hz في حساب المقاومة الإجمالية بخطأ أعظمي 3.3% وحساب المحارضة الإجمالية بخطأ أعظمي 2%. التفسير الفيزيائي هو: المقاومة الإجمالية للممانعة الذاتية تساوي مجموع المقاومة الداخلية والمقاومة الأرضية؛ المقاومة الداخلية تزداد مع تزايد التردد بسبب أثر الحافة Skin effect ولكن قيمها لأجل الترددات الأعلى من 50 هرتز لا تختلف بأكثر من 3%. وكذلك المحارضة الإجمالية تتألف من المحارضة الذاتية الثابتة مع التردد (لأن الفيض المغناطيسي يشبك الهواء خارج الناقل)، والمحارضة الأرضية المتناقصة مع تزايد التردد (بسبب أثر الحافة وأثر التجاور Proximity effect للأرض)، والمحارضة الداخلية المتناقصة أيضاً مع تزايد التردد (بسبب أثر الحافة حيث التيار يبتعد عن مركز الناقل كلما ارتفع التوتر، ومن ثم يقل الفيض المغناطيسي المتشابك مع داخل الناقل). قيم المحارضة الداخلية لأجل الترددات الأعلى من 50 هرتز لا تختلف أكثر من 2%.

❖ إن الفرق بين المحارضة الإجمالية الذاتية والمحارضة الإجمالية المتبادلة ثابت تقريباً لأجل الترددات كافة بانحراف لا يتعدى 2%.

❖ إن افتراض ثبات مقاومات ومحارضات الخطوط الهوائية في دراسة حالات التشغيل الثابتة Steady state وشبه الثابتة لنظام القدرة الكهربائية، يؤدي إلى نتائج بعيدة عن الواقع عندما يتعلق الأمر بنمذجة الحالات العابرة لنظام القدرة الكهربائية.

### مسرد المصطلحات:

Steady state	الحالة الثابتة
State estimation	تقدير الحالة
Unit commitment	تحديد الوحدات
Security assessment	تقدير الأمان
transients	العواير
Electromagnetic Transients	العواير الكهرومغناطيسية
Electromechanical Transients	العواير الكهروميكانيكية
Electromagnetic Mechanical Transients	العواير الكهرومغناطيسية الميكانيكية
Mathematical Model	النموذج الرياضي
Proximity effect	تأثير التجاور
Skin effect	أثر الحافة
Mutual Impedance	الممانعة المتبادلة
Mutual resistance	المقاومة المتبادلة
Mutual inductance	المحارضة المتبادلة
Self-Impedance	الممانعة الذاتية
Self resistance	المقاومة الذاتية
Self inductance	المحارضة الذاتية
Algorithm	الخوارزمية

## References

1. B. Oswald, D. Siegmund, Calculation of transients in electrical power systems, ©2009, German Press
2. J. R. Carson, "Wave Propagation in overhead wires with ground return", Bell System Technical Journal 1996, 5, 539-554.
3. Deri A., et al, " The complex ground return plane: A simplified model for homogeneous and multi-layer Earth return", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8, August 1981
4. Tevan G, Deri A., "Some remarks about the accurate evaluation of the Carson integral for mutual impedances of lines with earth return", Archiv fur Electrotechnik 67, by Springer-Verlag 1984
5. Rachidi F., " Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999
6. Juan A. Martinez-Velasco, Power System Transients: Parameter Determination, ©2010 CRC Press ISBN: 978-1-4200-6529-9
7. Juan A. Martinez-Velasco, Transient Analysis of Power Systems: Solution Techniques, Tools and Applications, © 2015 John Wiley & Sons, Ltd
8. Yaw-Juen Wang and Shi-Jie Liu, "A Review of Methods for Calculation of Frequency-dependent Impedance of Overhead Power Transmission Lines, IEEE vol. 25, No. 6, 2001, pp 329-338.
9. Vințan M., Miha P. I., Borlea I., "Ac Power Lines Impedances Computational Methods", Journal of Sustainable Energy Vol. II, No. 2, June, 2011
10. David W. Knight, "Practical continuous functions for the internal impedance of solid cylindrical conductors", 2016, <https://pdfs.semanticscholar.org/17a7/f6bb20e548820b9b9836ad2a22620cddc32f.pdf>
11. Hussein Umarji, Calculation of Parameters of Overhead Power Lines, [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455925/Resumo\\_ingles.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455925/Resumo_ingles.pdf)

Received	2019/11/3	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2019/12/12	قبول البحث للنشر