الفصل الثاني

نظرية خطوط النقلTransmission-lins theory

عناصر ومعادلات خط النقل :-

سنناقش في هذه الفقرة اهم ثوابت واساسيات خطوط النقل المعدنية (خط النقل المفتوح والكابل المحوري) كما سنتطرق الى أنواع معادلات خط النقل من حيث الخسارة.

اهم الثوابت والاساسيات:-

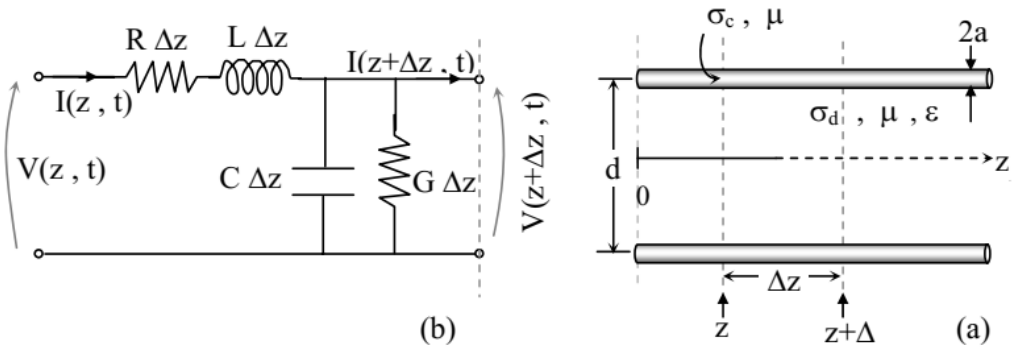
1) يعد **خط النقل** جزءا" من الدائرة الكهربائية في نظام الاتصالات، حيث ان توصيل خط النقل بين **المرسل** (مصدر الطاقة) و**المستقبل** (أي جهاز استلام كالهاتف مثلا) يؤدي الى اكتمال الدائرة الكهربائية.
2) اهم **خصائص الموصلين المستخدمين** هي:-
   - ✓ الموصلية $(\sigma_c \ {}^{1}/_{\Omega m})$.
   - ✓ نصف القطر a (أوb).
   - ✓ السماحية $(\varepsilon_0 \ F/m)$.
   - ✓ النفاذية $(\mu \ H/m)$.
3) اهم **خصائص الوسط الفاصل بين الموصلين** هي:-
   - ✓ الموصلية $(\sigma_d \ {}^{1}/_{\Omega m})$.
   - ✓ السماحية$(\varepsilon \ F/m)$.
   - ✓ النفاذية $(\mu_0 \ H/m)$.

✓ المسافة بين الموصلين (d).

4) يبين الشكل (2-1a) رسماً **توضيحياً لخط نقل** مبين عليه خصائصه المختلفة المبينة اعلاه، وقد اعتبر **الموصليين** المتوازيين يمتدان الى الانهاية **باتجاة المحور(z)** حيث ان (Δz) هو جزء صغير من هذا الخط وان مساحة مقطعهما **متساوية** والبعد بينهما (d) دائما **أكبر** من نصف قطر أي منهما.

5) الشكل (2-1b) يبين **الدائرة الكهربائية المكافئة** والممثلة لهذا الجزء (اي(Δz)) حيث إن مكوناتها هي كما يلي:-

- **R** هي **مقاومة الموصلين** المكونين لخط النقل **لكل وحدة طول.**
- **L** هي **حثية الموصلين** المكونين لخط النقل **لكل وحدة طول** (تم إهمال حثية الموصلين الذاتية).
- **C** هي **سعة الموصلين** المكونين لخط النقل **لكل وحدة طول.**
- **G** هي **موصلية الوسط الفاصل** بين الموصلين **لكل وحدة طول** (وتمثل **التسرب** الذي يحدث بين الموصلين).



الشكل (2-1):- رسم توضيحي يبين:-

a-خط نقل مبين عليه خصائصه

b-الدائرة الكهربائية المكافئة لطول قصير جدا Δz من خط النقل

6) ان الثوابت **(R,L,C,G)** تكون موزعة على كل خط النقل وتعتمد قيمتها على:-

- **طول** خط النقل حيث تكون العلاقة **طردية** بينه وبين قيم جميع الثوابت **(R,L,C,G)**.
- **سمك الاسلاك الناقلة** حيث يكون تاثيرها **عكسيا** على قيم الثوابت **(R,L)**.
- **المسافة بين الاسلاك** ويكون تاثيرها **عكسيا** على قيم الثوابت **(C,G)**.
- **نوعية المعدن** المصنوع منه الاسلاك.

7) يضيع جزء من الطاقة المنقولة **عبر خط النقل** فيما يسمى **بمفاقيد خط النقل** (Line Losses) والتي تشمل على:-

- مفاقيد **نحاسية** (Copper Losses) تضيع على شكل **حرارة** بسبب **المقاومة** R.
- مفاقيد **العازل الكهربائية** (Dielectric Losses) وتنتج من تاثير **الحرارة** على المادة **العازلة** بين موصلات خط النقل.
- مفاقيد **الاشعاع** (Radiation Losses) وتنتج عن **اشعاع** جزء من المجال المغناطيسي حول الموصل لاسيما عند **زيادة** التردد.

8) اذا كانت الاشاراة المنقولة ذات **ترددات عالية** فان تاثير الحثية والسعة **(L,C)** **اكبر بكثير** من تاثير المقاومة والموصلية **(R,G)** في **اضعاف** هذه الاشارات.

9) يوجد لكل خط نقل **ممانعة مميزة** (Characteristic Impedance) **(Z_0)**، ويمكن حسابها عند **الترددات العالية** بعد معرفة قيمة **الفولتية (V) والتيار (I)** عند اي نقطة على خط النقل من العلاقة:-

$$Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}}=\frac{V}{I} \qquad (\Omega)$$

حيث ان

L حثية خط النقل بوحدة الهنري.

C سعة خط النقل بوحدة الفاراد.

معادلات خط النقل:-

سنعتمد على نظام خط النقل ذو **الموصلين المتوازيين** في اشتقاق معادلة خط النقل وذلك لسهولة التعامل معه. ويمكن تحليل المعادلة الخاصة بهكذا خطوط بطريقتين:-

- معادلات خط النقل **مع وجود خسارة بالطاقة.**
- معادلات خط النقل **بدون وجود خسارة بالطاقة.**

معادلات خط النقل مع وجود خسارة:-

لنفرض لدينا خط نقل، كما موضح بالشكل (2-2)، مكون من سلكين موصلين متوازيين يمتدان إلى اللانهاية باتجاه المحور **z. مساحة** مقطعهما **متساوية** (أي لهما نفس نصف القطر) و**البعد** بين محوريهما دائما **ثابت** (d) وهو **أكبر** من نصف قطر أيا" من السلكين.

وان السلكين يحملان **تيارا**" عقديا مقداره **I(z)** في اتجاهين متعاكسين، كما ان **فرق الجهد** بينهما يساوي **V(z)** وهو ذو قيمه عقدية أيضا.

ملاحظة

ان قيمة كل من **التيار والفولتية** متغيرة مع تغير **المسافة (z)** على طول خط النقل ذلك لان خط النقل يحصل فيه **ضياع** في الطاقة عند **الترددات العالية.**

نفرض ان

- ❖ الممانعة لوحدة الطول = **Z**
- ❖ الممانعة لخط طولة (Δz) = (Δz) **Z**
- ❖ السماحية لوحدة الطول= **Y**

وعليه فأن مقدار **الهبوط** في **الفولتية** $\Delta \mathbf{V(z)}$ لهذه المسافة الصغيرة (Δz) على خط النقل هي:-

$$\Delta V = - IZ \ \Delta z \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث ان الاشارة **السالبة** هو **النقصان بالفولتية** باتجاه **زيادة** المسافة z

كما ان مقدار**التغير** في **التيار** لهذه المسافة الصغيرة (Δz) على خط النقل يسمى **بتيار النضوح** (Shunt current) بين الموصلين ويرمز له $\Delta \mathbf{I(z)}$ وهو:-

$$\Delta I = - VY \ \Delta z \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

ولنفس السبب فان الاشارة **السالبة** تعني **نقصان في تيار خط النقل** باتجاه **زيادة** المسافة z.

ويجب **ملاحظة** ان **(Y)** هي ليست مقلوب **(Z)**

عندما $(\Delta z \rightarrow 0)$

فاننا يمكن ان نجري **التقريب** الاتي:-

$\Delta I \rightarrow dI$ (تيار)

$\Delta z \rightarrow dz$ (البعد)

$\Delta V \rightarrow dV$ (الفولتية)

علية فان المعادلتين (1) و (2) تأخذ الصيغتين التالتين:-

$$\frac{dV}{dz} = -IZ \qquad \ldots\ldots (3)$$

$$\frac{dI}{dz} = -VY \qquad \ldots\ldots (4)$$

وعند **اشتقاق** المعادلتين (3) و (4) **مرة اخرى** بالنسبة **للبعد** (z) فاننا نحصل على:-

$$\frac{d^2V}{dz^2} = -Z\frac{dI}{dz} = YZV \qquad \ldots\ldots (5)$$

$$\frac{d^2I}{dz^2} = -Y\frac{dV}{dz} = YZI \qquad \ldots\ldots (6)$$

وبتعويض المعادلة (3) في (6) والمعادلة (4) في (5) نحصل على:-

$$\frac{d^2V}{dz^2} = YZV \quad \ldots\ldots (7)$$

$$\frac{d^2I}{dz^2} = YZI \quad \ldots\ldots (8)$$

يمكن كتابة المعادلتين أعلاه بالصيغة التالية:-

$$\frac{d^2V}{dz^2} = \gamma^2 V \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

$$\frac{d^2I}{dz^2} = \gamma^2 I \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

حيث تسمى (γ) **بثابت الانتشار** على خط النقل وهي تحسب من:-

$$\gamma^2 = YZ \qquad \rightarrow \quad \gamma = \pm\sqrt{YZ}$$

تســـمى المعادلتان (9) و(10) بمعادلات **خط النقل** او **معادلات التلغراف** وهما معادلتان تفاضليتان خطيتان من الرتبة الثانية ويحققان الحلين ($e^{\gamma z}$, $e^{-\gamma z}$).

علية فان الحل الكامل للمعادلة (9) هو:-

$$V = C_1 e^{-\gamma z} + C_2 e^{\gamma z} \qquad \ldots\ldots\ldots (11)$$

حيث ان (C_1 , C_2) هي معاملات لا على التعيين (arbitrary coefficient).

باستخدام المعادلة (11) في المعادلة (3) نحصل على الحل الخاص ب**التيار** وهو:-

$$I = \frac{\gamma}{\boldsymbol{Z}}(C_1 e^{-\gamma z} + C_2 e^{\gamma z}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(12)$$

ان طبيعة **الممانعة** لوحدة الطول ($\mathbf{Z}$) (في مقام المعادلة 12) تكون **حثية** بينما تكون طبيعة السماحية لوحدة الطول ($\mathbf{Y}$) **سعوية** حيث ان:-

$$\boldsymbol{Z} = R + j\omega L \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

$$\boldsymbol{Y} = G + j\omega C \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

حيث ان:-

(R) هي المقاومة لوحدة الطول.

(L) هو المحاثة لوحدة الطول.

(G) هي الموصلية لوحدة الطول.

(C) هي السعة لوحدة الطول.

بتعويض قيم ($\mathbf{Z}$) و($\mathbf{Y}$) من المعادلتين (13) و(14) في معادلة (γ) نحصل على:-

$$\gamma = \pm[(R + j\omega L)(G + j\omega C)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\gamma = \pm[(RG - \omega^2 LC) + j(LG + RC)\omega]^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots(15)$$

من معادلة (15) نستنتج ان (γ) كمية عقدية لذا يمكن كتابتها بالصيغه الاتية:-

$$\gamma = \alpha + j\beta \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (16)$$

حيث ان:-

(γ) ثابت **الانتشار** (propagation constant).

(α) ثابت **الاضمحلال** (damping constant).

(β) ثابت **الطور**(phase constant).

من العلاقتين (15) و(16) يمكن استخراج مايأتي:-

$$\gamma^2 = \left[\left(RG - \omega^2 LC\right) + j(LG + RC)\omega\right] \qquad \ldots\ldots (17)$$

$$\gamma^2 = \alpha^2 - \beta^2 + 2j\alpha\beta \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (18)$$

بمقارنة المعادلتين (17) و(18) نحصل على :-

$$\alpha^2 - \beta^2 = RG - \omega^2 LC \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (19)$$

$$2\alpha\beta = (LG + RC)\omega \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (20)$$

بحل المعادلتين اعلاه **انيا**" نحصل على:-

$$\alpha = \left\{ \frac{\left(RG - \omega^2 LC\right) + \left[\left(R^2 + \omega^2 L^2\right)\left(G^2 + \omega^2 C^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}}{2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

..... (21)

$$\beta = \left\{ \frac{-\left(RG - \omega^2 LC\right) + \left[\left(R^2 + \omega^2 L^2\right)\left(G^2 + \omega^2 C^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}}{2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

..... (22)

هاتين المعادلتين تعطي قيما معينة لكل من (α) و (β) **لجميع الترددات** من الصفر الى اللانهاية وعلى طول خط النقل.وان هذان الثابتان يؤثران على كل من **V** و**I** على طول خط النقل.

لايجاد قيم كل من (C_2,C_1) في المعادلتين (11) و(12)، سنعوض قيمة (Z=0) اي عندما يكون قيمة الجهد في بداية خط النقل، فنحصل على:-

$$V_{at\ z=0} = C_1 + C_2 \qquad \ldots\ldots\ldots(23)$$

$$V_{at\ z=0} = V_1 e^{j\omega t} + V_2 e^{j\omega t} \qquad \ldots\ldots\ldots(24)$$

بمقارنة المعادلتين نجد ان:-

$$C_1 = V_1 e^{j\omega t}$$

$$C_2 = V_2 e^{j\omega t}$$

وعلية فان المعادلة (11) تصبح:-

$$V = V_1 e^{j\omega t - \gamma z} + V_2 e^{j\omega t + \gamma z} \quad .....(25)$$

كذلك المعادلة (12) تصبح:-

$$I = \frac{\gamma}{Z}\left[V_1 e^{j\omega t - \gamma z} - V_2 e^{j\omega t + \gamma z}\right] \quad .....(26)$$

وعند تعويض قيمة (γ) المعادلتين اعلاه نحصل على:-

$$V = V_1 e^{j(\omega t - \beta z)}.e^{-\alpha z} + V_2 e^{j(\omega t + \beta z)}.e^{\alpha z} \quad ....(27)$$

$$I = \frac{\gamma}{Z}\left[V_1 e^{j(\omega t - \beta z)}.e^{-\alpha z} - V_2 e^{j(\omega t + \beta z)}.e^{\alpha z}\right] ....(28)$$

في هاتين المعادلتين اعلاه :-

الحد الاول يمثل موجه منتقلة باتجاه (z).

الحد الثاني يمثل موجه منتقلة باتجاه (-z).

وان المقدار $(\omega t - \beta z)$ يمثل **طور الموجة**، وان قيمتة تبقى ثابتة بالنسبة لشحض يسير بنفس سرعة الموجة.

هذا يعني ان:-

$\omega t - \beta z$ =constant

$$\frac{d}{dt}(\omega t - \beta z) = 0$$

للموجة المنتشرة باتجاه (z).

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta} = V_p \qquad \ldots\ldots\ldots(29)$$

حيث ان (V_p) هي سرعة الطور.

واما بالنسبة للموجة المنتشرة باتجاه (z−).

$$\frac{d}{dt}(\omega t + \beta z) = 0$$

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{\omega}{\beta} = -V_p \qquad \ldots\ldots\ldots(30)$$

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = f\lambda \qquad \ldots\ldots\ldots(31)$$

حيث ان:-

(ω) هو التردد الزاوي.

(f) هوالتردد الخطي.

(λ) هو الطول الموجي.

علية فان

$$\beta = \frac{\omega}{f\lambda} = \frac{2\pi f}{f\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \ldots\ldots\ldots(32)$$

جامعة البصرة

كلية العلوم

قسم الفيزياء

رقم المقرر:- ف420

اسم المقرر:- المايكروويف

عدد الوحدات:-2

د.رانيا مسلم داود