المحاضرة رقـــم : ٢٢

عنوان المحاضرة : خطوط نقل القوي الكهربية

Transmission Lines

١- مقـــــــــدمة :

يعتبر نقل الطاقة الكهربية من محطات التوليد الي المستهلك هو الهدف الأساسي من انشاء خطوط النقل كما يجب المحافظة علي قيمة الجهد الكهربي عند النقط المختلفة في حدود معينة . و تختص خطوط النقل الكهربي بأربعة ثوابت هي : المقاومة – المفاعلة – السعة – التوصيلية . و في العادة تهمل التوصيلية لصغر قيمتها .

و تقسم خطوط نقل القوي الكهربية طبقا لأطوالها الي المجموعات التالية:

أ) خطوط قصيرة و يقل طولها عن ٨٠ كيلومتر

ب) خطوط متوسطة الطول و يتراوح طولها ما بين ٨٠ الي ٢٤٠ كيلومتر

ج) خطوط طويلة و يزيد طولها عن ٢٤٠ كيلومتر.

و تختلف كل مجموعة عن الأخري في طريقة تمثيل الثوابت و اخذها في الاعتبار او اهمالها. و قد وجد أن دقة النتائج مقبولة في كل حالة مع البساطة في الحسابات. و في هذا المجال تهمل السعة في المجموعة الأولي و تؤخذ في الاعتبار كقيمة مركزة عند نقطة معينة في المجموعة الثانية ، أما في المجموعة الثالثة فيلزم اعتبار توزيع السعة علي طول الخط حيث ترتفع قيمة التيار السعوي علي الخط لزيادة الطول.

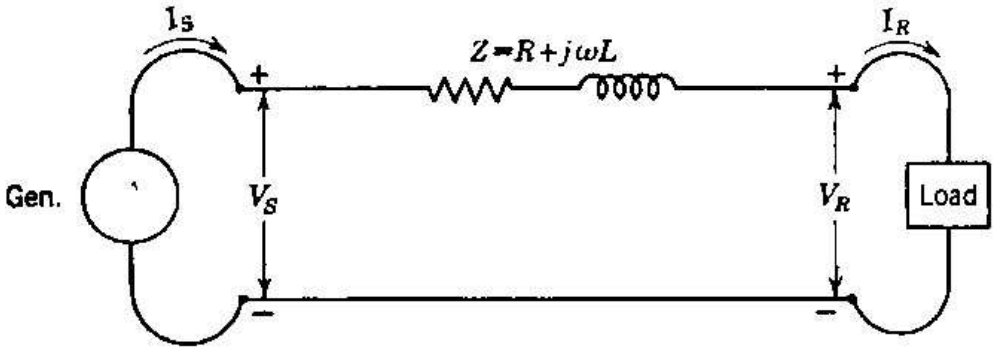
٢- خطوط القوي القصيرة Short Transmission Line

يبين الشكل (١) الدائرة المكافئة للخط الذي يمثل بمقاومة R قيمتها تساوي المقاومة الكلية للخط ومفاعلة X قيمتها أيضا تساوي المفاعلة الكلية للخط ، و تهمل التوصيلية و السعة. و في هذه الحالة يكون التيار عند المولد I_s يساوي التيار عند الحمل الكهربي I_r و تكون العلاقة بين التيار و الجهد كما يلي:

$$I_s = I_r = I$$
$$Vs = V_r + I_s (R + jX)$$
$$= V_r + I Z$$

حيث Z هي ممانعة الخط.

و المعادلات السابقة هي معادلات اتجاهية (مركبة) ، و يلاحظ أن اتجاه السهم للتيار و الجهد في شكل (١) يمثل الاتجاه في نصف الدورة الموجبة للتيار المتردد ، و هو أيضا يمثل اتجاه انتقال القدرة الكهربية من المولد الي الحمل الكهربي.



شكل (١)

ويحدد أداء الخط الكهربي electrical performance **بالقيم التالية:**

أ) التغير في الجهد الكهربي عند نقطة الحمل voltage regulation **و يعرف بالمعادلة التالية:**

Percentage regulation = ($|V_{NL}|$ - $|V_{FL}|$ / $|V_{FL}|$) x 100

Where:

$|V_{NL}|$ = magnitude of receiving end voltage at no load (NL)

القيمة العددية للجهد عند نقطة الحمل في حالة اللاحمل (فصل الحمل) و تساوي في هذه الحالة جهد المصدر الكهربي (المولد).

|VFL| = magnitude of receiving end voltage at full load

القيمة العددية للجهد عند نقطة الحمل عند التحميل الكلي ، و تختلف في هذه الحالة عن جهد المولد الكهربي طبقا لمعامل القدرة للحمل و ثوابت الخط الكهربي. و بشكل عام اذا كان معامل القدرة ($\cos \phi$ **) حثي متأخرا** (lag) **فان القيمة العددية للجهد عند الحمل تكون أقل من القيمة العددية للجهد عند المصدر. و الشكل (٢) يوضح هذه الحالة العامة حيث يمكن أن تزيد قيمة الجهد عند الحمل في حالة معامل القدرة السالب** (lead)**. و العلاقة التقريبية التالية تعطي قيمة التغير في الجهد كدالة في معامل القدرة:**

Percentage regulation = [(I R $\cos \phi \pm$ I X $\sin \phi$) /V_r] x 100

ب) الفقد في القدرة الكهربيةtransmission line losses **، و تمثل الفقد الفعال و الغير فعال في ممانعة الخط و يعبر عها كالتالي :**

Active losses = I^2 R

Reactive losses = I^2 X

و في حالة النظام ثلاثي الأوجه تضرب القيمة في ٣.

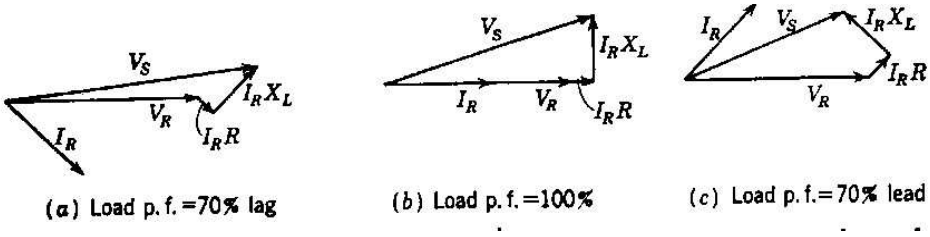
ج) كفائة خط النقل transmission line efficiency **، و تعطي بالعلاقة:**

η = (1 – loss/P_s) x 100

Where

$P_s = V_s I_s \cos \phi$ in single phase

$P_s = \sqrt{3}\, V_s\, Is \cos\phi$ in 3 phase



شكل (٢)

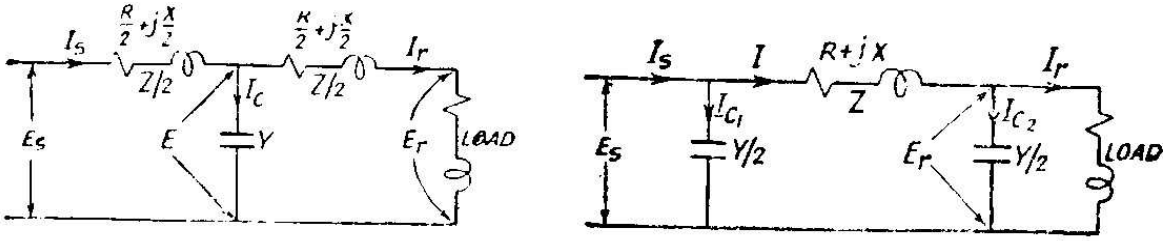
٣- **خطوط النقل متوسطة الطول Medium transmission line**

في هذه الخطوط تهمل التوصيلية و توجد حالتان لتمثيل سعة الخط :

الحالة الأولي : تعتبر السعة الكلية للخط مركزة عند نقطة واحدة في منتصف الخط و تسمي هذه الدائرة T- circuit **و الشكل (٣) يوضح هذه الدائرة. و يلاحظ أن القيم الكلية للمقاومة والمفاعلة تم تقسيمها الي جزئين متساويين علي جانبي نقطة المنتصف حيث توصيل السعة. و علاقات الجهد بالتيار طبقا للتالي:**

$V_m = V_r + I_r\, Z/2$
$I_c = Y\, V_m$
$V_m = (I_c + I_r)\, Z/2$
$I_s = I_r + Y\, V_m$

و الشكل (٤) يوضح الرسم المتجهي للجهد و التيار في حالة خط النقل متوسط الطول الحالة الأولي.



شكل (٣)

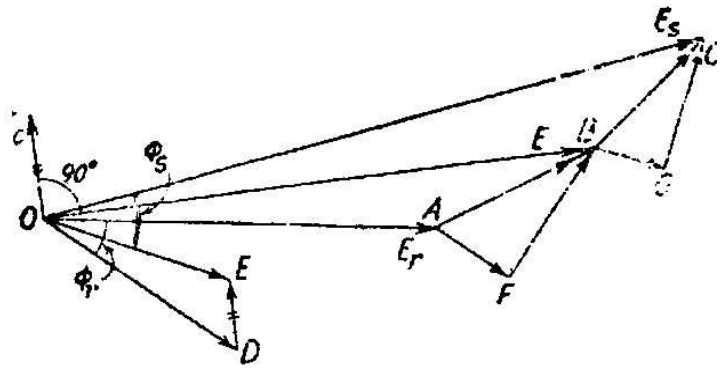


Fig. E 2·2

شكل (٤)

الحالة الثانية : تقسم السعة الكلية للخط الي جزئين متساويين عند بداية و نهاية الخط و تسمي هذه الدائرة π- circuit و الشكل (٥) يوضح هذه الدائرة. و علاقات الجهد و التيار طبقا للتالي:

$I_{c2} = V_r \times Y/2$

$I_{c1} = V_s \times Y/2$

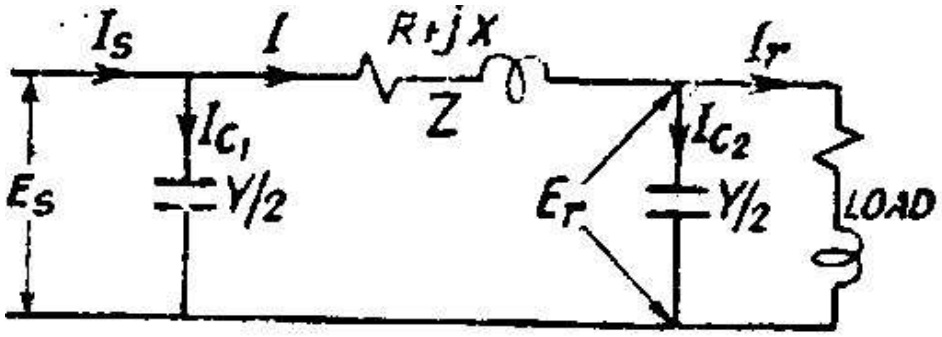
$I_s = I_{c1} + I_{c2} + I_r$

$= V_s Y/2 + V_r Y/2 + I_r$

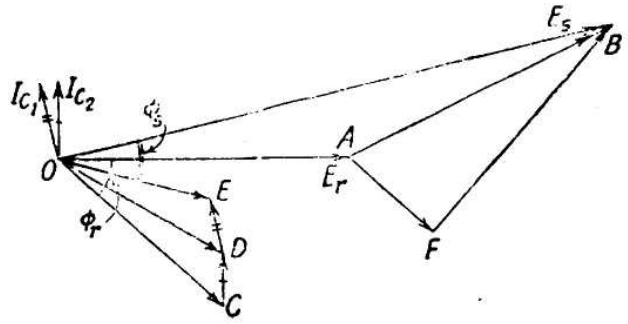
$V_s = V_r + Z (I_r + V_r Y/2)$

و يوضح شكل (٦) رسم متجهات الجهد و التيار . ويلاحظ ان المعادلات السابقة انه اذا كانت قيم السعة صغيرة فان قيمة السماحية Y تكون صغيرة و باهمالها سوف تعطي حالة و معادلات الخط القصير. كما يلاحظ ايضا ان دائرتي T- circuit و π- circuit غير متكافئتين كما في حالة تحويل نجمة الي دلتا ، ولكن تعطي الدائرتان نتائج متقاربة.

و يكون حساب اداء الخط (التغير في الجهد الكهربي عند الحمل – الفقد في القدرة الكهربية – كفائة الخط) كما في طرق الخطوط القصيرة.



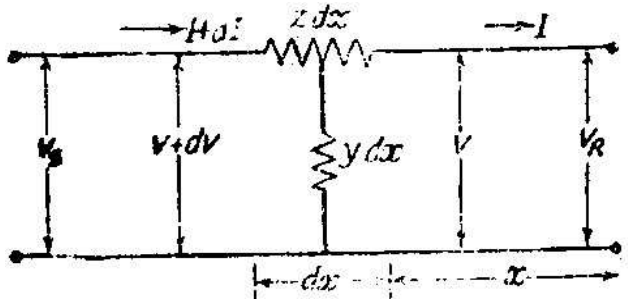
شكل (٥)



شكل (٦)

٤- خطوط النقل الطويلة Long transmission lines

تعتبر ثوابت الخط موزعة علي طول الخط و ليست مجمعة في نقطة أو نقطتين و ذلك لضمان دقة الحسابات. و الشكل (٧) يوضح تمثيل الخط في الدائرة المكافأة الاحادية بين وجه و خط التعادل و ذلك لنظام ثلاثي الأوجه.



شكل (٧)

و في حالة نظام الوجه الواحد single phase **تكون قيم الممانعة** X **و السماحية** Y **خاصة بالدائرة بين خطي الدائرة و ليس بين الخط و نقطة التعادل كما في نظام الثلاثة أوجه.**

و لاستنتاج علاقات الجهد و التيار يؤخذ عنصر صغير طوله dx **علي مسافة** x **من نهاية الخط و له ممانعة علي التوالي** Z dx **و سماحية** Y dx **و التغير في الجهد** dV **و التغير في التيار بسبب السعة المتصلة علي التوازي** dI**. و يلاحظ ان الجهد و التيار يزدادان مع زيادة قيمة** x **، لذلك :**

$$dV = I Z dx$$
$$dV/dx = I Z$$
$$dI = V Y dx$$
$$dI/dx = VY$$

باجراء التفاضل علي المعادلات السابقة بالنسبة للمسافة x **:**

$$d^2V/dx^2 = Z\, dI/dx$$
$$d^2I/dx^2 = Y\, dV/dx$$

بالتعوض عن قيم dI/dx **و** dV/dx **نحصل علي :**

$$d^2V/dx^2 = Z\, YV$$

$$d^2I/dx^2 = Y\,ZI$$

و هما معادلاتان تفاضليتان خطيتان و الحل في الصورة :

$$V = A_1 e^{\sqrt{YZ}\,x} + A_2 e^{-\sqrt{YZ}\,x}$$

و باجراء التفاضل مرتان علي المعادلة السابقة نحصل علي :

$$d^2V/dx^2 = Y\,Z\,(A_1 e^{\sqrt{YZ}\,x} + A_2 e^{-\sqrt{YZ}\,x})$$

اي ان التفاضل الثاني يساوي يساوي مقدار ثابت (Y Z) مضروب في V ، و بالتالي يمثل حل المعادلة. و يمكن كتابة معادلة مماثلة للتيار كالآتي:

$$I = (1/\sqrt{(Z/Y)})\,[A_1 e^{\sqrt{YZ}\,x} - A_2 e^{-\sqrt{YZ}\,x}]$$

حيث أن : $dV/dx = IZ$

و لتعيين الثوابت A_1 و A_2 تستخدم الشروط عند نهاية الخط و هي :

$$At\ x = 0 :\ V = V_r \text{ and } I = I_r$$

و بالتعويض ينتج :

$$V_r = A_1 + A_2$$
$$I_r = (1/\sqrt{(Z/Y)})\,[A_1 - A_2]$$
$$\text{Put } Z_c = \sqrt{YZ}\text{ , then}$$
$$A_1 = (V_r + I_r Z_c)/2$$
$$A_2 = (V_r - I_r Z_c)/2$$

و بالتعويض $\gamma = \sqrt{YZ}$ **يمكن الحصول علي الصورة الأساسية لمعادلات الجهد و التيار كما يلي:**

$$V = (V_r + I_r Z_c)/2\ e^{\gamma x} + (V_r - I_r Z_c)/2\ e^{-\gamma x}$$
$$I = (V_r/Z_c + I_r)/2\ e^{\gamma x} - (V_r/Z_c - I_r)/2\ e^{-\gamma x}$$

و تسمي $Z_c = \sqrt{L/C}$ **الممانعة المميزة** characteristic impedance **أو الممانعة التمورية** surge impedance **و** γ **ثابت الانتشار** propagation constant **. و تبلغ قيمة** Z_c **في خطوط النقل الهوائية ما بين ٤٠٠ الي ٥٠٠ أوم و في الكابلات ما بين ٤٠ الي ٦٠ أوم. و يعرف التحميل بالممانعة التمورية** surge impedance loading **بأنه الحمل الكهربي ذو معامل قدرة الوحدة بفرض أن مقاومة الخط تساوي الصفر و تكون القدرة المنقولة علي الخط :**

$$P_r = V^2_r / Z_c \quad MW$$

و تسمي بالقدرة الطبيعية للخط natural power **و تمثل أكبر قدرة يمكن توصيلها للحمل عند نهاية الخط. و لزيادة هذه القيمة يمكن رفع الجهد الكهربي عند الحمل أو بتقليل قيمة الممانعة التمورية بوسائل اصطناعية مثل توصيل مكثفات علي التوالي لتقليل قيمة الممانعة للخطوط. ويلاحظ أن القدرة الطبيعية قد لاتساوي اكبر قيمة لتحميل الخط** maximum loading **.**

٥- <u>الدائرة المكافئة للخطوط الطويلة Equivalent circuit for long lines</u>

كما ذكر من قبل فإن الدائرتان π- circuit **و** T- circuit **لا تمثلا الخط الطويل ذو الثوابت الموزعة لذلك سوف نفرض القيم** Y' **و** Z' **في هذه الدوائر بدلا من** Y **و** Z **، لذلك نحصل علي :**

$$V_s = (Z' Y' /2 + 1) V_r + Z' I_r$$

و بمقارنة ذلك بقيم V_s و I_s في الصورة الأسية :

$$V_s = V_r \cosh \gamma l + I_r Z_c \sin \gamma l$$
$$I_s = I_r \cosh \gamma l + V_r/Z_c \sin \gamma l$$

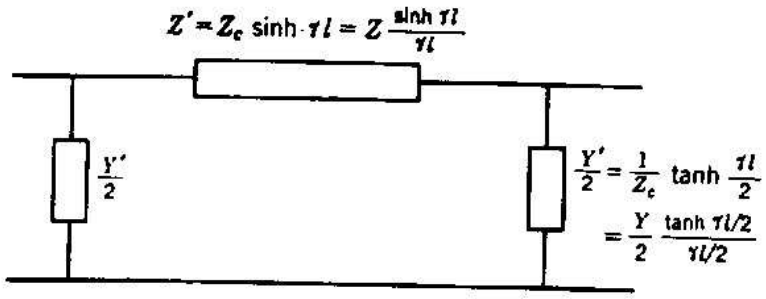
و بمساواة معامل التيار I_r ينتج :

$$Z' = Zc(\sin \gamma l)/ \gamma l$$

حيث Z هي المقاومة الكلية علي التوالي للخط

$$Y'/2 = Y/2 (\tanh \gamma l /2) / (\gamma l /2)$$

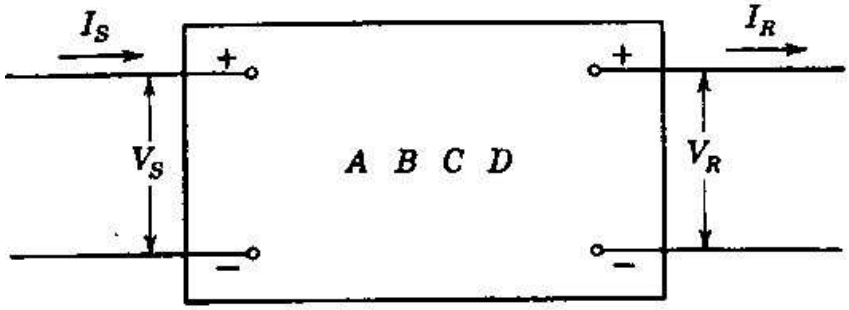
و الشكل (٨) يبين الدائرة المكافئة للخطوط الطويلة.



شكل (٨)

٦- **<u>الدائرة العامة للخط الكهربي و ثوابتها</u>**

يمكن تمثيل دائرة الخط الكهربي بدائرة عامة صندوقية لها مدخلان و مخرجان كما هو موضح بالشكل (٩).



شكل (٩)

و بتغير قيم الثوابت A,B,C,D تمثل هذه الدائرة جميع حالات خطوط القوي الكهربية. و الجدول التالي يبين قيم هذه الثوابت للخطوط المختلفة:

Line	A	B	C	D
Short	1	Z	0	1
Medium: T	1+ ZY/2	Z(1 + YZ/4)	Y	1 + ZY/2
Medium: π	1+ ZY/2	Z	Y(1 + YZ/4)	1 + ZY/2
Long	$\cosh \gamma l$	$Z_c \sin \gamma l$	$1/Z_c (\sin \gamma l)$	$\cosh \gamma l$