كلية العلوم

القسم : **الفيزياء**

السنة : **الثالثة**

المادة : كهرطيسية

المحاضرة: الثامنة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2026

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

4

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

مقرر: الكهرطيسية
المحاضرة: الثامنة

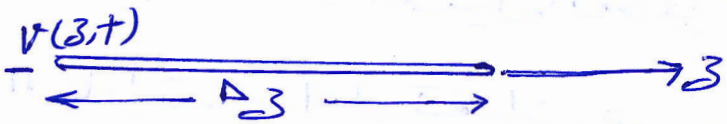
السنة الثالثة
د. علي أسد

نظرية وأنواع خطوط النقل

1- النموذج الكهربائي لخط النقل:

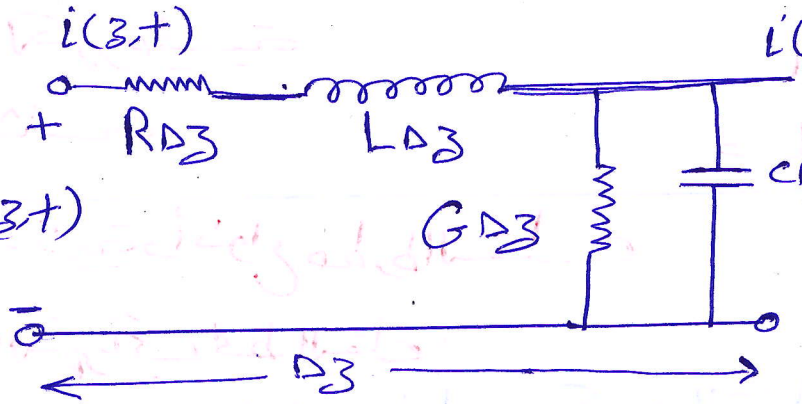
يتكون أي خط نقل من ناقل وعازل، ويكون التمثيل الكهربائي لخط النقل بسلكين ناقلين متوازيين يفصل بينهما الوسط العازل كما في الشكل:

الشكل (1)



للإيصاد دارة كهربائية مكافئة مكونة من عناصر مجمعة (R,L,G,C) حيث يمكن تطبيق نظرية الدارات الكهربائية المعروفة عليها، حيث نجزئ خط النقل ذي الطول l إلى أجزاء بأطوال Δz متناهية في الصغر وتحقق الشرط $\Delta z \ll \lambda$ كما في الشكل (2)
حيث يمكن تمثيل كل جزء Δz بدارة كهربائية مكافئة من الشكل (2)
بما أن خط النقل مكون من ناقل وعازل، فالناقل يمكن تمثيله في الدارة الكهربائية المكافئة بمقاومة R بواحدة الطول (Ω/m) مربوطة على التسلسل مع مشيعة L بواحدة الطول (H/m)، والعازل يمكن تمثيله بناقلية G بواحدة الطول (S/m)، مربوطة على التفرع مع مكثف C بواحدة الطول (F/m)، تمثل R الفقد في الناقل وتمثل G الفقد في العازل، وبالتالي يمكن تمثيل خط النقل ذي الطول l بسلسلة من الدارات الكهربائية المكافئة للأجزاء Δz المتتالية كما في الشكل (2)

الآن يمكن تطبيق نظرية الدارات الكهربائية على الدارة في الشكل 2 المثلة لمقطع Δz من خط النقل لإيجاد العلاقة بين الجهود والتيارات بين طرفي المقطع.



(الشكل (2))

$v(z,t)$ و $i(z,t)$ تمثل التغيرات بالنسبة للمسافة والزمن للجهود والتيارات على طول خط النقل المنتظم، نهتم عملياً بالتغيرات الجيبية مع الزمن وباعتماد التمثيل الطوري للجهود والتيارات.

تكتب الجهود والتيارات من أجل تغيرات جيبية مع الزمن على الشكل التالي

$$v(z,t) = Re\left\{V(z)\, e^{jwt}\right\}$$
$$i(z,t) = Re\left\{I(z)\, e^{jwt}\right\} \quad (1)$$

حيث يعبر كل من $V(z)$ و $I(z)$ عن التغيرات في المطال للجهود والتيارات وهي عبارة عن توابع عقدية للمسافة z طولية وطور.

2 - انتشار الموجة على خط النقل:

باعتماد الدارة المكافئة في الشكل (2) لمقطع من خط النقل بطول Δz وبتطبيق قانوني كيرشوف للجهد والتيار نتوصل إلى المعادلتين التاليتين:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dV(z)}{dz} &= -(R+jwL)\,I(z)\\ \frac{dI(z)}{dz} &= -(G+jwC)\,V(z)\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

لاحظ التماثل بين هاتين المعادلتين، وبين معادلتي ماكسويل في وسط مع فقد:

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -jw\mu \vec{H}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = (jw\varepsilon + \sigma)\vec{E}$$

فإذا فرضنا أن الحقل الكهربائي مركبة وحيدة باتجاه $\vec{x}$ ومنتظم وفق x و y، نحصل على معادلتي ماكسويل من الشكل:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dE_x}{dz} &= -jw\mu H_y \\ \frac{dH_y}{dz} &= -(jw\varepsilon + \sigma)E_x \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

المعادلتين لمعادلتي الجهد والتيار.

وكما استنتجنا معادلة الموجة لكل من الحقلين الكهربائي والمغناطيسي نحصل من المعادلة (2) على معادلتي الموجة للجهد والتيار على خط النقل نحصل على:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) &= 0 \\ \frac{d^2I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) &= 0 \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

حيث يمثل γ ثابت الانتشار العقدي لموجة الجهد وموجة التيار على طول خط النقل وتعطى قيمته بالعلاقة التالية

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R+jwL)(G+jwC)} \quad (5)$$

وبنفس الطريقة التي وصلنا فيها على حل الموجة المستوية، نقبل كل من معادلتي الموجة للجهد والتيار على خط النقل حلاً على شكل أمواج متقدمة تنتشر على شكل أمواج متقدمة تنتشر على طول خط النقل في اتجاهين متعاكسين

ونكتب:

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}$$
$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad \} (6)$$

أي أن فرق الجهد $V(z)$ بين الناقلين في نقطة كي مرفط النقل هو محصلة موجتين: موجة متقدمة $V_0^+ e^{-\gamma z}$ تنتشر باتجاه $z+$ وأخرى $V_0^- e^{\gamma z}$ تنتشر باتجاه $z-$ وكذلك بالنسبة للتيار $I(z)$ المار بالناقل.

نحصل على $v(z,t)$ فرق الجهد الحقيقي كتابع للموضع والزمن بتحويل صيغة $V(z)$ على الشكل

$$v(z,t) = Re\left(V(z) e^{j\omega t}\right) = Re\left(V_0^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} e^{j\omega t}\right)$$
$$+ Re\left(V_0^- e^{\alpha z} e^{j\beta z} e^{j\omega t}\right)$$
$$v(z,t) = |V_0^+| e^{-\alpha z} Re\left(e^{j(\omega t - \beta z + \varphi^+)}\right)$$
$$+ |V_0^-| e^{\alpha z} Re\left(e^{j(\omega t + \beta z + \varphi^-)}\right)$$

$$v(z,t) = |V_0^+| e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \varphi^+) + |V_0^-| e^{-\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \varphi^-) \quad \} (7)$$

تمثل هذه النتيجة (كما رأينا سابقاً) موجة متقدمة الأمام تنتشر باتجاه $z+$ وبسرعة طور $V_p = \frac{\omega}{\beta}$ وطول موجة $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ ومعامل تخامد أساسي للمطال حسب الفقد وموجة متقدمة للخلف (عكسية) باتجاه $z-$ مع معامل تخامد أساسي αz

3 الممانعة المميزة لخط النقل:

بتعويض الحل $V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}$ في المعادلة

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L) I(z)$$

نحصل على التيار $I(z)$ من الشكل:

$$I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L}\left(V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z}\right) \quad (8)$$

ونستنتج أن كلاً من الموجتين المتقدمتين للجهد والتيار ترتبطان بممانعة:

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (9)$$

مشابهة في مفهومها الممانعة الموجية المستوية في الوسط التي تربط بين الحقلين الكهربائي والمغناطيسي لموجة مستقرة تنتشر في الوسط باتجاه معين

نسمي Z_0 بالممانعة المميزة لخط النقل وتربط بين الجهد والتيار لموجة مستقرة على طول خط النقل كما يلي:

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} \quad (10)$$

أي أن مفهوم الممانعة المميزة مرتبطة بمفهوم موجة مستوية مستقرة تنتشر باتجاه معين، فتربط Z_0 بين موجتي الجهد والتيار المتقدمتين في الاتجاه $z+$ كما تربط بين موجتي الجهد والتيار المتقدمتين في الاتجاه $z-$ إذ يمكن كتابة موجة التيار على الشكل

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma z}$$

4 خط النقل عديم الفقد:

تمثل النتائج التي حصلنا عليها الحالة العامة لخط النقل مع فقد، رأينا أن ثابت الانتشار يكون عقدياً وكذلك الممانعة المميزة لخط النقل. لكن في الكثير من الحالات العملية ومع تطور علم المواد وتقانات التصنيع، يمكن إهمال الفقد في خط النقل الناتج عن الناقل أو العازل، أي يمكن اعتبار $R=G=0$ وتصبح النتائج على الشكل التالي:

$$\gamma = \alpha + j\beta = jw\sqrt{L.C}$$

أي

$$\beta = w\sqrt{LC}$$

$$\alpha = 0$$

كما هو متوقع، في خط النقل عديم الفقد يكون ثابت التخامد معدوماً، ويمثل β ثابت انتشار الطور. وتصبح الممانعة المميزة لخط نقل عديم الفقد:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

وهي الآن ممانعة حقيقية. يكتب الحل العام للموجة على خط نقل عديم الفقد على الشكل:

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z}$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z}$$

سرعة الطور

$$v_p = \frac{w}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

وطول الموجة:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{w\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{LC}} = \frac{v_p}{f}$$

مكتبة A to Z