كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : كهرطيسية

المحاضرة: التاسعة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

2026

4

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

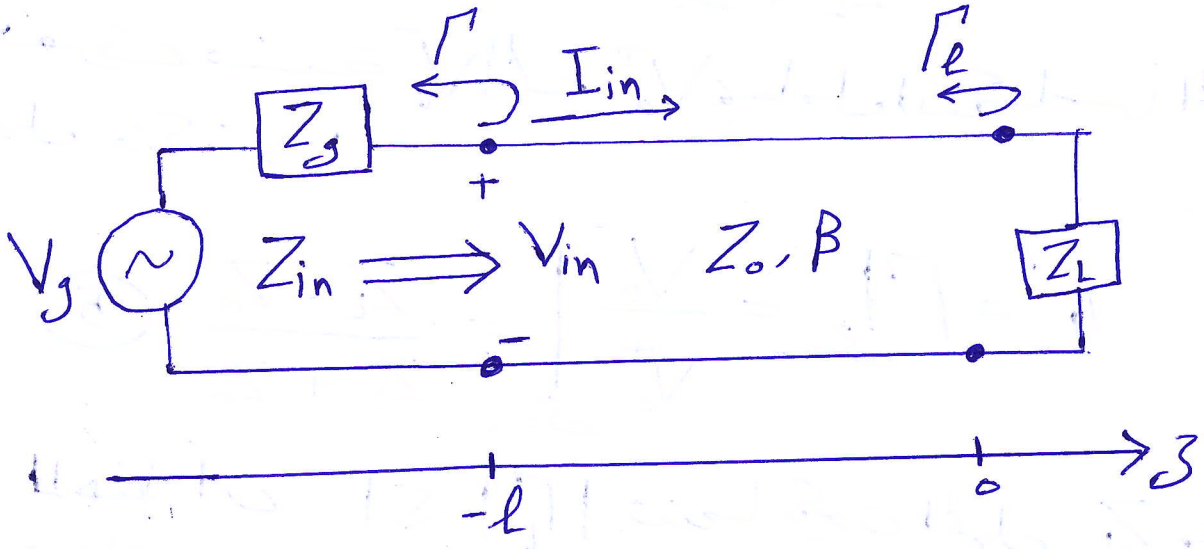
مقرر: الكهرطيسية
السنة: الثالثة
المحاضرة: التاسعة
د. علي أسعد

6 خط النقل ضمن دارة:

9 انعكاسات موجية على خط النقل:

لتكن الدارة في الشكل (1) المكونة من خط نقل عديم الفقد يصل بين منبع V_g ممانعته الداخلية Z_g وحمل Z_L. يتميز خط النقل عديم الفقد كعنصر في دارة بالمحددات الثلاث التالية: Z_0 الممانعة المميزة (حقيقية)، β ثابت انتشار الطور ($\gamma = j\beta$)، l الطول الفيزيائي.

نفرض $V_0^+ e^{-j\beta z}$ موجة واردة من المولد على خط النقل، تنتشر باتجاه $z+$، ولندرس انتشار الموجة على خط النقل المنتهي بالحمل ذي الممانعة Z_L المختلفة عن الممانعة المميزة لخط النقل Z_0



الشكل (1)

رأينا Z_0 تمثل، بالنسبة لهذه الموجة الواردة، نسبة الجهد إلى التيار بينما تمثل Z_L نسبة الجهد إلى التيار عند الحمل، لذلك تتولد موجة منعكسة عند الحمل بطال مناسب لتحقيق هذا الشرط ويصبح بالإمكان كتابة الجهد الكلي على خط النقل، عند كل موضع حي كترتيب لموجتين واردة ومنعكسة، أي:

$$V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} \quad (1)$$

بشكل مشابه، يمكن كتابة التيار الكلي على الخط كما يلي:

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z} \quad (2)$$

عند الحمل، أي عند $z=0$ حيث يجب أن تكون نسبة الجهد الكلي $V(z)$ إلى التيار الكلي $I(z)$ مساوية لممانعة الحمل، أي

$$Z_L = \frac{V(z=0)}{I(z=0)} = \frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} Z_0 \quad (3)$$

ويمكن عندئذٍ أن نكتب مطال الموجة المنعكسة V_0^- بدلالة مطال الموجة الواردة على الشكل

$$V_0^- = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} V_0^+ \quad (4)$$

نعرف نسبة V_0^- إلى V_0^+ بمعامل انعكاس الجهد عند الحمل ونكتب:

$$\Gamma_L = \Gamma\Big|_{z=0} = \frac{V_0^-}{V_0^+}\Big|_{z=0} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (5)$$

لاحظ أن $|\Gamma_L| \leq 1$ عندما يكون الحمل Z_L مكوناً من عناصر مجمعة (R, L, C). ويكون $|\Gamma_L| = 1$ عندما ينتهي خط النقل بدارة مقصورة $Z_L = 0$ أو مفتوحة $Z_L \to \infty$

نكتب الجهد الكلي والتيار الكلي على خط النقل على الشكل التالي:

$$V(z) = V_0^+ \left(e^{-j\beta z} + \Gamma_L e^{j\beta z}\right) \quad (6)$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0}\left(e^{-j\beta z} - \Gamma_L e^{+j\beta z}\right) \quad (7)$$

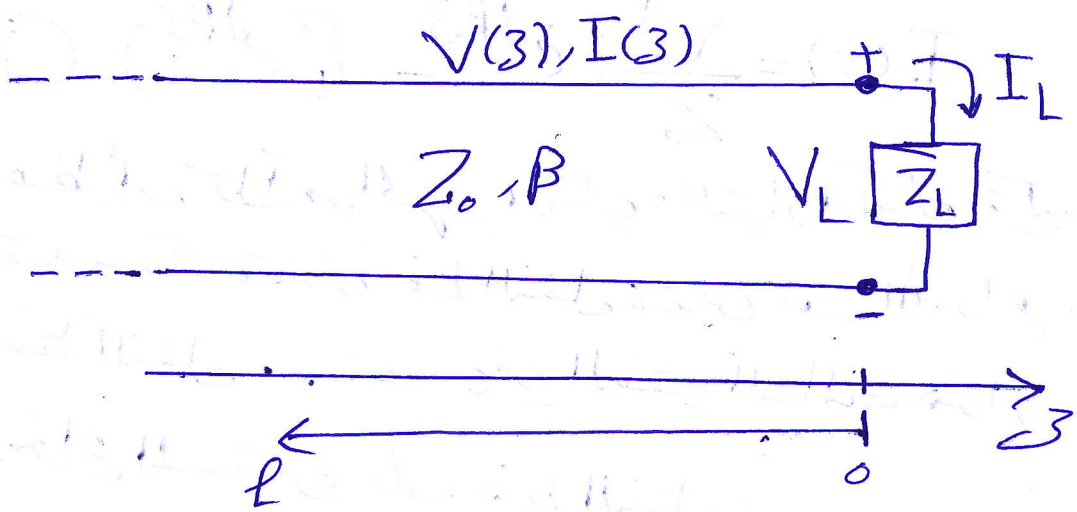
نلاحظ أن كلاً من الجهد الكلي والتيار الكلي تركيب لموجتين وارة ومنعكسة على خط النقل، تدعى هذه الأمواج بالأمواج المستقرة على خط النقل. سندرس في الفقرة التالية خواص هذه الموجة.

b الأمواج المستقرة على خط النقل:

تتشكل الموجة المستقرة على خط النقل عندما يحدث انعكاس أي عندما تكون ممانعة الحمل مختلفة عن الممانعة المميزة لخط النقل، أي $Z_L \neq Z_0$. نلاحظ أن هذه الحالة تماثل حالة انتشار موجة في وسطين مختلفين حيث يحدث الانعكاس عند السطح الفاصل بينهما.

الحالة الوحيدة التي لا تتشكل فيها موجة مستقرة على خط النقل هي عندما لا يحدث انعكاس أي $Z_L = Z_0$ أو $\Gamma_L = 0$ نسمي الحمل في هذه الحالة «الحمل الموافق»، وتكون هنالك موجة مستقيمة باتجاه واحد على خط النقل هي الموجة الوارة. عندما يكون هنالك توافق بين خط النقل والحمل تتشكل موجة مستقرة، وتكون طويلة الجهد غير ثابتة على طول خط النقل.

نفرض أن $z = -l$ المسافة الموجبة المقاسة اعتباراً من الحمل عند $z = -l$ كما في الشكل (2)، ونفرض أن معامل الانعكاس عند الحمل $\Gamma_L = |\Gamma_L| e^{j\theta_L}$ (معامل الانعكاس عقدي لأنه يمكن أن يكون للحمل بشكل عام ممانعة عقدية)، يمكن حساب طويلة موجة الجهد المستقرة على خط النقل كما يلي:



$$|V(3)| = |V_0^+| \left| e^{-j\beta 3} + \Gamma_L e^{j\beta 3} \right|$$

$$|V(l)| = |V_0^+| \left| e^{j\beta l} + |\Gamma_L| e^{j\theta} e^{-j\beta l} \right|$$

$$|V(l)| = |V_0^+| \left| e^{j\beta l} \right| \left| 1 + |\Gamma_L| e^{j\theta} e^{-2j\beta l} \right|$$

$$|V(l)| = |V_0^+| \left| 1 + |\Gamma_L| e^{j(\theta - 2\beta l)} \right| \quad (8)$$

حيث $|e^{j\beta l}| = 1$. تبين هذه النتيجة أن مطال الجهد $|V(l)|$ يتغير مع الموضع l (المسافة الموجبة المقاسة عكسيا من الحمل) على طول خط النقل، ويتراوح بين قيمتين عظمى وصغرى، وتكون قيمة مطال الجهد عظمى عندما يكون لدينا $e^{j(\theta - 2\beta l)} = 1$ أي:

$$V_{max} = |V_0^+| (1 + |\Gamma_L|) \quad (9)$$

وتكون قيمة مطال الجهد صغرى من أجل $e^{j(\theta - 2\beta l)} = -1$ أي

$$V_{min} = |V_0^+| (1 - |\Gamma_L|)$$

ومن هنا نجد نسبة

$$V_{SWR} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|}$$

نسبة أمواج الجهد المستقرة Voltage Standing Wave Ratio

لاحظ أن V_{SWR} هو عدد حقيقي موجب وأن $V_{SWR} \geq 1$

(تذكر أن $|\Gamma_L| \leq 1$)

4. سعات الموجة المستقرة على خط النقل

1) نلاحظ من العلاقة

$$|V(l)| = |V_0^+| \left| 1 + |\Gamma_L| e^{j(\theta - 2\beta l)} \right| \quad (10)$$

أن طويلة موجة الجهد المستقرة على خط النقل دورية وتتغير بدور مقداره:

$$2\beta l = 2\pi \Rightarrow l = \frac{2\pi}{2\beta} = \frac{\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{\lambda}{2}$$

أي أن القيمة العظمى V_{max} (أو القيمة الصغرى V_{min}) تتكرر كل $\lambda/2$ في حين تكون المسافة الفاصلة بين V_{max} و V_{min} تساوي $\frac{\lambda}{4}$، حيث λ طول الموجة على خط النقل.

2) نلاحظ من العلاقة

$$V_{SWR} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (11)$$

أن $V_{SWR} = 1$ عندما $\Gamma_L = 0$، أي أن خط النقل ينتهي بحمل موافق $Z_L = Z_0$ (لا يوجد انعكاس) ويكون لدينا في هذه الحالة على طول خط النقل $V_{max} = V_{min} = |V_0^+|$ وهذه طويلة ثابتة على طول خط النقل لأنه عديم الفقد

وأن $V_{SWR} \to \infty$ عندما $|\Gamma_L| = 1$ أي أن خط النقل

يعتبر بدارة مقصورة $Z_L = 0$ أو مفتوحة $Z_L \to \infty$

d مفهوم ممانعة الدخل لخط النقل:

عرفنا معامل الانعكاس Γ_L على أنه نسبة أطوال المنعكسة إلى الواردة عند الحمل. يمكن تعميم ذلك إلى أي موضع على خط النقل، ويصبح معامل الانعكاس تابع للموضع من الشكل

$$\Gamma(z) = \frac{V_0^- e^{j\beta z}}{V_0^+ e^{-j\beta z}} = \frac{V_0^-}{V_0^+} e^{2j\beta z}$$

$$= \Gamma_L e^{2j\beta z} \qquad (12)$$

وهو تابع دوري تتكرر قيمته كل $2\beta z = 2\pi$ أو كل $\lambda/2$

وبما أن معامل الانعكاس عند أي موضع z على خط النقل مرتبط بالممانعة $Z(z)$ عند نفس الموضع بالعلاقة:

$$\Gamma(z) = \frac{Z(z) - Z_0}{Z(z) - Z_0} \qquad (13)$$

سنستنتج أن الممانعة عند أي موضع z على خط النقل تكون من الشكل:

$$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}$$

أي أن الممانعة على خط النقل تتكرر كل $\lambda/2$. فالممانعة $Z(z=0) = Z_L$ و الممانعة $Z(z=\frac{\lambda}{2}) = Z_L$

ونستنتج من ذلك أيضاً مفهوم ممانعة الدخل لخط النقل كما يلي. عند دخل خط النقل، أي عند $z = -l$

يمكن أن نكتب:

$$\Gamma(z=-l) = \Gamma_{in} = \Gamma_l e^{-2j\beta l}$$

أي أن معامل الانعكاس عند دخل خط النقل يكون متأخرًا عن الطور عن معامل الانعكاس عند الحمل بمقدار $2\beta l$ بنفس الطور:

$$\beta l = \frac{2\pi}{\lambda} l = 2\pi \frac{l}{\lambda}$$