# خطوط النقل ومعدل الفقد:-

كلما شرحت الخصائص الكهربائية لخطوط النقل يمكن معرفة مقدار عملية الفقد فيها والفقد في الخطوط العملية لانستطيع أن نتجاهله . **وهناك ثلاثة أنواع** من الفقد تحدث في خطوط النقل وهي:-

- **<u>الفقدان في الموصل:</u>** المقاومة في أي موصل لا تكون صفر فعندما يمر التيار في خط النقل تتشتت الطاقة وذلك من خلال الفقد على **شكل حرارة** وأن التقليل في المقاومة سوف يقلل من فقد الطاقة في الخط بشكل غير مباشر. ان المقاومة تتناسب مع مساحة المقطع المستعرض للخط. واستخدام الأسلاك مع مساحة مقطع مستعرض كبير يكون مرغوب فيه و من الطبيعي أن حجم السلك سوف يسبب التغير في خصائص الممانعة في خط النقل. وفي **الترددات العالية** فأن الفقد يكون بسبب التأثيرات السطحية فعندما يمر **تيار مستمر** عبر موصل فان حركة الإلكترونات عبر المقطع المستعرض تكون منتظمة، ولكن الحالة تتغير عندما تنطبق إشارة **التيار المتناوب** فان المجال المنتظم لكل إلكترون يطوق الإلكترونات الأخرى هذه الظاهرة تسمى **الحث الذاتي**. شدة الفيض في المركز تكون جيدة و حركة الإلكترونات في هذه النقطة تكون منخفضة، وعندما يزيد التردد تزيد مقاومة التيار في مركز السلك فينخفض التيار المار في مركز السلك و أيضا الكثير من الإلكترونات تتدفق على سطح السلك .

- **<u>الفقد في العازل:</u>** الفقد هنا يتناسب طرديا مع الفولتية الماره في العازل و يزيد مع التردد و مقترن مع فقد التأثيرات السطحية هذا الفقد يقل عندما يستخدم عازل هوائي في الخط و في حالات كثيرة يتطلب استخدام عازل صلب. و يستخدم عازل يكون ثابت العزل له قليل و ثابت.

❖ **<u>الفقد في الاشـــعاع</u>** : المجال الالكتروســتاتيكي والكهرومغناطيســي يطوقان الموصــل مسـببان فقد في خطوط النقل. عمل المجال الالكتروسـتاتيكي يكون شـحن هدف مجاور بينما التغير في المجال المغناطيســي يســبب ســريان قوة دافعة كهربائية محتثة في الموصـــلات القريب، ويتم تقليل هذا الفقد بإنهاء خط النقل بمقاومة حمل مســاوية لخصـائص ممانعة خط النقل (خاصـية الموائمة). وأن مشـكلة فقد الإشـعاع تتولد بشـكل كبير فقط في خطوط النقل ذات السلكين المتوازيين.

## أولا" :- خطوط النقل التي لا تعاني من الفقد (عديمة الفقد lossless lines):-

ســـيتم فيما يلي معالجة خطوط النقل التي **لا تعاني** من الفقد وهذا يمكن أن يكون هو واقع الحال لخطوط النقل **قصيرة الطول** حيث يمكن **إهمال الفقد** (**α**) إذا كانت قيمته قليلة. ويتم تحديد خصائص خط النقل الذي لا يعاني من الفقد من خلال **افتراض** :-

- أن قيمة ثابت التوهين تكون **مهملة** (**α**=0) أو ( **α**< < 1).
- أو اعتبار (αL<<1) حيث إن (L) يمثل طول خط النقل.

وهذا يمكن أن يعني من الناحية التفصـيلية أن(**R ≈ G≈ 0**) وفي هذه الحالة يصـبح ثابت الانتشار لخط النقل كما يلي:-

$$\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)\ (G + j\omega c)} \approx j\omega \sqrt{LC}\ = j\beta \qquad \ldots\ldots\ldots (33)$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad \text{rad/m} \qquad \ldots\ldots\ldots(34)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega c}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega \qquad \ldots\ldots\ldots(35)$$

وعليه فان المعادلتين (27) و (28) تصبح كالتالي:-

$$\boldsymbol{V = V_1 e^{-j\beta z} + V_2 e^{j\beta z}} \qquad \boldsymbol{\ldots\ldots\ldots(36)}$$

$$\boldsymbol{I = \frac{\gamma}{Z}\left[V_1 e^{-j\beta z} - V_2 e^{j\beta z}\right]} \qquad \boldsymbol{\ldots\ldots\ldots(37)}$$

$$\frac{\gamma}{Z} = \frac{1}{Z_0} \qquad \ldots\ldots\ldots(38)$$

ان المعادلتين (36) و(37) تمثل **معادلة خط النقل بدون خسارة** ويمكن ان نستنتج منهما ان كلا من الفولتية والتيار يتكونان من موجتين تسيران في اتجاهيين متعاكسين على خط النقل يمثلهما المقدارين $(V_2, V_1)$ تسير الأولى باتجاه الحمل والثانية مبتعدة عنه. كما نلاحظ حذف عامل الزمن $(e^{j\omega t})$ من المعادلتين وذلك لسهولة العمل مقترحين ان $(V_2, V_1)$ يتضمنان هذا العامل.

## ثانيا" :- خطوط النقل التي تعاني من الفقد [ذات الخسارة الواطئة low loss line$(\frac{G}{\omega C}, \frac{R}{\omega L})$]:-

تستعمل خطوط النقل اما لنقل قدرة لها **تردد واحد** او في الاتصالات السلكية لنقل موجات **مختلفة التردد** وهذا قد يؤدي الى حدوث تشوية للموجة. وللتخلص من هذا التشوية يقتضي عدم اعتماد كلا من سرعة الطور $(V_p)$ وثابت الاضمحلال $(\alpha)$ على **التردد**.

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

$$\gamma = \left[\left(RG - \omega^2 LC\right) + j(LG + RC)\omega\right]^{1/2}$$

نستخرج $\left[-\omega^2 LC\right]^{1/2}$ عامل مشترك لنحصل على:-

$$\gamma = \sqrt{-\omega^2 LC}\left[\left(1 - \frac{RG}{\omega^2 LC}\right) - j\left(\frac{G}{\omega C} + \frac{R}{\omega L}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots (39)$$

ولكي تكون الخسارة في **اوطئ** قيمة لها يجب ان تكون **(G و R)** في خطوط النقل المصنعة ذات قيمة **واطئة**. بمعنى

$$\frac{R}{\omega L} \ll 1$$

$$\frac{G}{\omega C} \ll 1$$

وبالتالي فان المقدار $\left(\frac{RG}{\omega^2 LC}\right)$ سوف **يهمل** بالنسبة الى **الواحد** لذا فان المعادلة **(39)** سوف تصبح:-

$$\gamma \cong \sqrt{-\omega^2 LC}\left[1-j\left(\frac{G}{\omega C}+\frac{R}{\omega L}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots(40)$$

وبسبب صغر الحد الخيالي $\left(j\left(\frac{G}{\omega C}+\frac{R}{\omega L}\right)\right)$، كما ذكرنا، فان معادلة (40) يمكن ان تفتح باستخدام مفكوك تايلر الذي هو

$$(1-x)^n = 1-nx+\frac{n(n-1)}{n!}x^2-\cdots \qquad for\ \ x<1$$

علية فان

$$\left[1-j\left(\frac{G}{\omega C}+\frac{R}{\omega L}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \cong 1-\frac{1}{2}j\left(\frac{G}{\omega C}+\frac{R}{\omega L}\right)+\cdots$$

$$\therefore \gamma \cong \sqrt{-\omega^2 LC}\left[1-j\left(\frac{G}{2\omega C}+\frac{R}{2\omega L}\right)\right] \quad \ldots\ldots(41)$$

ولانه في الترددات العالية ينظم خط النقل بحيث يكون :-

$$\frac{G}{2\omega C} < \frac{R}{2\omega L}$$

$$\therefore \gamma = \sqrt{-\omega^2 LC}\left(1-j\frac{R}{2\omega L}\right)$$

باعادة ترتيب المعادلة اعلاه نحصل على **ثابت الانتشار** لخط النقل ذو خسارة **واطئة**:-

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC}\left(1-j\frac{R}{2\omega L}\right) \qquad \ldots\ldots..(42)$$

$$\therefore \alpha = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} \qquad \ldots\ldots\ldots(43)$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \qquad \ldots\ldots\ldots(44)$$

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \ldots\ldots\ldots(45)$$

من المعادلة اعلاه نلاحظ ان سـرعة الطور $V_p$ في خطوط النقل ذات **الخسـارة الواطئة** لاتعتمد على **التردد**، لذلك فان خط النقل يمكنه نقل حزمة من الترددات بدون تشـــوية. اذن لكي ينقل الخط الاشـارة بخسـارة واطئة وبدون تشـوية يجب ان يكون المقداران $\left(\frac{G}{\omega C} + \frac{R}{\omega L}\right)$ صـغيرين بالنسبة للواحد.

## ثالثا" :- الخط الموائم:-

اذا كان خط النقل **لانهائي الطول** وفي بداية الخط **(z=0)** كانت الفولتية هي $(V_0)$ فان:-

$$\because V = V_1 e^{j\omega t-\gamma z} + V_2 e^{j\omega t+\gamma z}$$

$$\because I = \frac{\gamma}{Z}\left[V_1 e^{j\omega t-\gamma z} - V_2 e^{j\omega t+\gamma z}\right]$$

في **بداية** خط النقل (اي عند **z=0 , t=0**) فان الفولتية هي $(V_0 = V_1 + V_2)$ وان:-

$$\therefore V = V_1 e^{-\gamma z} + V_2 e^{\gamma z} \qquad \ldots\ldots(46)$$

$$\therefore I = \frac{\gamma}{Z}[V_1 e^{-\gamma z} - V_2 e^{\gamma z}] \qquad \ldots\ldots(47)$$

اما عند **نهاية** خط النقل الذي طولة **مالانهاية** (z=∞) فان الفولتية هي $(V = 0)$ علية فانه في نهاية الخط المعادلة (46) تصبح:-

$$V = 0 = V_1 e^{-\infty} + V_2 e^{\infty}$$

$$\therefore V_2 = 0$$

وهذا يعني انه لاتوجد **موجة مرتدة** باتجاه (-z) وانما تنتقل باتجاه واحد وهو (z).

$$V_1 = V_0$$

علية فان معادلتي **الفولتية والتيار** لخط النقل **لانهائي الطول وبخسارة** هي:

$$\therefore V = V_0 e^{-\gamma z} \qquad \ldots\ldots(48)$$

$$\therefore I = \frac{\gamma}{Z} V_0 e^{-\gamma z} \qquad \ldots\ldots(49)$$

اما معادلتي **الفولتية والتيار** لخط النقل **لانهائي الطول وبدون خسارة** هي:

$$\therefore V = V_0 e^{-\beta z} \qquad \ldots\ldots(50)$$

$$\therefore I = \frac{\gamma}{Z_0} V_0 e^{-\beta z} \qquad \ldots\ldots(51)$$

وللتخلص من الموجة المرتدة في خط النقل فانه:-

**(نظريا)** يتم جعل طول خط النقل **لانهائي**.

**(عمليا)** يتم ربط **ممانعة حمل** $(Z_r)$ في نهاية خط النقل الذي طولة $(\ell)$ وتكون هذه الممانعة **مساوية** الى **الممانعة المميزه** $(Z_0)$ لذلك الخط.

**مماسبق يمكن ملاحظة:-**

تكون قيمة الممانعة المميزه في خط نقل ذو خسارة هي$(Z_0 = \frac{Z}{\gamma})$

تكون قيمة الممانعة المميزه في خط نقل عديم الخسارة هي$(Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}})$

تكون قيمة الممانعة المميزه في خط نقل لا نهائي الطول هي$(Z_0 = \frac{V}{I})$

**مميزات خـط النقل بدون خسارة:-**

يمكن حل معادلات خط النقل **بدون خسارة** وايجاد حل لمعادلتي **الفولتية** (V) و**التيار** (I) لها عن طريق قياس قيمة كل من الفولتية والتيار في **بداية خط** النقل وهي $(I_0, V_0)$ عند $(z = 0)$ وفي **نهاية** خط النقل وهي $(I_\ell, V_\ell)$ عند $(z = \ell)$ ، ولكن هذه الطريقة غير كفوءة وغير عملية في **الترددات العالية** حيث اننا لانستطيع قياس الفولتية والتيار باستعمال الفولتميتر والاميتر عند هذه الترددات. لذلك **نستعيض** عنها **بطريقة اخرى** وهي قياس بعض **المعاملات** الخاصة بخط النقل والتي تعطينا فكرة عن الفولتية والتيار في **اي نقطة** على طول خط النقل.

لقد وجد انه من الافضل قياس **بعد** اي نقطة على خط النقل **من نهاية الخط** (نهاية الحمل)، لذلك **سنستبدل المسافة** $(z)$ وهي المسافة من **بداية** خط النقل (الحمل) في جميع المعادلات السابقة **بدلالة المسافة** $(s)$ وهو بعد جديد يمثل المسافة من **نهاية** خط النقل (الحمل) وسوف نعتبر الاتجاه **الموجب** من **نهاية** الخط باتجاه **بداية** الخط.

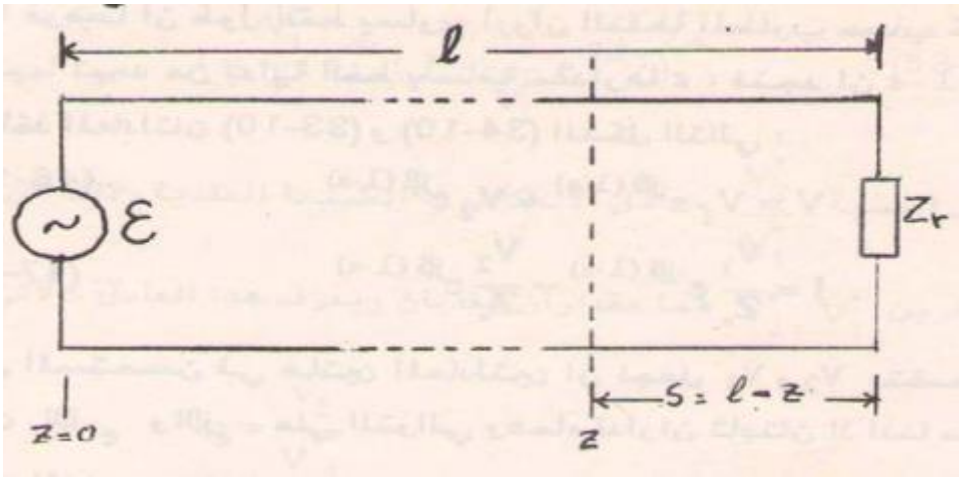
نفرض خط نقل **طولـه** $(\ell)$ وممـانعته **المميزه** هي $(Z_0)$ وينتهي بممانعة $(Z_r)$ كما مبين في الدائرة ادناه.

وكما مر علينا ســابقا فان مقدار $(I,V)$ في نقطة تبعد **مســافة** $(z)$ عن النهاية المرســلة هي:-

$$V = V_1 e^{-j\beta z} + V_2 e^{j\beta z}$$

$$I = \frac{1}{Z_0}\left[V_1 e^{-j\beta z} - V_2 e^{j\beta z}\right]$$

بما ان خط النقل هو بدون خسارة فان $(\alpha = 0)$ وان $(Z = \ell - s)$.




**الشكل (2-7):- رسم توضيحي يبين خط نقل ذو سلكين متوازيين**

$$V = V_1 e^{-j\beta(\ell - s)} + V_2 e^{j\beta(\ell - s)} \qquad \ldots\ldots\ldots(52)$$

$$I = \frac{1}{Z_0}\left[V_1 e^{-j\beta(\ell - s)} - V_2 e^{j\beta(\ell - s)}\right] \qquad \ldots\ldots\ldots(53)$$

لسهولة الحل يفضل جعل الثوابت $(e^{-j\beta\ell}, e^{j\beta\ell})$ ضمن $(V_2, V_1)$ وكما يلي:-

$$V_1^* = V_1 e^{-j\beta\ell} \qquad \ldots\ldots\ldots(54)$$

$$V_2^* = V_2 e^{j\beta\ell} \qquad \ldots\ldots\ldots(55)$$

حيث أن كلا من $(V_1^*, V_2^*)$ مقداران عقديان، وبتعويض المعادلتين أعلاه في المعادلتين (52) و(53) نحصل على:-

$$V = V_1^* e^{j\beta s} + V_2^* e^{-j\beta s} \quad \text{.....(56)}$$

$$I = \frac{1}{Z_0}(V_1^* e^{j\beta s} - V_2^* e^{-j\beta s}) \quad \text{.....(57)}$$

نستنتج من العلاقتين أعلاه ان كلا من الفولتية والتيار يتكونان من موجتين تسيران في اتجاهيين متعاكسين على خط النقل يمثلهما المقداريين $(V_1^*, V_2^*)$ الأولى تسير باتجاه الحمل والثانية تبتعد عنه. ويمكن إعادة كتابة المعادلتين السابقتين كالتالي:-

$$\therefore V = V_1^* e^{j\beta s}(1 + \frac{V_2^*}{V_1^*} e^{-2j\beta s}) \quad \text{.....(58)}$$

$$I = \frac{V_1^*}{Z_0} e^{j\beta s}(1 - \frac{V_2^*}{V_1^*} e^{-2j\beta s}) \quad \text{.....(59)}$$

تمثل النسبة $(V_2^*/V_1^*)$ **معامل الانعكاس** (النسبة بين فولتية الموجة المنعكسة والساقطة) هو ذا الطبيعة العقدية. حيث ان

$$\rho = \frac{V_2^*}{V_1^*} = |\rho| e^{j\psi} \quad \text{.....(60)}$$

علية فان معادلتي الفولتية والتيار ستصبح:-

$$\therefore V = V_1^* e^{j\beta s}(1 + |\rho| e^{j(\psi - 2\beta s)}) \quad \text{.....(61)}$$

$$\therefore I = \frac{V_1^*}{Z_0} e^{j\beta s}(1 - |\rho| e^{j(\psi - 2\beta s)}) \quad \text{.....(62)}$$

المعادلتين اعلاه كل منهما تمثل **معادلة موجة واقفة (SW)** (standing wave) لكل من **الفولتية والتيار** على خط النقل. وان **الموجة الواقفة** (standing wave) لها أهمية في التعامل مع خطوط النقل وهي **تتكون** عندما يتم ربط **ممانعة حمل** في **نهاية** خط النقل **لاتساوي** الممانعة **المميزة** $(Z_0)$ لهذا الخط الذي ينقل موجة ذات تردد معين، حيث عندها سوف **تنعكس** الموجة من **نهاية** خط النقل لتكون موجة واقفة لها نهايات عظمى وصغرى ثابتة بالتتابع اي ان.

$$\text{SWR} = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

من ملاحظة المعادلة (61) نجد أن:-

**الفولتية** تأخذ قيمتها **العظمى** عندما يكون

$$\exp[j(\psi - 2\beta s)] = 1 \quad \text{.....(63)}$$

بينما تأخذ قيمتها **الصغرى** عندما يكون

$$\exp[j(\psi - 2\beta s)] = -1 \quad \text{.....(64)}$$

من معادلة (64) نحصل على:-

$$\psi - 2\beta s = (2m + 1)\pi \quad \text{.....(65)}$$

حيث (m=0,1,2,....).

ان المعادلة (65) تحدد **مواضع النهايات الصغرى** للموجة الواقفة لأسيما أن المقدار $(V_1^*)$ هو مقدار ثابت.

أن المسافة بين اي **نهايتين صغريتين متتاليتين** يمكن ايجادها عند التعويض في المعادلة الاخيرة بقيمتين متتاليتين للرقم (m)، فمثلا ناخذ الرقمين (m) و (m+1) فيكون لدينا موقع النهاية الصغرى (m) هو:-

$$\psi - 2\beta s_m = (2m+1)\pi$$

بينما يكون موقع النهاية الصغرى (m+1) هو:-

$$\psi - 2\beta s_{m+1} = (2(m+1)+1)\pi$$

وبطرح المعادلتين الأخيرتين الواحدة من الأخرى نحصل على:-

$$s_m - s_{m+1} = \frac{\pi}{\beta}$$

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

$$\therefore s_m - s_{m+1} = \frac{\lambda}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots(66)$$

المعادلة اعلاه تعني ان البعد بين نهايتين صغيرتين متتاليتين لموجة واقفة **يساوي** نصف طول الموجة $(\frac{1}{2}\lambda)$ التي يحملها خط الحمل.

## استخراج الممانعة المميزة:-

نفرض ان خط نقل ممانعتة المميزه $(Z_0)$ ربط في **نهايتة** حملا" معينا" ممانعتة $(Z_r)$، فان **الممانعة في اي نقطة** على خط النقل تبعد بمسافة **(s) عن نهاية** الخط يرمز لها $(Z_s)$ ويمكن ايجادها من المعادلتين (58) و(59) وهي:-

$$\therefore Z_s = \frac{V_s}{I_s} = Z_0 \frac{1 + \rho e^{-2j\beta s}}{1 - \rho e^{-2j\beta s}} \quad \text{.....(67)}$$

- لحساب **ممانعة الحمل** $(Z_r)$ في **نهاية** الخط نعوض عن **(s=0)** في المعادلة (67) فنحصل على:

$$\therefore Z_r = Z_0 \frac{1+\rho}{1-\rho} \quad \text{.....(68)}$$

- لحساب **ممانعة الحمل المعايرة** $(\acute{Z}_r)$ نستخدم المعادلة (68) حيث نحصل على:-

$$\acute{Z}_r = \frac{Z_r}{Z_0} = \frac{1+\rho}{1-\rho} \quad \text{.....(69)}$$

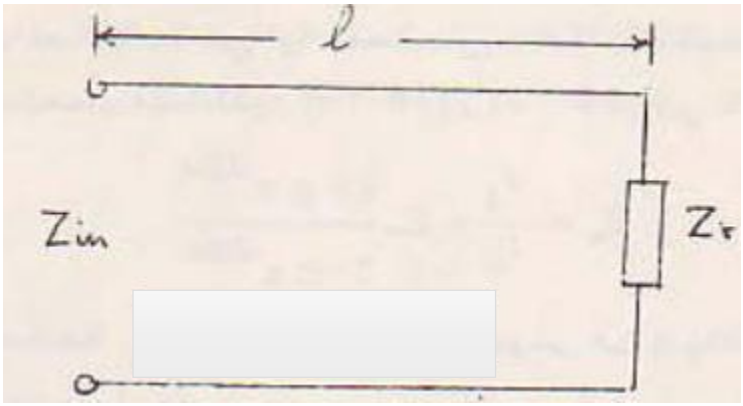
ومن المعادلة (69) نحصل على:-

$$\rho = \frac{\acute{Z}_r - 1}{\acute{Z}_r + 1} \quad \text{.....(70)}$$

حيث ان $-1 \le \rho \le 1$

والآن **نفرض** أن لدينا خط نقل طوله ($\ell$) **وممانعة الدخول** فيه تساوي $(\boldsymbol{Z_{in}})$ وصل من نهايته بحمل مقداره $(\boldsymbol{Z_r})$ كما في الشكل (2-8). فانه لحساب قيمة $(\boldsymbol{Z_{in}})$ **المعايرة** نستخدم المعادلتين (67) و (70) حيث ($\ell = s$) لنحصل على:-

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1+\rho e^{-2j\beta\ell}}{1-\rho e^{-2j\beta\ell}} \quad \ldots\ldots \quad (\text{at } Z_{in}=Z_s)$$




**الشكل (2-8):- رسم توضيحي يبين خط نقل ذو سلكين متوازيين**

$$\acute{Z}_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_0} \qquad \ldots\ldots..(71)$$

$$\grave{Z}_{in} = \frac{1 + \frac{\grave{Z}_r - 1}{\grave{Z}_r + 1} e^{-2j\beta l}}{1 - \frac{\grave{Z}_r - 1}{\grave{Z}_r + 1} e^{-2j\beta l}} \qquad \ldots\ldots..(72)$$

وبأجراء بعض العمليات الرياضية البسيطة نحصل على العلاقة التالية:

$$Z'_{in} = \frac{Z'_r + j \tan \beta l}{1 + jZ'_r \tan \beta l} \qquad \ldots\ldots\ldots(73)$$

**ملاحظة:-**

هناك حالتان خاصة هما:

- عندما تكون الدائرة **مفتوحة** ( $Z_r = \infty$ ) .
- عندما تكون الدائرة **مغلقة** (قصيرة)( $Z_r = 0$ ) .