

النمذجة الحاسوبية لخطوط النقل الكهربائية في ظروف التشغيل العابرة باستخدام نظرية الموجات المسافرة

الدكتورة غادة الدهيم⁽¹⁾

المُلخَص

تتم دراسة أنظمة القدرة الكهربائية بواسطة عدة طرق أهمها النمذجة والمحاكاة التي تستخدم كأدوات لتمثيل هذه الأنظمة في بيئة افتراضية. والطريقة الأكثر شيوعاً هي تمثيل النظام بواسطة نموذج رقمي (حاسوبي) يتألف من ثلاثة مكونات هي المعادلات الرياضية الجبرية والتفاضلية، وخوارزميات الحل، والبرنامج الحاسوبي. ولكي يتم بناء موديل (نموذج) حاسوبي لنظام القدرة بأكمله، لا بد من بناء موديلات للعناصر التي يتكون منها، ومنها الخطوط التي تعد مكوناً أساسياً للنظام. وتعد نظرية الموجات المسافرة على الخطوط من أهم التقانات المستخدمة في نمذجة الخطوط والتي تناسب دراسة الحالات العابرة في نظم القدرة الكهربائية.

يهدف هذا البحث إلى بناء دارة مكافئة موجية للخط انطلاقاً من المعادلات التفاضلية الجزئية المعروفة للخط وإنجاز خوارزمية مطورة وترجمتها إلى برنامج حاسوبي لنمذجة ومحاكاة الموجات المسافرة على خط النقل وذلك لدراسة الحالات العابرة لنظام القدرة الكهربائية. ويتضمن البحث إنجاز النموذج الرياضي والخوارزمية وتصميم برنامج حاسوبي في بيئة ماتلاب وإجراء تطبيق عملي بواسطته وتحليل نتائج الحساب. والجدير بالذكر أن الخوارزميات المنجزة والبرنامج المصمم والمنفذ غير متوفرة في المنشورات العلمية المتاحة. ويختتم البحث باستنتاجات هامة ومفيدة في مجال تحليل الشبكات الكهربائية عموماً وتحليل الحالات العابرة بشكل خاص.

الكلمات المفتاحية: نموذج حاسوبي لخطوط النقل الكهربائية، الموجات المسافرة، الدارة المكافئة الموجية، الخزان الموجي،

برنامج ماتلاب

⁽¹⁾ قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

Computer modeling of electrical transmission lines under transient operating conditions using traveling wave theory

Dr. Ghada Aldahim⁽¹⁾

Abstract

Electrical power systems are studied through several methods, the most important of which is modeling & simulation, which are used as tools to represent these systems in a virtual environment. The most popular method is the representation of the system by a numerical (computer) model consisting of three components: algebraic and differential mathematical equations, solution algorithms, and a computer program. In order to build a computer model (model) for the entire power system, models of the components that make it up must be built, including the lines that are an essential component of the system. The theory of traveling waves on the lines is one of the most important techniques used in modeling lines that are suitable for studying transient operation conditions in electrical power systems.

This paper aims to build an equivalent wave-line circuit based on the known partial differential equations of the line and to implement a developed algorithm and translate it into a computer program for modeling and simulating the waves traveling on the transmission line in order to study the transient states of the electrical power system. The research includes completing the mathematical model and algorithm, designing a computer program in the Matlab environment, making a practical application using it, and analyzing the calculation results. Notably, the completed algorithms and the designed and executed program are not available in the scientific publications. The research concludes with important and useful conclusions in the field of electrical network analysis in general and transient case analysis in particular.

Key words: Computer Model for Electric Transmission Lines, Traveling Waves, Wave equivalent circuit, Wave storage, MATLAB Program

(1) Department of Electrical Power Engineering – Faculty of Mechanical & Electrical Engineering – Damascus University

1- المقدمة

النماذج مفيدة فقط لدراسة وتحليل استجابة الحالة الثابتة Steady state للخط. في حالة اهتمامنا بدراسة السلوك العابر له، فإن هذه النماذج ليست مفيدة لأن محددات الخط Line parameters ليست مجمعة في الواقع، بل موزعة بشكل غير منتظم على طول الخط بالكامل. لأجل التحليل العابر، من المهم جداً اعتبار توزع محددات الخط مثل السعة التفرعية و المحارضة والمقاومة وبالتالي يجب مراعاة تأثيرها [6]. ترجع أهمية دراسة الحالات العابرة للخطوط بشكل أساسي إلى التأثيرات التي يمكن أن تحدثها الاضطرابات على أداء النظام أو الأعطال التي يمكن أن تسببها لمعدات النظام. الإجهادات التي يمكن أن تتلف هذه المعدات هي التيارات الزائدة Overcurrents والتوترات الزائدة Overvoltages التي تخدم خصوصاً في تصميم تجهيزات الحماية.

ويمكن أن تتم عملية النمذجة في حيز التردد Frequency domain كما في [7] أو في حيز الزمن Time-Domain. وتعد تقانة الموجات المسافرة Travelling waves على الخطوط من أهم التقانات المستخدمة في نمذجة الخطوط والتي تناسب دراسة الحالات العابرة في نظم القدرة الكهربائية. الموجات المسافرة على خط النقل هي موجات التوتر/ التيار التي تنتشر من نهاية الخط من جهة المنبع إلى نهاية الخط من جهة الحمل وبالعكس أثناء الحالة العابرة. تسافر هذه الموجات على طول الخط بالاتجاهين بسرعة تساوي سرعة الضوء إذا تم إهمال ضياعات الخط. ولكن من الناحية العملية، يوجد دائماً بعض الضياعات في الخط، وبالتالي تنتشر هذه الموجات على طول الخط بسرعة أقل إلى حد ما من سرعة الضوء [9][8].

بعض الباحثين مثل [10] قام بدراسة لحساب عدد دارات p المربوطة على التسلسل التي تحقق دقة تمثيل الخط

تتم دراسة أنظمة القدرة الكهربائية بواسطة عدة طرق أهمها النمذجة والمحاكاة Modeling & Simulation التي تستخدم كأدوات لتمثيل هذه الأنظمة في بيئة افتراضية. ثمة نوعان من النماذج (الموديلات) هما النموذج الفيزيائي Physical model والنموذج الرقمي Digital model [1]. يكون النموذج الفيزيائي مشابهاً للنظام الحقيقي ولكن بمقياس أصغر بحيث تُمثل فيه كميات النظام بالكميات الفيزيائية ذاتها للنظام الأصلي. ويؤلف موديل نظام القدرة الكهربائية الموجود في مخابر قسم هندسة الطاقة الكهربائية مثالا على هذا النموذج الفيزيائي. على الرغم من ميزة هذه الطريقة في إبراز فيزيائية النظام المطلوب دراسته، فهناك بعض السلبيات التي تجعل استخدام النموذج الفيزيائي غير مجدٍ. حيث يحتاج بناء النموذج الفيزيائي إلى دراسة مسبقة للنظام الأصلي كما يحتاج إلى كلفة ملحوظة للتجهيزات والكادر البشري والنفقات الجارية والزمن، بالإضافة إلى أنه لا تتوفر دائماً الامكانية لتغييرات في بنية النموذج وفي محدداته دونما تبديل بعناصره مما يتطلب وقتاً وقطعاً تبديلية.

والطريقة الأخرى الأكثر شيوعاً هي تمثيل النظام بواسطة نموذج رقمي (حاسوبي) يتألف من ثلاثة مكونات هي المعادلات الرياضية الجبرية والتفاضلية، وخوارزميات الحل، والبرنامج الحاسوبي. ويكون لمتحولات النموذج الرقمي نفس الأداء الزمني لمتحولات النظام الحقيقي Real-world system [2-5].

ولكي يتم بناء موديل (نموذج) حاسوبي لنظام القدرة بأكمله، لا بد من بناء موديلات للعناصر التي يتكون منها، ومنها الخطوط التي تعد مكوناً أساسياً للنظام.

نحن نعلم أن خط النقل القصير وخط النقل المتوسط تتم دراستهما بواسطة نماذج (دارات مكافئة) T أو p. لكن هذه

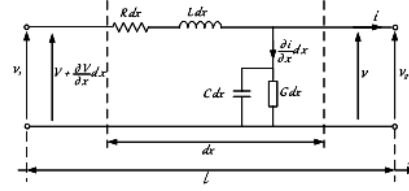
بالموجات المسافرة؛ ولكن هذا الأمر يقتصر على نطاق ترددي معين.

هدف هذا البحث هو بناء دارة مكافئة موجية للخط انطلاقاً من المعادلات التفاضلية الجزئية المعروفة للخط وإنجاز خوارزمية مطورة وترجمتها إلى برنامج حاسوبي لنمذجة ومحاكاة الموجات المسافرة على خط النقل وذلك لدراسة الحالات العابرة لنظام القدرة الكهربائية.

2- التمثيل الموجي لخط النقل [11][12]

1-2 المعادلات التفاضلية الجزئية

لنعتبر خطاً أحادي الطور محدداته لوحدة الطول: R و L و C و G ونرسم الدارة المكافئة لعنصر تفاضلي من الخط طوله dx كما هو موضح في الشكل 1.



الشكل (1) عنصر تفاضلي dx من الخط

بتطبيق قانوني كيرشوف على الدارة المكافئة السابقة نحصل على المعادلات التفاضلية الجزئية التالية [11]:

- هبوط التوتر عبر dx :

$$\frac{\partial v}{\partial x} dx = - \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) dx \quad (1)$$

- والتيار التفرعي:

$$\frac{\partial i}{\partial x} dx = - \left(C \frac{\partial v}{\partial t} + Gv \right) dx \quad (2)$$

بالتقسيم على dx وإهمال الضياعات في الخط (أي إهمال المقاومة R و الناقلية التسريبية G لوحدة الطول من الخط) [13] نحصل على:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (4)$$

نشتق (3) بدلالة x و (4) بدلالة t فنجد:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (6)$$

من (5) و (6) نجد:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (7)$$

نشتق (3) بدلالة t و (4) بدلالة x فنحصل على

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3')$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} \quad (4')$$

من 3' و 4' نجد:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (8)$$

المعادلتان (7) و (8) هما المعادلتان الموجيتان للخط عديم الضياع، والحل العام لهاتين المعادلتين حسب d' Alambert هو:

$$v(x, t) = v_F(x - st) + v_B(x + st) \quad (9)$$

$$Zi(x, t) = v_F(x - st) - v_B(x + st) \quad (10)$$

حيث سرعة انتشار الموجة (السرعة الموجية) s والممانعة المميزة (الممانعة الموجية) Z كما يلي:

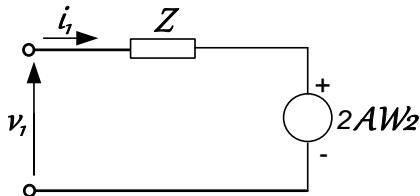
$$s = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad [m/s] \quad (11)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad (12)$$

حيث تقاس L بالهنري $[H]$ و C بالفاراد $[F]$ وحيث:

$$v_F = \text{Forward travelling wave}$$

الموجة المسافرة بالاتجاه الأمامي (الموجب)



الشكل (3) الدارة المكافئة للعقدة 1 من الخط

لأجل الطرف 2 من الخط يكون:

$$x = l; v(0, t) = v_2; i(l, t) = i_1(t)$$

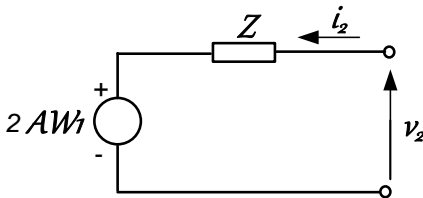
$$v_2(t) = W_2(t) + AW_1(t) \quad (16)$$

$$Zi_2(t) = W_2(t) - AW_1(t) \quad (17)$$

بطرح المعادلتين (16) و (17) من بعضهما البعض نجد:

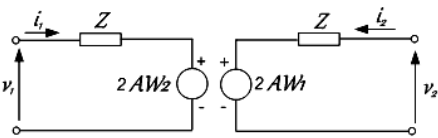
$$v_2(t) - Zi_2(t) = 2AW_1(t) \quad (18)$$

ويمكن تمثيل هذه المعادلة بدارة مكافئة كما يلي:



الشكل (4) الدارة المكافئة للعقدة 2 من الخط

وتكون الدارة المكافئة الموجية للخط كما في الشكل 5.



الشكل (5) الدارة المكافئة الموجية لخط النقل

2-3 حساب الموجات القادمة إلى طرفي الخط (AW)

في الخط الحقيقي تكون الضياعات والسرعة الموجية تابعة للتردد، ما يعني أن الموجات المسافرة تعاني من إخماد damping (أي تناقص قيمتها) وتشوه distortion (أي حصول توافقيات). وعليه فإن حدة صعود الموجة وانحدارها تخف أثناء سيرها على طول الخط. في هذا البحث سنهمل التشوه الذي يصيب الموجات، ما يعني أننا ندرس حالات هي أخطر من الحالات الحقيقية. وعليه فإن النمذجة المقترحة تعطي نتائج أشد من الحالات القائمة فعلاً وبذلك نبقي في مجال الأمان في تحليل الحالات العابرة على الخطوط.

$$v_B = \text{Backward travelling wave}$$

الموجة المسافرة بالاتجاه العكسي (السالب)

وتحسب v_F و v_B باستخدام الشروط الحدية والابتدائية للخط.

2-2 الدارة المكافئة الموجية لخط النقل

Wave equivalent circuit

بعد أن أوجدنا معادلتين موجة التوتر وموجة التيار للخط

في العلاقتين (9) و (10) نستخرج الآن الدارة المكافئة الموجية

لخط النقل، وبدلاً من الرمزين v_F و v_B نستخدم الرمز W .

تسافر موجة توتر W_1 من بداية خط النقل لتصل بعد زمن

قدره $T = \frac{l}{s}$ إلى نهاية الخط وتصبح AW_1 حيث l طول

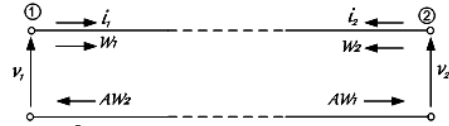
الخط و s السرعة الموجية. الرمز AW يعني أن موجة التوتر

W قد طوت زمناً T لذلك فهي تدعى موجة قادمة Arrived.

الموجة AW_1 تحرر موجة عائدة نسميها W_2 لتصل إلى بداية

الخط وندعوها AW_2 . ويوضح الشكل 2 خط النقل والموجات

الذاهبة والعائدة.



الشكل (2) خط نقل عديم الضياع

نطبق الشروط الحدية على الحل العام لأجل العقدة 1 في

الزمن t :

$$x = 0; v(0, t) = v_1(t); i(0, t) = i_1(t)$$

وعليه يكون:

$$v_1(t) = W_1(t) + AW_2(t) \quad (13)$$

$$Zi_1(t) = W_1(t) - AW_2(t) \quad (14)$$

ويعطى المعادلتين (13) و (14) ينتج:

$$v_1(t) - Zi_1(t) = 2AW_2(t) \quad (13)$$

ويمكن تمثيل هذه المعادلة بالدارة المكافئة كما في الشكل

3.

بالحساب التخامد وزمن سفر الموجة على طول الخط. بجمع المعادلتين (13) و (14) لبداية الخط وجمع المعادلتين (16) و (17) لنهاية الخط نحصل على المعادلتين التاليتين لبداية الخط ونهايته على الترتيب في الزمن t :

$$v_1(t) + Zi_1(t) = 2W_1(t) \quad (24a)$$

$$v_2(t) + Zi_2(t) = 2W_2(t) \quad (24b)$$

وتصبحا في الزمن $t-T$

$$(v_1 + Zi_1)_{t-T} = 2W_1(t-T) \quad (25a)$$

$$(v_2 + Zi_2)_{t-T} = 2W_2(t-T) \quad (25b)$$

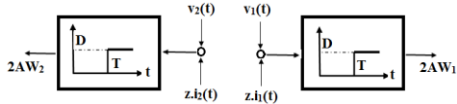
و باعتبار (22) و (23) نجد:

$$2AW_1(t) = (v_1 + Zi_1)_{t-T} \times D \quad (26)$$

$$2AW_2(t) = (v_2 + Zi_2)_{t-T} \times D \quad (27)$$

يتضح من المعادلتين (26) و (27) وتمثيلهما في مخطط

الإشارة في الشكل 6 أن الموجة القادمة (الواصلة) إلى إحدى نهايتي الخط في اللحظة t يتم حسابها من التوتر والتيار في النهاية الأخرى للخط لأجل اللحظة $(t-T)$. وعليه، فعندما نستخدم طريقة حل عددية (أي خطوة زمنية بعد أخرى) نكسب ميزة كبرى وهي إمكانية إجراء الحسابات لكل عقدة من الخط بشكل منفصل. وعلاوة على ذلك، إذا اخترنا خطوة حساب أقل من زمن سفر الموجة تكون عناصر الشبكة المرتبطة بنهايتي الخط عديمي التأثير المتبادل بينهما خلال زمن الخطوة.



الشكل (6) مخطط إشارة صندوقي للموجات القادمة إلى طرفي

الخط

3- وحدة التخزين الموجي (الخران الموجي):

آلية برمجة حساب وتخزين وانتشار الموجات

المسافرة

تمثل الموجات المسافرة حوامل معلومات بين بداية الخط (طرف الإرسال) ونهايته (طرف الاستقبال). سنشرح آلية مطورة لبرمجة عمليات الموجات المسافرة على نظام قدرة

بافتراض وجود ضياعات و عدم تشوه يصبح شرط هفيسايد Heavyside condition [14] محققاً أي:

$$\frac{R}{L} = \frac{G}{C} \quad (19)$$

وتعطي الممانعة الموجية Z عندها بالعلاقة:

$$Z = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{\frac{\frac{R}{L} + j\omega}{\frac{G}{C} + j\omega}} \quad (20)$$

ويحسب ثابت التخامد δ من العلاقة:

$$\alpha = \delta + j\beta$$

حيث: α ثابت الانتشار

β ثابت الطور

δ ثابت التخامد

$$\alpha = \sqrt{zy} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

وينشر الطرف الأيمن وباعتبار شرط هفيسايد نجد:

$$\alpha = R * \sqrt{\frac{C}{L}} \left(1 + \frac{j\omega L}{R}\right)$$

ومنه:

$$\delta = R * \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (21)$$

ونظراً لأن التخامد أسي كما هو معروف من الحل العام

لمعادلات الخط التفاضلية [15] نجد:

$$AW_1(t) = W_1(t-T) * D \quad (22)$$

$$AW_2(t) = W_2(t-T) * D \quad (23)$$

حيث: $T = \frac{l}{s}$ هو زمن سفر الموجة على طول الخط، و

ثابت تخامد الموجات هو

$$D = e^{-\delta l}$$

من المعادلتين (22) و (23) نستنتج أن الموجة الواصلة

إلى إحدى نهايتي الخط في اللحظة t ليست إلا الموجة التي

انطلقت من النهاية الأخرى للخط في اللحظة $(t-T)$ والمُخمّدة

أسياً. لذلك يتم حساب الموجة القادمة فور انطلاقها مع الأخذ

... (t+2h, ...). ويتم حساب AW فور انطلاقها وذلك بدلالة قيم التيار والتوتر لكل خطوة تكاملية باستخدام المعادلتين (26) و (27).

يبين المخطط في الشكل 9 فكرة الخزان الموجي الذي قمنا بتطويره وعمليات حساب وتخزين وانتشار الموجات على خط نقل بواسطة الحاسوب.

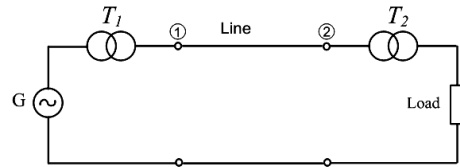
يُمثل الخط في الحاسوب بواسطة خزانين موجيين متماثلين؛ الخزان I مخصص للموجات المنطلقة من بداية الخط والخزان II مخصص للموجات العائدة المنطلقة من نهاية الخط. كل خزان مقسم إلى خلايا تخزينية يعتمد عددها N (عدد Integer) على محددتين هما زمن سفر الموجة T وخطوة التكامل h بحيث

$$N = \text{round} \left(\frac{T}{h} \right) + 1 \quad (32)$$

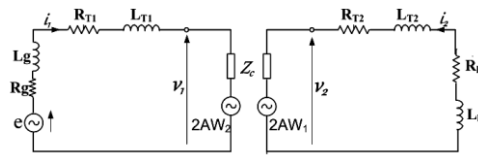
و T/h هو عدد خطوات التكامل خلال زمن السفر الواحدة أي من بداية الخط إلى نهايته فقط أو بالعكس. بعد كل خطوة تكامل يتم حساب الموجات المولدة حديثاً في نهايتي الخط باستخدام المعادلتين (24a, 24b) وتخزينها في الخلايا N بعد إجراء نقل الموجات المخزنة سابقاً في جميع خلايا الخزان بمقدار خلية (أي مضمون الخلية J ينزلق إلى الخلية J-1).

تمثل عملية نقل الموجات عبر الخزان الموجي انتشار هذه الموجات على الخط. وعليه فإن الموجة المتولدة في الزمن t والمخزنة في الخلية N تظهر كموجة AW بعد T/h خطوة تكاملية في الخلية 1. يمثل الخط المنقط في الشكل 9 حالة دائرة قصيرة في بداية الخط حيث لاوجود لموجات مسافرة على الخط.

مبسطة مؤلف من خط نقل يرتبط بطرف إرساله مولد تزامني ومحول ويتصل بطرف استقباله محول و حمل تحريضي كما هو مبين في الشكل 7. و يبين الشكل 8 الدارة المكافئة للنظام في الشكل 7.



الشكل (7) نظام قدرة مبسط



الشكل (8) الدارة المكافئة للنظام في الشكل 4

يتم تمثيل دارة الدخل للخط مع الدارة المكافئة الموجية لطرف الإرسال (الجزء اليساري من الدارة المكافئة) وكذلك دارة الخرج للخط مع الدارة المكافئة الموجية لطرف الاستقبال (الجزء اليميني من الدارة المكافئة) بمعادلتين تفاضليتين من الدرجة الأولى تنتجان بتطبيق قانون كيرشوف على الدائرتين و هما على الترتيب:

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{-e + (R_1 + Z_c)i_1 + 2AW_2}{L_1} \quad (28)$$

$$\frac{di_2}{dt} = -\frac{(R_2 + Z_c)i_2 + 2AW_1}{L_2} \quad (29)$$

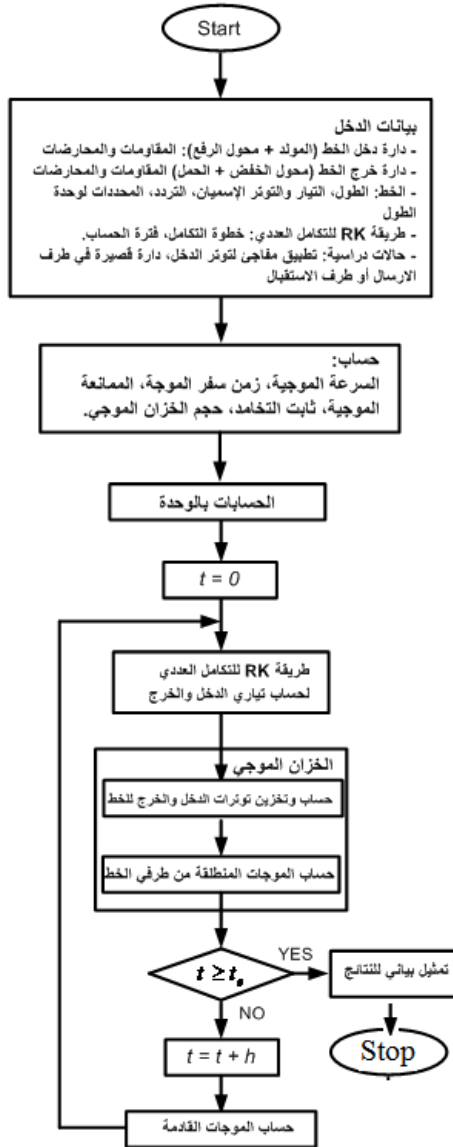
حيث متحولاً الحالة للمعادلتين هما i_1, i_2 ، وحيث

$$R_1 = R_g + R_{T1}; L_1 = L_g + L_{T1} \quad (30)$$

$$R_2 = R_l + R_{T2}; L_2 = L_l + L_{T2} \quad (31)$$

يتم حل نظام المعادلتين التفاضليتين (28) و (29)

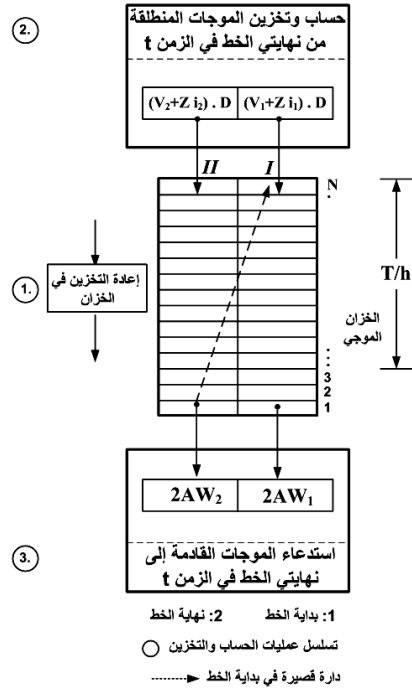
بواسطة إحدى طرق التكامل العددي. وسوف نستخدم طريقة Runge-Kutta (RK) باعتبارها طريقة تكامل عددي دقيقة و مستقرة عددياً. ويتطلب الحل معرفة قيم الموجات القادمة AW لطرفي الخط عند كل خطوة تكامل h أي لأجل (t, t+h,)



الشكل (10) المخطط الانسيابي للخوارزمية

5- تطبيق عملي

لأجل التأكد من صحة تمثيل عمليات الموجات المسافرة على الخطوط الهوائية تم دراسة عدد من الحالات التشغيلية لنظام قدرة مبسط موضح في الشكل 7. وحالات التشغيل المدروسة هي حالة إغلاق مفاجئ On-switching لنظام القدرة وحالة عطل (دائرة قصيرة) في بداية الخط وحالة عطل في نهاية الخط. بيانات الدخل للنظام المدروس مبينة في



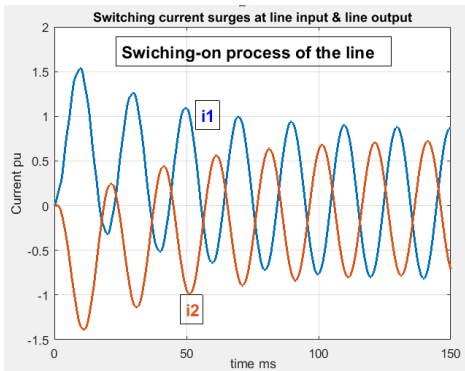
الشكل (9) الخزان الموجي المطور: آلية مطورة لبرمجة حساب وتخزين وانتشار الموجات المسافرة

4- الخوارزمية العامة لبناء النموذج الحاسوبي

انطلاقاً من النموذج الرياضي المنجز، تم تطوير خوارزمية عامة لبناء النموذج الحاسوبي لخطوط النقل الكهربائية باستخدام نظرية الموجات المسافرة. ويبين الشكل 10 المخطط الانسيابي لهذه الخوارزمية.

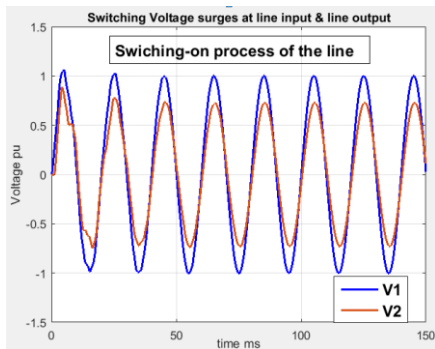
وتأسيساً على النموذج الرياضي والخوارزمية المنجزين، تم تصميم برنامج حاسوبي في بيئة ماتلاب Matlab وتم التثبيت من صحته من خلال حل أمثلة نموذجية بواسطته.

الإستقبال يبدأ بالظهور بعد وصول الموجة الذاهبة إلى نهاية الخط (أي بعد انقضاء زمن هو طول الخط مقسما على السرعة الموجية) ويمر بحالة عابرة تدوم حوالي 60 ميلي ثانية يليها حالة جيبيية منتظمة. اما تيار الإرسال فيصبح موجة جيبيية منتظمة بعد انقضاء حوالي 50 ميلي ثانية والتي يكون فيها التيار حاملا لتوافقيات بسبب التشوه التي تعاني منه الموجات المسافرة.



الشكل (11) موجتا التيار في طرفي الإرسال و الإستقبال لأجل إقلاع النظام

في الشكل 12 نلاحظ أن توترتي الإرسال والإستقبال يمران بحالة عابرة كالتيارات قبل أن ينتظم الشكل الجيبيي لهما بمطالهما 1 pu و 0.9 pu على الترتيب. وتجدر الإشارة إلى أن قيم توتر الاستقبال أقل من توتر الإرسال بسبب هبوط التوتر على طول خط النقل.



الشكل (12) موجتا التوتر في طرفي الإرسال والإستقبال لأجل إقلاع النظام

الجدول 1. وهذه البيانات مفترضة من قبل الباحث على اساس الخبرة والقيم المرشدة لمكونات النظام العملية.

الجدول 1: بيانات الدخل لنظام القدرة المدروس

	R	L	C
G	0.9 Ω	28.9 mH	
T1	0.717 Ω	106.5 mH	
T2	0.717 Ω	106.5 mH	
Line 200 km	0.0353 Ω/km	1.27 mH/km	14 nF/km
Load	717 Ω	1760 mH	
$V_n = 220 \text{ kV}$, $I_n = 500 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$ Runge-Kutta: $h = 0.01 \text{ ms}$, $t_{\text{end}} = 100 \text{ ms}$			

والمطلوب استخدام برنامج ماتلاب المنجز للتحقق من صحة الآلية المطورة لعمليات حساب الموجات المسافرة وتخزينها وانتشارها على خط النقل.

6- النتائج الحاسوبية وتحليلها

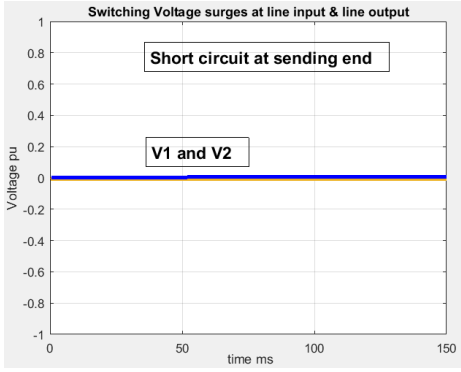
سيتم التحقق من صحة الآلية المطورة لعمليات حساب الموجات المسافرة وتخزينها وانتشارها على خط النقل عن طريق ثلاثة اختبارات حاسوبية ودراسة الحالة العابرة للتيار والتوتر في نهايتي الخط فيها وهي:

- عملية تشغيل النظام Switching-on process
- عطل (دائرة قصيرة) في بداية الخط وحيد الطور.
- عطل (دائرة قصيرة) في نهاية الخط وحيد الطور.

6-1 الإختبار الحاسوبي الأول

نفرض أن النظام قد تم تشغيله (إقلاع المولد) في الزمن $t = 0$ ولفترة زمنية $t_{\text{end}} = 150 \text{ ms}$ ويتم استخدام برنامج الماتلاب المنجز لحساب التوترات والتيارات الآتية لطرفي الإرسال والإستقبال لخط النقل وإظهارها كتمثيل بياني كما هو مبين في الشكلين 11 و 12.

نلاحظ من الشكل 11 أن قيم تيار الاستقبال أقل من تيار الإرسال بسبب التيارات السعوية. وتجدر الإشارة إلى أن تيار



الشكل (14) موجتا التوتر في طرفي الإرسال والإستقبال لأجل دائرة قصيرة في طرف الإرسال

وبهذا تسهم نتائج الإختبار الثاني في تأكيد صحة النموذج الحاسوبي المنجز.

3-6 الإختبار الحاسوبي الثالث

نفرض حدوث عطل دائرة قصيرة في نهاية الخط (العقدة 2) انطلاقاً من حالة التشغيل الثابتة Steady state لنظام القدرة المدروس حيث زمن العطل 150 ms. يبين الشكلان 15 و 16 نتائج دراسة هذا الإختبار باستخدام برنامج ماتلاب المنجز.

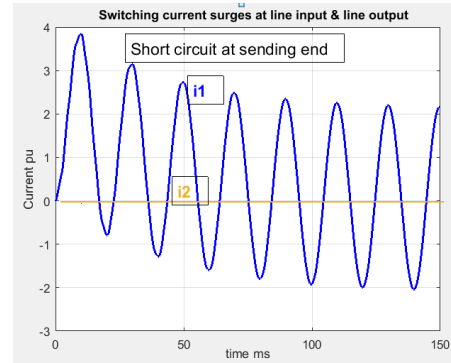
يبين الشكل 15 موجتي التيار في طرفي الإرسال والإستقبال لأجل الدارة القصيرة في طرف الإستقبال. نلاحظ أن قيم المنحني المغلف لموجة تيار الإرسال تتناقص على نحو مشابه لنتائج الإختبار الثاني ولكن بقيم أقل: من قيمة عظمى 2.3 pu للحالة العابرة بسرعة إلى 1.8 pu للحالة العابرة وصولاً إلى 1.3 pu للحالة الثابتة. سبب القيم الأقل هو ممانعة مسار العطل الأكبر في الإختبار الثالث (ممانعات المولد ومحول الإرسال كما في الإختبار الثاني مضافاً إليها ممانعات الخط في الإختبار الثالث).

أما موجة تيار الإستقبال فتكون مناظرة تقريباً ولكن بقيم أقل لموجة تيار الإرسال بالنسبة لمحور الزمن بسبب آلية الموجات القادمة والمنعكسة في نهاية الإستقبال المقصورة. تتناقص القيم العظمى لتيار الإستقبال في المجال السالب من

وبهذا تسهم نتائج الإختبار الأول في تأكيد صحة النموذج الحاسوبي المنجز.

2-6 الإختبار الحاسوبي الثاني

نفرض حدوث عطل دائرة قصيرة في بداية الخط (العقدة 1) المدروس حيث زمن العطل 150 ms. يبين الشكلان 13 و 14 نتائج دراسة هذا الإختبار باستخدام برنامج ماتلاب المنجز. يبين الشكل 13 موجتي التيار في طرفي الإرسال والإستقبال لأجل الدارة القصيرة في طرف الإرسال.



الشكل (13) موجتا التيار في طرفي الإرسال والإستقبال لأجل دائرة قصيرة في طرف الإرسال

من الشكل 13 يتضح أن تيار الإستقبال منعدم بسبب قصر نهاية الإرسال. أما تيار الإرسال فيبدي ثلاث حالات: حالة العابرة بسرعة Subtransient بمطال أعظمي يقارب 4 pu وحالة العابرة Transient مطالها الأعظمي حوالي 3 pu وحالة ثابتة Steady state مطالها 2.3 pu. إن شكل موجة التيار تشبه تماماً موجة تيار العطل على خرج مولد تزامني مما يدل على صحة النموذج الحاسوبي المنجز.

يبين الشكل 14 النتائج الحاسوبية لتوتري الإرسال والإستقبال لأجل الدارة القصيرة في طرف الإرسال. في هذا الإختبار يكون، بالطبع، التوتران منعدمين،

7- استنتاجات Conclusions

❖ تم إنجاز النموذج الرياضي الكامل والموسع للتمثيل الحاسوبي لخط النقل. إذ انطلاقاً من المعادلات التفاضلية الجزئية المعروفة للخط والحل العام لها لأجل التيار والتوتر، تم التوصل لمعادلات القيم اللحظية (الآنية) للتيار والتوتر في نهايتي الخط التي قادت إلى استنباط وتطوير دارة مكافئة موجية للخط مناسبة لدراسة الحالات العابرة لنظام القدرة الكهربائية بطريقة حل عددية مثل طريقة Runge-Kutta (RK).

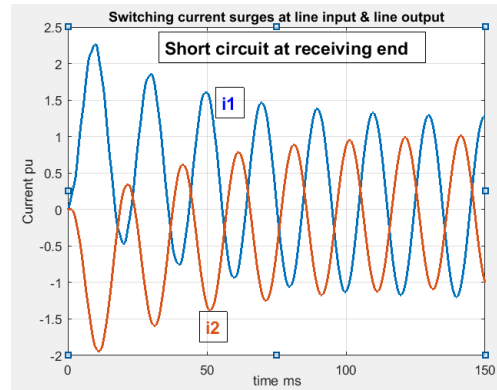
❖ إن الميزة الهامة للدارة المكافئة الموجية المنجزة هي إتاحة الإمكانية لإجراء الحسابات لكل عقدة من الخط بشكل منفصل لدى استخدام طريقة حل عددية (أي خطوة زمنية بعد أخرى). وعلاوة على ذلك، إذا تم اختيار خطوة حساب أقل من زمن سفر الموجة على طول الخط تكون عناصر الشبكة المرتبطة بنهايتي الخط عديمة التأثير المتبادل بينهما خلال زمن الخطوة. وعليه، يمكن استغلال هذه الميزة في دراسة الحالات العابرة لأنظمة القدرة الكهربائية عموماً وعلى الأخص أنظمة نقل القدرة بالتيار المستمر عالي التوتر HVDC.

❖ استناداً على النموذج الحاسوبي المنجز فقد تم تطوير خوارزمية الخزان الموجي الذي يمثل آلية حساب وتخزين وانتشار الموجات المسافرة على طول خط النقل.

❖ تم تطوير خوارزمية عامة لبناء النموذج الحاسوبي لخطوط النقل الكهربائية المتضمنة في نظام قدرة كهربائية باستخدام نظرية الموجات المسافرة.

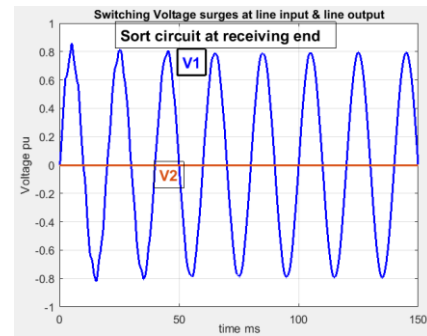
❖ وتأسيساً على النموذج الرياضي والخوارزميات المنجزة، تم تصميم برنامج حاسوبي في بيئة ماتلاب Matlab وتم التثبيت من صحته بنجاح من خلال استخدام البرنامج المنجز لحساب حالات تشغيل مختلفة لنظام قدرة كهربائية مبسط وتحليل النتائج ومناقشتها.

2 pu إلى 1.5 pu إلى 1.1 pu لأجل الحالات العابرة بسرعة والعابرة والثابتة على الترتيب.



الشكل (15) موجتا التيار في طرفي الإرسال والإستقبال لأجل دارة قصيرة في طرف الإستقبال

أما التوترات فيوضحها الشكل 16، حيث توتر الإستقبال ينهار إلى الصفر؛ أما توتر الإرسال فيعاني حالة عابرة لحوالي 50 ms بسبب طبيعة الموجات المسافرة الذاهبة والمنعكسة لينتظم بعدها على شكل موجة جيبيية بمطال أقل من 0.8 pu بقليل.



الشكل (16) موجتا التوتر في طرفي الإرسال والإستقبال لأجل دارة قصيرة في طرف الإستقبال

أيضاً يؤكد الإختبار الثالث صحة النموذج الحاسوبي المنجز.

References

المراجع

❖ الجدير بالذكر أن الخوارزميات المنجزة والبرنامج المصمم والمنفذ غير متوفرة في المنشورات العلمية المتاحة.

مسرد المصطلحات

Modeling & Simulation	النمذجة والمحاكاة
Physical model	النموذج الفيزيائي
Real-world system	النظام الحقيقي
Computer model	النموذج الحاسوبي
Steady state	الحالة الثابتة
Transient state	الحالة العابرة
Overcurrents	التيارات الزائدة
Overvoltages	التوترات الزائدة
Travelling waves	الموجات المسافرة
Partial differential equations	المعادلات التفاضلية الجزئية
Wave equivalent circuit	الدائرة المكافئة الموجية
Wave storage unit	وحدة التخزين الموجي (الخزان الموجي)
Algorithm	خوارزمية

- [1] A. S. R. Subramanian et al, “Modeling and Simulation of Energy Systems: A Review”, Processes 2018, 6, 238, www.mdpi.com/journal/processes, 2018
- [2] E. Vugrin and M. Baca, “Electric Power System Modeling and Analysis”, Sandia National Laboratories, ENG505, Spring 2013
- [3] P. Neuman, “Innovative , and Simulation of Electric Power systems“, IFAC-Papers On Line, Volume 49, Issue 27, 2016
- [4] E. Kremers, “Modelling and Simulation of Electrical Energy Systems through a Complex Systems Approach using Agent-Based Models”, KIT Scientific Publishing, 2013
- [5] P. Palensky (TU Delft), “Modeling and Simulation of Intelligent Electrical Power Grids”, , Proceedings of the Conference (FedCSIS), Prague, Czech Republic 3-6 September 2017
- [6] “Travelling Wave on Transmission Line.” <https://electricalbaba.com/travelling-wave-transmission-line/>, April 13, 2018
- [7] J. B. Gertrudes et al, “Transient Performance Analysis on Overhead Transmission Line Considering the Frequency Dependent Soil Representation”, Paper (ID 176) submitted to the International Conference on Power Systems Transients (IPST2011) in Delft, the Netherlands June 14-17, 2011.
- [8] “Electromagnetic Transient Analysis of Transmission Lines ,” link.springer.com > pdf > [bbm:978-1-84882-499-7](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-499-7), viewed 2020
- [9] W. C. Chew, “Transients on a Transmission Line ,” ECE 350 Lecture Notes, <http://wcchew.ece.illinois.edu/chew/ece350.html>, 2019
- [10] Y. Tang et al, “Modeling transmission lines for travelling wave study”, www.researchgate.net, 2010
- [11] Turan Gonen, “Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design”, CRC Press, 2014.

[12]G. Leonidopoulos, “Modelling and Simulation of Electric Power Transmission Line Current as Wave ,”

AMSE JOURNALS-2016-Series: Modeling A; Vol. 89; N° 1, 2016

[13]Mohamed Rafeequdin, “ How R and G can be zero simultaneously in lossless transmission lines?” <https://www.quora.com>, viewed 2020

[14]Heaviside condition, https://en.wikipedia.org/wiki/Heaviside_condition, viewed 2018

[15]P.S. Barnett, “The analysis of travelling waves on power system transmission lines”, www.core.ac.uk. viewed 2019

Received	2020/12/22	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2021/2/10	قبول البحث للنشر