

شبكات النقل الكهربائية

خطوط النقل الكهربائي

خطوط النقل الكهربائي

—

الجدارة:

الأهداف:

عندما تكمل هذه الوحدة تكون:

١. ملما بأنواع خطوط النقل الكهربائي وخصائصها .
٢. ملما بالمواد المستعملة في صناعة الموصلات الكهربائية وكذلك بأنواع أبراج خطوط النقل الكهربائي .
٣. ملما بكيفية حساب الترخيم بين برجين مع الأخذ في الاعتبار العوامل المؤثرة عليه .

مستوى الأداء المطلوب :

الوقت المتوقع للتدريب: ١٢ ساعة

الوسائل المساعدة:

١. استخدم التعليمات في هذه الوحدة .
٢. صور فوتوغرافية ورسوم توضيحية توضح عمليات تركيب خطوط النقل

متطلبات الجدارة:

يجب التدرب على جميع المهارات أية لأول مرة.

خطوط النقل الكهربائي

١ - ١ أنواع خطوط النقل الكهربائي :

تعتبر خطوط وشبكات النقل الكهربائية بمثابة الشرايين لمنظومات القوى الكهربائية حيث أمكن عن طريقها نقل الطاقة الكهربائية عبر مسافات طويلة من أماكن التوليد إلى مراكز الاستهلاك بتكلفة اقتصادية وتقنيات فنية عالية ، وتصمم معظم خطوط النقل الكهربائي لتعمل بالنظام الثلاثي الأوجه أو الثلاثي الطور على أحد شكلين هما :

- دائرة ثلاثية الأوجه مفردة Three phase single circuit system .
- دائرة ثلاثية الأوجه مزدوجة Three phase double circuit system .

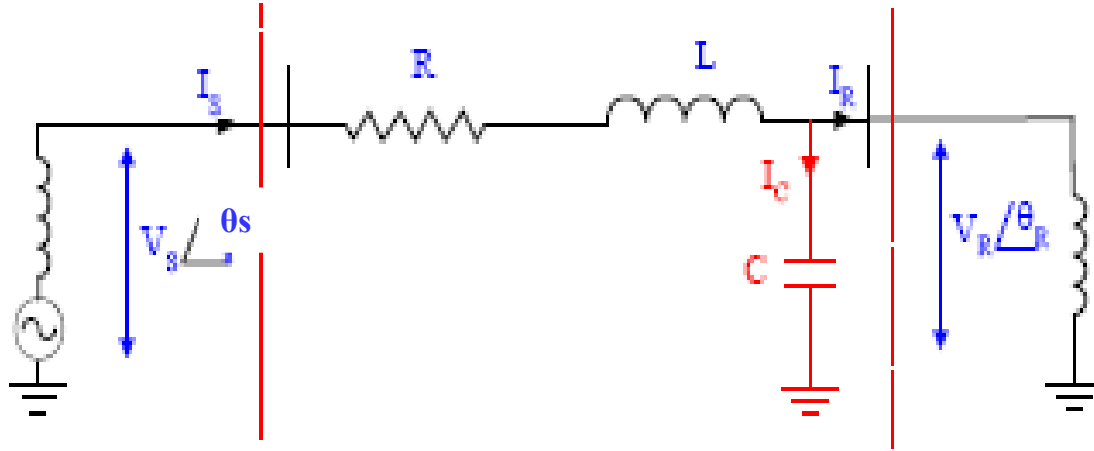
كما أن معظم خطوط النقل الكهربائي عبارة عن خطوط هوائية تستخدم موصلات غير معزولة (مكشوفة) مع الاستفادة من الهواء المحيط بها كوسط عازل . أما في المناطق السكنية أو بالقرب منها حيث لا يمكن استخدام الخطوط الهوائية لأغراض أمنية أو لتحقيق السلامة أو لأسباب أخرى ، فإن القدرة تنقل بواسطة كوابل أرضية .

وفي هذه الوحدة ستتم دراسة خطوط النقل الكهربائي الهوائية بأنواعها المختلفة وتصنيفها إلى خطوط قصيرة، وخطوط متوسطة ، وخطوط طويلة على حسب طول الخط ، إضافة إلى دراسة خصائصها الكهربائية وحسابات جهد الإرسال لهذه الخطوط ، كما ستعرض الدراسة إلى تركيبات خطوط النقل وحسابات الترخيم في حالات التعليق المختلفة لهذه الخطوط .

١ - ١ - ١ : خواص خطوط النقل الكهربائي :

تتمثل خواص خطوط النقل الكهربائي في المعاملات التي تحدد الأداء الكهربائي للخطوط حيث يمكن التعبير عن هذا الأداء بمعاملات أربع هي المقاومة المادية للخط (R) ، ومواصلة التوازي للخط (G) ، والمفاعلة الحثية للخط (X_L) ، و السعة الكهربائية للخط (C) .

وبناء على ذلك فإن كل موصل من موصلات خط النقل ثلاثي الأوجه يمكن تمثيله بمقاومة R على التوالي مع محاثة L بالتوازي مع سعة C ومواصلة G كما في شكل (١ - ١) مع إهمال قيمة مواصلة التوازي G لصغرها لكل متر طولي من طول الخط .



شكل (١ - ١) - تمثيل وجه مفرد من خط نقل ثلاثي الأوجه .

أ. المقاومة المادية للخط (R) : وتمثل مقاومة موصلات الخط مقدرة بوحدة الأوم (Ω) وتعتمد على الشكل الهندسي لموصلات الخط من حيث مساحة المقطع والطول إضافة إلى الخواص الطبيعية لمادة موصلات الخط في شكل المقاومة النوعية للموصل ، وتحسب مقاومة وحدة الأطوال لموصلات الخط من العلاقة التالية :

$$R = \rho / A \quad (1.1)$$

حيث : R هي مقاومة وحدة الأطوال مقدرة بوحدة Ω/m

ρ هي المقاومة النوعية لمادة الموصل مقدرة بوحدة $\Omega.m$

A هي مساحة مقطع الموصل الفعالة مقدرة بوحدة m^2

وفي حالة الموصلات المصنوعة من الألمنيوم المقوى بالصلب ACSR والمستخدم بكثرة في خطوط النقل الكهربائي ، يمكن الحصول على المعلومات الدقيقة عن مقاومة وحدة الأطوال لهذه الموصلات من جداول خاصة تعد من قبل المصنعين لهذه الموصلات .

ويتسبب الفقد الناتج عن المقاومة المادية لموصلات الخطوط في رفع درجة حرارة هذه الموصلات والتي تضع حدا حراريا على التحميل للخطوط ، كما تؤثر درجات الحرارة العالية على ارتخاء موصلات الخطوط بين الأبراج ، إضافة إلى نقص قوة الشد للموصلات .

وعند دراسة أداء الخطوط يهمل تأثير المقاومة المادية R ومواصلة التوازي G نظرا لتأثيرهما الضئيل على المعاوقة الكلية المكافئة للخط بالمقارنة مع تأثير المفاعلة الحثية والسعة الكهربائية لموصلات الخط .

ب. مواصلة التوازي للخط (G) : وتمثل هذه المواصلة تيار التسرب بين أوجه (أطوار) الخط والأرض حيث تتأثر قيمة هذا التيار بدرجة عالية بالمناخ ورطوبة الجو والتلوث ونسبة الأملاح ، وعادة ما يهمل هذا التيار وبالتالي قيمة مواصلة التوازي للخطوط في ظروف التشغيل العادية وذلك لصغر القيمة الفعلية له إلى جانب صعوبة تحديد هذه القيمة .

ج. المفاعلة الحثية للخط (X_L) : تعتبر المفاعلة الحثية للخط أكثر الخواص أهمية نظرا لتأثيرها المباشر والفعال على سعة التوصيل والهبوط في الجهد لخطوط النقل ، وبالتالي فإنه في معظم التصميمات والدراسات التحليلية للخطوط تكون المفاعلة الحثية $X_L = \omega.L$ هي العنصر السائد لمعاوقة الخطوط .

وتتأثر قيمة محاثة الخطوط (الحث الذاتي) بالمسافات الفاصلة بين موصلاتها على حسب وضعها على البرج أو العمود الحامل لهذه الموصلات ، ويمكن حساب محاثة الخطوط ثلاثية الأوجه المفردة لكل وجه من العلاقة التالية :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \quad (1.2)$$

حيث : L هي محاثة وحدة الأطوال مقدرة بوحدات H/m

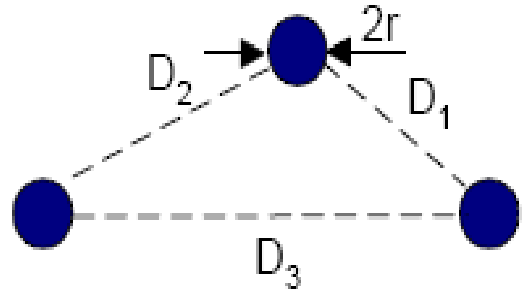
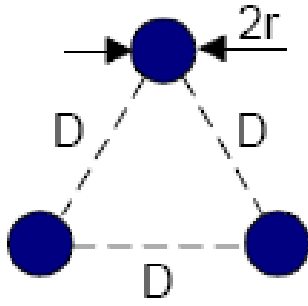
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ هي النفاذية المغناطيسية للفراغ .

D المسافة بين الموصلات مقدرة بوحدات (m) .

r نصف قطر موصل الخط مقدرة بوحدات (m) .

وعندما تكون المسافة بين موصلات الخط غير متماثلة كما هو موضح بشكل (١ - ٢) ، فإنه تؤخذ المسافة المحسوبة بالعلاقة التالية في الاعتبار عند حساب محاثة الخط .

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3} \quad (1.3)$$



شكل (١ - ٢) - المسافة بين موصلات خط نقل ثلاثي الأوجه مفرد .

مثال ١ - ١ :

احسب المحاثة لكل وجه لخط نقل ثلاثي الأوجه بدائرة مفردة عندما تكون المسافة بين موصلاته $D = 5 \text{ m}$ ونصف قطر الموصل $r = 1.5 \text{ cm}$ ويعمل تحت تردد $f = 60 \text{ Hz}$.

الحل :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \quad \text{المحاثة لكل وجه هي :}$$

$$L = \frac{4\pi * 10^{-7}}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{500}{1.5} \right) = 12.12 * 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$X_L = \omega \cdot L = 377 * 12.12 * 10^{-7} = 0.457 \text{ } \Omega/\text{km}$$

بالرجوع إلى جدول خواص موصلات الخط المذكور نجد أن المقاومة المادية لوحدة الأطوال تساوي $R = 0.074 \text{ } \Omega/\text{km}$ ومن ثم فإن المفاعلة الحثية التي حسبناها تكون ستة أضعاف قيم المقاومة المادية مما يؤكد ما ذكر سابقا عن تناسب قيم كل من R و X_L وإمكانية إهمال قيمة المقاومة المادية لخطوط النقل عند تمثيلها أو إجراء الدراسات التحليلية لها .

د. السعة الكهربائية للخط (C) : عندما يكون فرق الجهد بين الموصلات عاليا جدا يمر تيار إزاحة كهربائية عبر العازل بين الموصلات والأرض والمثل بالهواء في الخطوط الهوائية ، ويكون هذا التيار متقدما عند انعدام الحمل ويعرف بتيار الشحن ، وتتوقف قيمة هذا التيار على سعة الخط وجهد النقل وكذلك التردد .

وتمثل السعة الكهربائية للخط مصدرا للقدرة المفاعلة حيث تتناسب هذه القدرة طرديا مع مربع جهد النقل ، ويظهر تأثير هذه السعة ويصبح جزءا أساسيا في حسابات أداء الخط ومنظومة القوى الكهربائية عندما يزيد طول الخط عن 100 km ويتجاوز الجهد المحمول على الخط 300 kV . ويمكن حساب السعة الكهربائية للخطوط ثلاثية الأوجه المفردة بين كل وجه وخط التعادل المحايد من العلاقة التالية :

$$C_n = 2 C = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad (1.4)$$

حيث : C هي السعة الكهربائية لوحدة الأطوال مقدرة بوحدات F/m

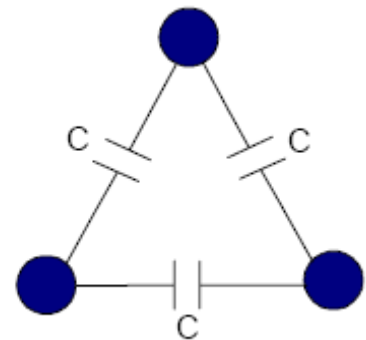
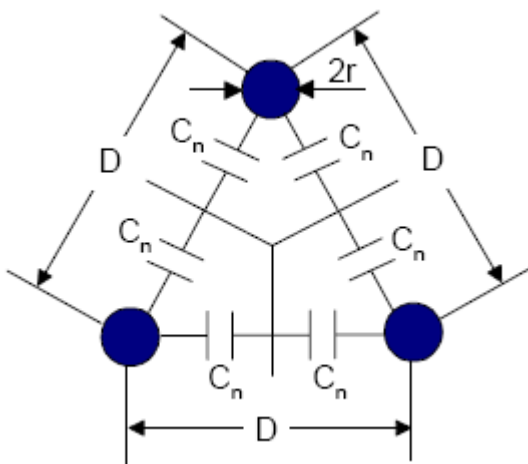
$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m هي السماحية الكهربائية للفراغ .

D المسافة بين الموصلات مقدرة بوحدات (m) .

r نصف قطر موصل الخط مقدرة بوحدات (m) .

وعندما تكون المسافة بين موصلات الخط غير متماثلة كما هو موضح بشكل (١ - ٣) ، فإنه تؤخذ المسافة المحسوبة بالعلاقة التالية في الاعتبار عند حساب السعة الكهربائية للخط .

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}$$



شكل (١ - ٣) - السعة الكهربائية بين موصلات خط نقل ثلاثي الأوجه مفرد .

وعلى ذلك تكون المفاعلة السعوية Capacitive reactance أو مفاعلة التوازي لوحدة الأطوال من طول الخط كما يلي :

$$X_c = 1 / \omega C_n = 1 / 2 \pi f C_n \quad \Omega/m \quad (1.5)$$

ويطلق على مقلوب أو معكوس المفاعلة السعوية اسم المسامحة السعوية Capacitive admittance ، وبالتالي تكون المسامحة السعوية لوحدة الأطوال لخط نقل ثلاثي الأوجه مفرد كما يلي :

$$Y = j 1 / X_c = j \omega C_n = j 2 \pi f C_n \quad \text{siemens/m} \quad (1.6)$$

مثال ١ - ٢ :

احسب المسامحة السعوية لكل وجه لخط نقل ثلاثي الأوجه بدائرة مفردة طوله 200 km عندما تكون المسافة بين موصلاته $D = 5 \text{ m}$ وقطر الموصل 3 cm ويعمل بتردد $f = 60 \text{ Hz}$.

الحل

السعة الكهربائية بين كل موصل وخط الحياد لكل وجه هي :

$$C_n = 2 C = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} = \frac{2 \pi \times 8.854 \times 10^{-12}}{\ln \frac{500}{1.5}} = 9.577 \times 10^{-12} \quad \text{F/m}$$

السعة الكهربائية بين كل موصل وخط الحياد لكل وجه لكامل الخط هي :

$$C_n = 9.577 \times 10^{-12} \times 200 \times 10^3 = 1.915 \times 10^{-6} \quad \text{F.}$$

المفاعلة السعوية للخط لكل وجه هي :

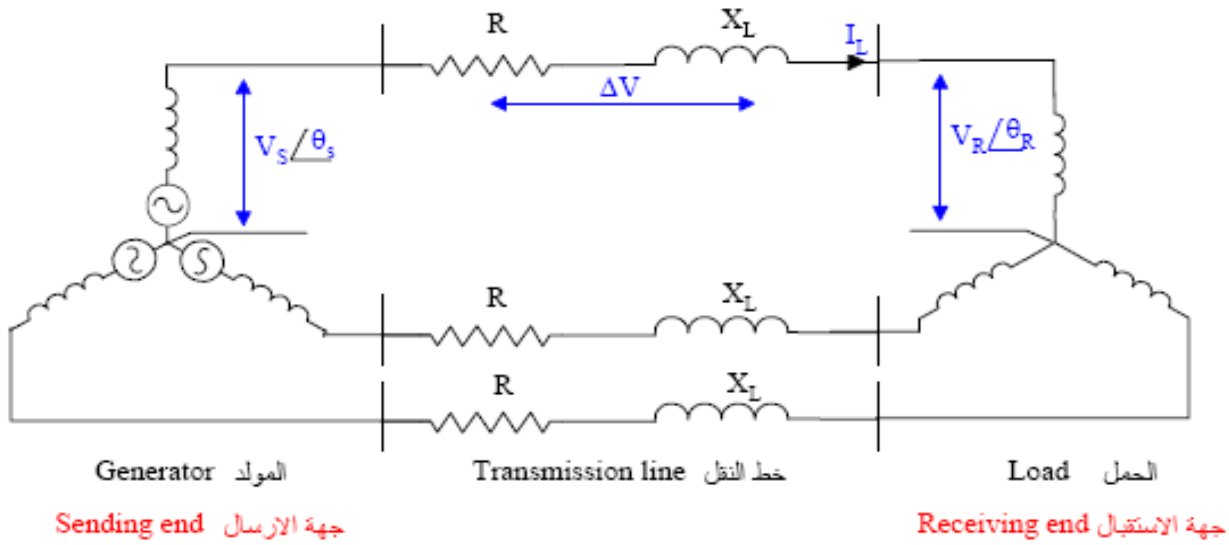
$$X_c = 1 / \omega C_n = 1 / (377 \times 1.915 \times 10^{-6}) = 1385 \quad \Omega$$

وبالتالي تكون المسامحة السعوية للخط لكل وجه هي :

$$Y = j \omega C_n = j 377 \times 1.915 \times 10^{-6} = 722 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \quad \text{siemens}$$

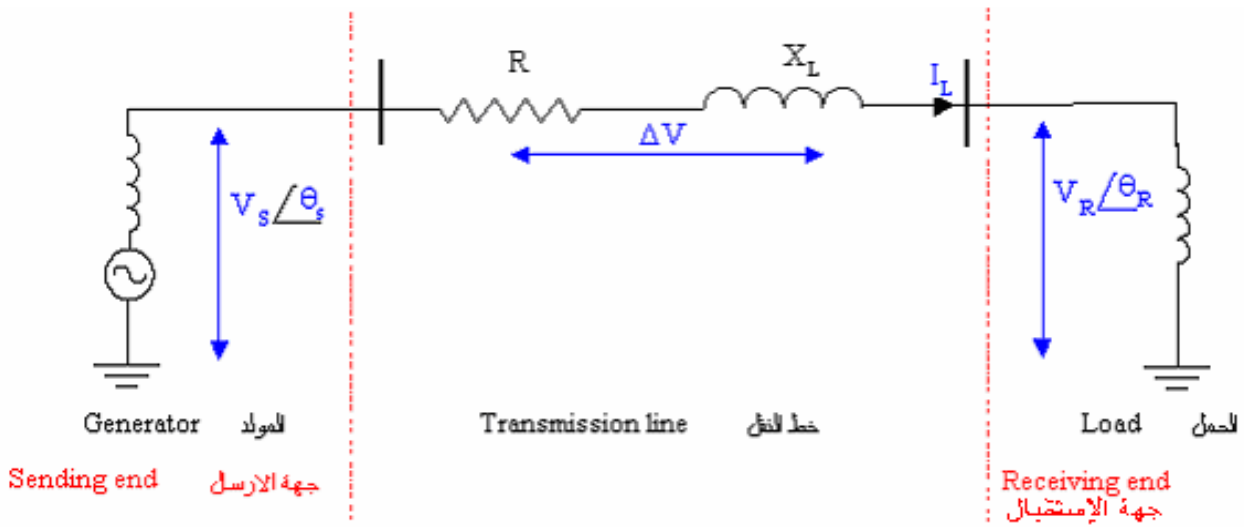
١ - ٢ : خطوط النقل القصيرة :

يعتبر الخط قصيرا إذا كان طوله حتى 60 km حيث يمكن إهمال معاملات التوازي للخط (السعة الكهربائية C أو المسامحة السعوية Y) والاكتفاء فقط بالمقاومة المادية R والمفاعلة الحثية X_L للخط ، وعلى ذلك يمكن تمثيل خط النقل القصير بمقاومة ومفاعلة حثية على التوالي لكل وجه كما هو مبين بشكل (١ - ٤) حيث يوضح خط نقل قصير يربط بين محطة التوليد والحمل .



شكل (١ - ٤) - خط نقل قصير ثلاثي الأوجه يربط بين محطة التوليد والحمل .

ونظرا لتمثيل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة السابقة إلى دائرة أحادية الوجه مفردة ، وبالتالي كتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما يلي :



شكل (١ - ٥) - الدائرة المفردة المكافئة لخط نقل قصير ثلاثي الأوجه .

حيث إن :

Sending end voltage per phase	جهد الوجه عند جهة الإرسال	V_s
Apparent power at sending end	القدرة الظاهرية عند الإرسال	S_s
Active power at sending end	القدرة المفعالة عند الإرسال	P_s
Reactive power at sending end	القدرة المفاعلة عند الإرسال	Q_s
Power factor at sending end	معامل القدرة عند الإرسال	$\cos \phi_s$
Receiving end voltage per phase	جهد الوجه عند جهة الاستقبال	V_R
Apparent power at receiving end	القدرة الظاهرية عند الاستقبال	S_R
Active power at receiving end	القدرة الفعالة عند الاستقبال	P_R
Reactive power at receiving end	القدرة المفاعلة عند الاستقبال	Q_R
Power factor at receiving end	معامل القدرة عند الاستقبال	$\cos \phi_R$
Line current	تيار الخط	I_L
Line resistance per phase	مقاومة الخط لكل وجه	R
Line reactance per phase	المفاعلة الحثية للخط لكل وجه	X_L
Line voltage drop per phase	هبوط الجهد على الخط لكل وجه	ΔV

من الدائرة المكافئة للخط الموضحة في شكل (١ - ٥) يمكن كتابة المعادلات الآتية :

جهد الوجه عند جهة الإرسال :

$$V_s = V_R + \Delta V \quad (1.7)$$

ويمكن حساب الهبوط في الجهد كالتالي :

$$\Delta V = Z_L I_L = I_L \cdot R + j I_L \cdot X_L \quad (1.8)$$

حيث إن : $Z_L = R + j X_L$ هي معاوقة الخط لكل وجه
 $I_L \cdot R$ هو الهبوط في الجهد عبر المقاومة المادية للخط ويكون في نفس اتجاه تيار الخط I_L
 Resistive drop in phase with I_L

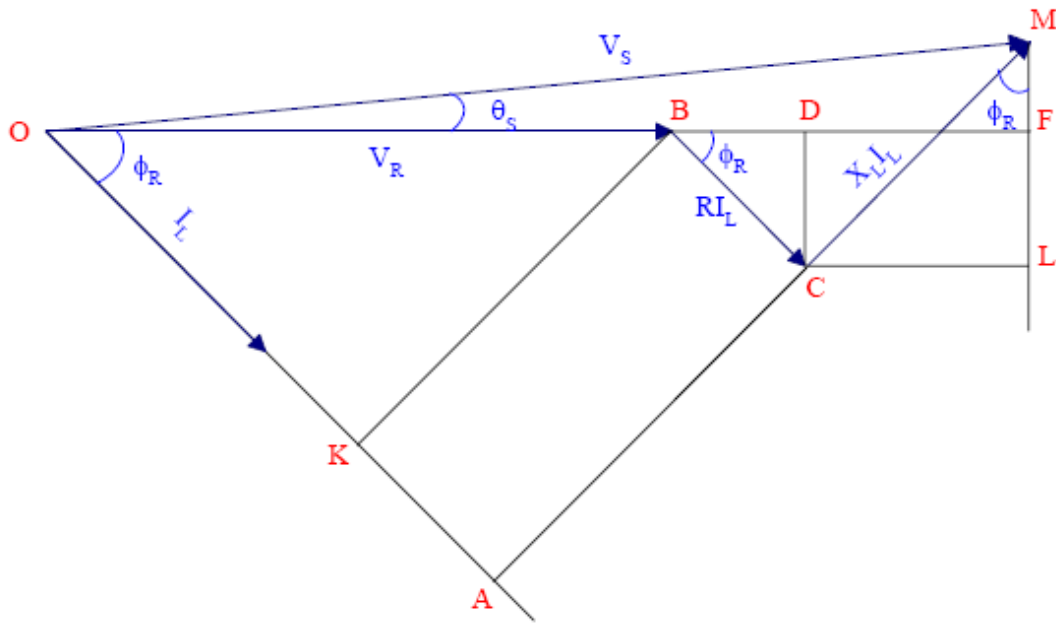
هو الهبوط في الجهد عبر المفاعلة الحثية للخط ويكون متعامدا

$$I_L \cdot X_L$$

على اتجاه تيار الخط Reactive drop in quadrature

with I_L

وطبقا للمعادلة (1.7) يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط القصير كما في الشكل (١ - ٦).



شكل (١ - ٦) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط القصير

من الشكل السابق وباعتبار المثلث قائم الزاوية OMA يمكن استنتاج ما يلي :

$$OM^2 = OA^2 + AM^2 = (OK + KA)^2 + (AC + CM)^2$$

$$OM = \sqrt{(OK + KA)^2 + (AC + CM)^2}$$

$$V_s = \sqrt{(V_R \cos \phi_R + I_L \cdot R)^2 + (V_R \sin \phi_R + I_L \cdot X_L)^2} \quad (1.9)$$

• ولحساب القيمة التقريبية للهبوط في الجهد وكذلك جهد الوجه عند الإرسال : بحكم أن الزاوية

θ كل من OM ، OF تكون صغيرة نسبيا ، فإنه يمكن اعتبار المسافة $OM = OF$ تقريبا

وهذا يعني أن :

$$OM = OD + DF = OB + BD + DF$$

$$V_S = V_R + BD + DF = V_R + I_L R \cos \phi_R + I_L X_L \sin \phi_R \quad (1.10)$$

وعلى ذلك تكون القيمة التقريبية للهبوط في الجهد هي :

$$\Delta V = V_S - V_R = I_L R \cos \phi_R + I_L X_L \sin \phi_R \quad (1.11)$$

- ولحساب القيمة الفعلية للهبوط في الجهد وكذلك جهد الوجه عند الإرسال فإنه تستخدم الأعداد المركبة Complex numbers ، كما يؤخذ جهد الوجه عند الاستقبال V_R كمتجه مرجعي Reference vector ولحساب الزوايا للكميات الأخرى لمخطط المتجهات الموضح في شكل (١-٦) تحول كل معطيات الخط إلى قيم مركبة كما يلي :

$$V_R = |V_R| + j 0 = |V_R| \angle 0^\circ \quad (1.12)$$

$$I_L = |I_L| (\cos \phi_R - j \sin \phi_R) = |I_L| \angle -\phi_R^\circ \quad (1.13)$$

$$Z_L = R + j X_L = |Z_L| \angle \theta^\circ$$

عندما يكون التيار متأخرا Lagging ، وحينما يكون الحمل حثينا كما هو الحال في الشكل السابق ، تكون الزاوية سالبة وبالتالي :

$$\Delta V = Z_L \cdot I_L \angle (\theta - \phi_R)^\circ \quad (1.14)$$

$$V_S = V_R + \Delta V$$

ويكون جهد الوجه عند الإرسال :

$$V_S = V_R + Z_L \cdot I_L \angle (\theta - \phi_R)^\circ$$

$$V_S = V_R + |I_L| (\cos \phi_R - j \sin \phi_R) (R + j X_L)$$

$$V_S = V_R + (R I_L \cos \phi_R + X_L I_L \sin \phi_R) + j (X_L I_L \cos \phi_R - R I_L \sin \phi_R) \quad (1.15)$$

$$V_S = \sqrt{(V_R + R I_L \cos \phi_R + X_L I_L \sin \phi_R)^2 + (X_L I_L \cos \phi_R - R I_L \sin \phi_R)^2}$$

$$V_S = \sqrt{V_R^2 + Z_L^2 I_L^2 + 2 V_R (R I_L \cos \phi_R + X_L I_L \sin \phi_R)} \quad (1.16)$$

يكون معامل القدرة متقدما Leading حينما يكون الحمل سعويًا ، وتصبح زاوية التيار موجبة وبالتالي فإن :

$$I_L = |I_L| (\cos \phi_R + j \sin \phi_R) = |I_L| \angle \phi_R^\circ \quad (1.17)$$

$$V_S = V_R + Z_L \cdot I_L \angle (\theta + \phi_R)^\circ$$

ويكون جهد الوجه عند الإرسال :

$$V_S = V_R + |I_L| (\cos \phi_R + j \sin \phi_R) (R + j X_L)$$

$$V_S = V_R + (R I_L \cos \varphi_R - X_L I_L \sin \varphi_R) + j (X_L I_L \cos \varphi_R + R I_L \sin \varphi_R) \quad (1.18)$$

$$V_S = \sqrt{(V_R + R I_L \cos \varphi_R - X_L I_L \sin \varphi_R)^2 + (X_L I_L \cos \varphi_R + R I_L \sin \varphi_R)^2}$$

وتكون زاوية معامل القدرة عند الإرسال :

$$\varphi_S = \varphi_R + \theta_S \quad (1.19)$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R \% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} \times 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 \quad (1.20)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

• القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3 V_S I_L^* = \sqrt{3} V_{S_L} I_L = P_S + j Q_S \quad (1.21)$$

$$P_S = 3 V_S I_L \cos \varphi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_L \cos \varphi_S \quad (1.22)$$

$$Q_S = 3 V_S I_L \sin \varphi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_L \sin \varphi_S \quad (1.23)$$

• القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3 V_R I_L^* = \sqrt{3} V_{R_L} I_L = P_R + j Q_R \quad (1.24)$$

$$P_R = 3 V_R I_L \cos \varphi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_L \cos \varphi_R \quad (1.25)$$

$$Q_R = 3 V_R I_L \sin \varphi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_L \sin \varphi_R \quad (1.26)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة غير الفعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3 R I_L^2 = P_S - P_R \quad (1.27)$$

$$Q_{Loss} = 3 X_L I_L^2 = Q_S - Q_R \quad (1.28)$$

وللتقليل من القدرة المفقودة يتم رفع الجهد كلما زاد طول الخط وذلك بخفض التيار في حدود الإمكانيات الاقتصادية لتكلفة النقل مما يؤدي إلى انخفاض التكلفة الإجمالية نظرا لأنه كلما قل التيار تقل مساحة مقطع الموصل المستخدم وكذلك حجم الأبراج مما ينعكس على التكلفة الإجمالية للخط ، إلا أن هذه المزايا يقابلها في الجهة الأخرى مشاكل تتعلق بضرورة زيادة مستوى العزل الكهربائي للأجهزة والمعدات والعوازل الكهربائية المستخدمة في تعليق موصلات الخط .

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \quad (1.29)$$

مثال ١- ٣ : خط نقل كهربائي قصير ثلاثي الأوجه ، تردده $f = 60 \text{ Hz}$ ، له مقاومة $R = 5 \Omega$ ، ومحاثة $L = 30 \text{ mH}$ ، يغذي حملا متوازنا ثلاثي الأوجه مقداره $P = 1000 \text{ kW}$ بمعامل قدرة 0.8 تأخر تحت جهد 11 kV بين الخط والخط ، احسب :

أ - الجهد ومعامل القدرة عند جهة الإرسال .

ب - كفاءة الخط .

ج - تنظيم الجهد للخط .

د - ارسم مخطط المتجهات للخط .

الحل

جهد الوجه عند الاستقبال :

$$V_R = \frac{V_{R_L}}{\sqrt{3}} = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350 \text{ V.}$$

$$I_L = \frac{P_R}{3 V_R \cos \phi_R} = \frac{1000 * 10^3}{3 * 6350 * 0.8} = 65.6 \text{ A.} \quad \text{تيار الخط :}$$

$$\phi_R = \cos^{-1} (0.8) = 36.87^\circ \quad \text{lag}$$

$$I_L = |I_L| \angle \varphi_R^\circ = 65.6 \angle -36.87^\circ \text{ A.}$$

معاوقة الخط :

$$Z_L = R + j X_L = 5 + j 2 \pi * 60 * 0.03 = 5 + j 9.4 = 10.65 \angle 62^\circ \Omega.$$

الهبوط في الجهد لكل وجه :

$$\Delta V = Z_L \cdot I_L = (65.6 \angle -36.87^\circ) (10.65 \angle 62^\circ) = 698.64 \angle 25.13^\circ \text{ V.}$$

أ - جهد الوجه عند جهة الإرسال :

$$V_S = V_R + \Delta V = 6350 + (698.64 \angle 25.13^\circ) = 6988 \angle 2.4^\circ \text{ V.}$$

$$V_{SL} = \sqrt{3} V_S = \sqrt{3} * 6988 = 12100 \text{ V.} = 12.1 \text{ kV.}$$

معامل القدرة عند جهة الإرسال :

$$\varphi_S = \varphi_R + \theta_S = 36.87 + 2.4 = 39.3^\circ \text{ lag}$$

$$\cos \varphi_S = 0.774 \text{ lag}$$

ب - القدرة الفعالة المفقودة على الخط :

$$P_{Loss} = 3 R I_L^2 = 3 * 5 * (65.6)^2 = 64.55 \text{ kW}$$

القدرة الفعالة عند جهة الإرسال :

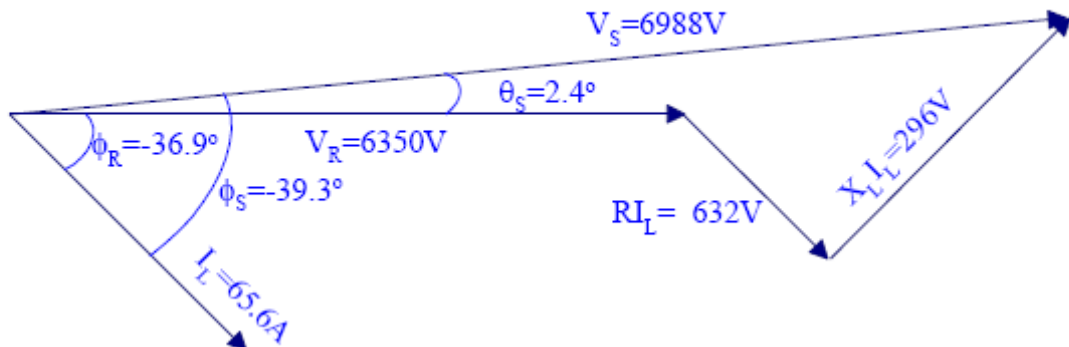
$$P_S = P_R + P_{Loss} = 1000 + 64.55 = 1064.55 \text{ kW}$$

كفاءة الخط :

$$\eta \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 = \frac{1000}{1064.55} * 100 = 93.94 \%$$

ج - تنظيم الجهد على الخط :

$$V.R \% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 = \frac{12.1 - 11}{11} * 100 = 10 \%$$

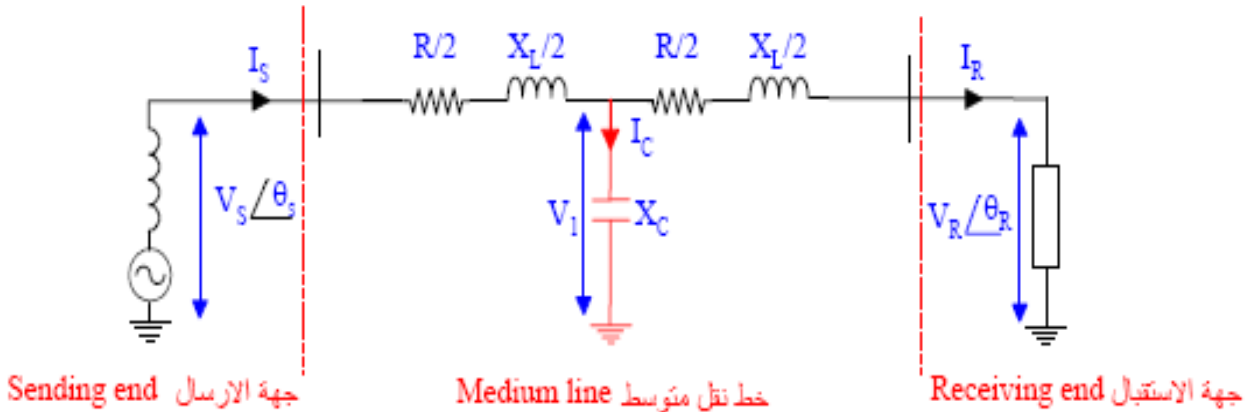


١ - ٣ : خطوط النقل المتوسطة :

يعتبر الخط متوسطا إذا كان طوله يتراوح بين 60 → 120 km حيث لا يمكن إهمال السعة الكهربائية C أو المسامحة السعوية Y للخط ، بل يتم تركيزها في نقطة المنتصف للخط وتقسيم كل من المقاومة المادية R والمفاعلة الحثية X_L للخط إلى نصفين متماثلين على جانبي الخط (تمثيل T للخط) أو تركيز معاوقة التوالي (كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية X_L) للخط في نقطة المنتصف وتقسيم السعة الكهربائية أو المسامحة السعوية للخط إلى نصفين متماثلين عند بداية ونهاية الخط (تمثيل Π للخط) ، وعلى ذلك يمكن تمثيل خط النقل المتوسط بإحدى طريقتين كما يلي :

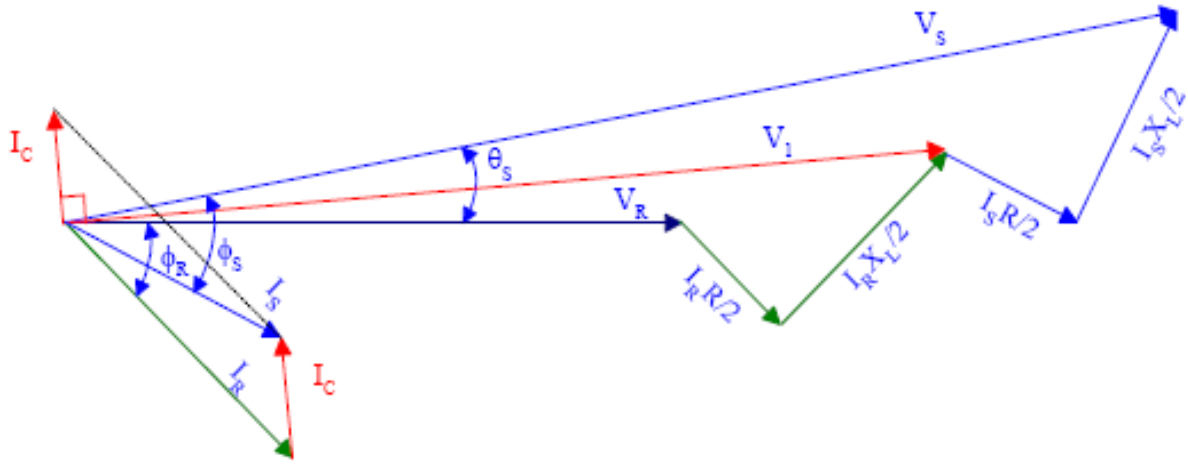
الدائرة المكافئة لخط النقل المتوسط على طريقة (T- Representation) (T) :

تتمثل هذه الطريقة في اعتبار المفاعلة السعوية مركزة في منتصف الخط بين نصفي المقاومة والمفاعلة الحثية للخط مما يعطي الدائرة المكافئة شكل حرف T ، ونظرا لتمثيل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة المكافئة للخط إلى دائرة أحادية الوجه مفردة ، وبالتالي كتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما هو موضح بشكل (٧ - ١) :



شكل (٧ - ١) - الدائرة المفردة المكافئة لخط نقل متوسط ثلاثي الأوجه ممثل بطريقة T .

وطبقا للدائرة المكافئة فإنه يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة T كما في الشكل (٨ - ١) .



شكل (١ - ٨) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة T .

في الدائرة المكافئة للخط الموضحة في شكل (١ - ٧) ومخطط المتجهات الموضح في شكل (١ - ٨) يتضح أن التيار عند جهة الإرسال يساوي مجموع تيار الاستقبال I_R وتيار الشحن I_C كما يلي :

$$I_s = I_R + I_C \quad (1.30)$$

$$I_C = Y V_1 = j \omega C V_1 \quad (1.31)$$

ويمكن حساب الهبوط في الجهد على النصف الأول من الخط كالتالي :

$$\Delta V_R = \frac{Z_L}{2} \cdot I_L = \frac{R + jX_L}{2} \cdot I_L \quad (1.32)$$

وعلى ذلك فإن الجهد عند المكثف يكون :

$$V_1 = V_R + \Delta V_R = V_R + \frac{Z_L}{2} I_R \quad (1.33)$$

أما الهبوط في الجهد على النصف الثاني من الخط فيحسب كالتالي :

$$\Delta V_1 = \frac{Z_L}{2} \cdot I_s = \frac{R + jX_L}{2} \cdot I_s \quad (1.34)$$

بالتعويض من المعادلة (1.33) في المعادلات (1.30) , (1.31) نحصل على :

$$I_s = Y V_R + \left(1 + \frac{Y Z_L}{2}\right) I_R \quad (1.35)$$

كما أن الجهد عند جهة الإرسال هو مجموع الجهد عبر المكثف والهبوط في الجهد على النصف الثاني للخط كما يلي :

$$V_S = V_R + \Delta V_R + \Delta V_1 = (1 + \frac{Y Z_L}{2}) V_R + Z_L (1 + \frac{Y Z_L}{4}) I_R \quad (1.36)$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R \% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 \quad (1.37)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

• القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3 V_S I_S^* = \sqrt{3} V_{S_L} I_S = P_S + j Q_S \quad (1.38)$$

$$P_S = 3 V_S I_S \cos \varphi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_S \cos \varphi_S \quad (1.39)$$

$$Q_S = 3 V_S I_S \sin \varphi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_S \sin \varphi_S \quad (1.40)$$

• القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3 V_R I_R^* = \sqrt{3} V_{R_L} I_R = P_R + j Q_R \quad (1.41)$$

$$P_R = 3 V_R I_R \cos \varphi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_R \cos \varphi_R \quad (1.42)$$

$$Q_R = 3 V_R I_R \sin \varphi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_R \sin \varphi_R \quad (1.43)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة غير الفعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3 (R/2) (I_S^2 + I_R^2) = P_S - P_R \quad (1.44)$$

$$Q_{Loss} = Q_S - Q_R \quad (1.45)$$

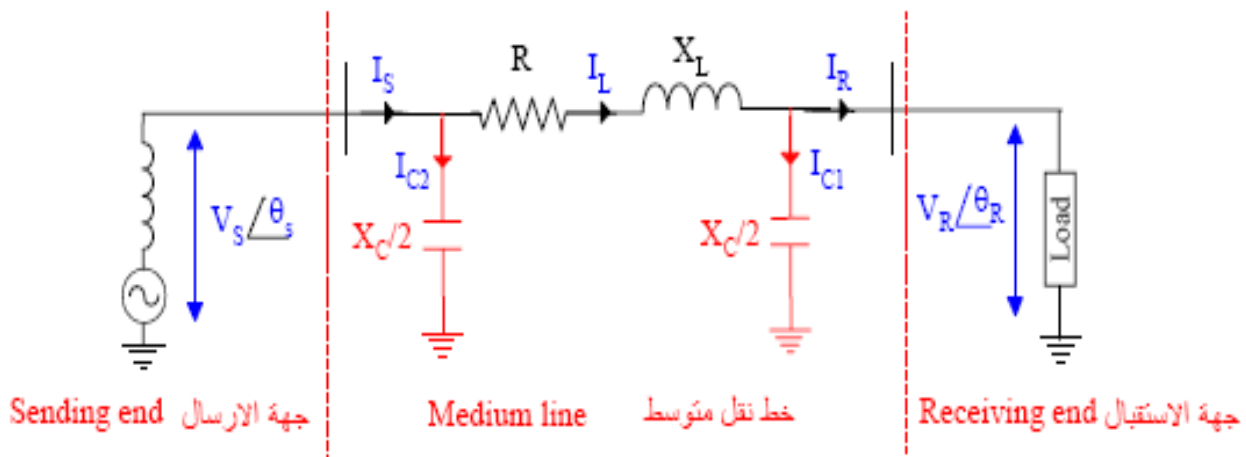
وللتقليل من القدرة المفقودة يتم رفع الجهد كلما زاد طول الخط وذلك بخفض التيار في حدود الإمكانيات الاقتصادية لتكلفة النقل .

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \quad (1.46)$$

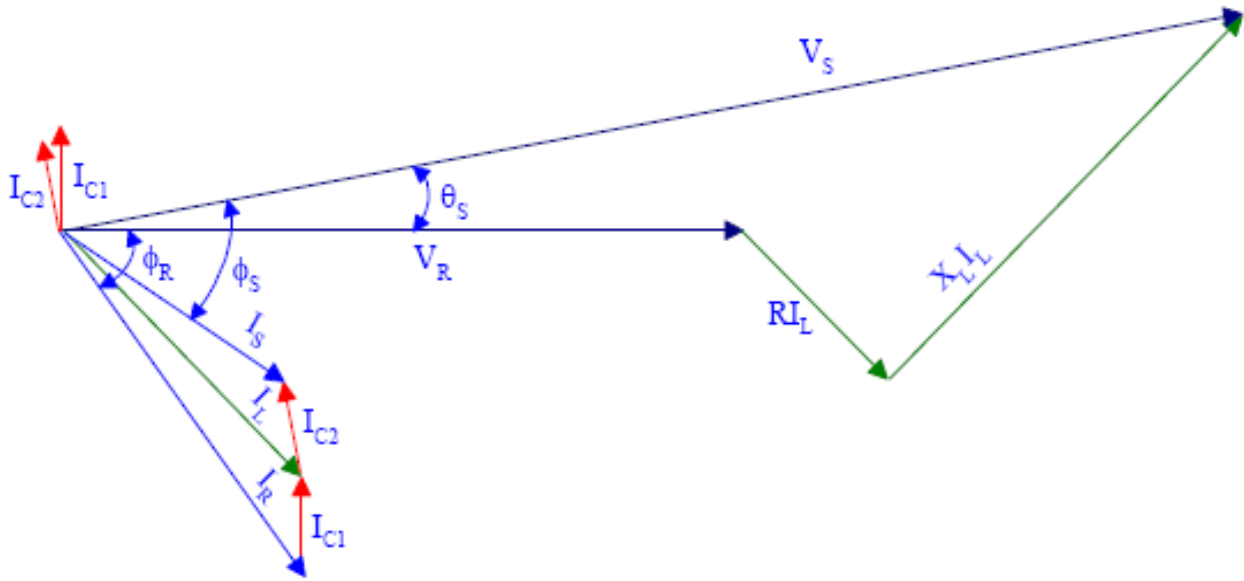
الدائرة المكافئة لخط النقل المتوسط على طريقة (Π - Representation) :

تتمثل هذه الطريقة لتمثيل خطوط النقل المتوسطة في تقسيم المفاعلة السعوية إلى نصفين ، حيث يوضع النصف الأول في بداية الخط عند جهة الإرسال والنصف الثاني عند جهة الاستقبال بينما تتركز المقاومة والمفاعلة الحثية في الوسط مما يعطي الدائرة المكافئة شكل حرف Π ، ونظرا لتمثيل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة المكافئة للخط إلى دائرة أحادية الوجه مفردة ، وبالتالي كتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما هو موضح بشكل (١ - ٩) :



شكل (١ - ٩) - الدائرة المفردة المكافئة لخط نقل متوسط ثلاثي الأوجه ممثل بطريقة Π .

وطبقا للدائرة المكافئة فإنه يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة π كما في الشكل (١ - ١٠) .



شكل (١٠ - ١) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط المتوسط الممثل بطريقة II .

في الدائرة المكافئة للخط الموضحة في شكل (١ - ٩) ومخطط المتجهات الموضح في شكل (١ - ١٠) يتضح أن تيار الخط يساوي مجموع تيار الاستقبال I_R وتيار الشحن عند طرف الاستقبال I_{C1} كما يلي :

$$I_L = I_R + I_{C1} \quad (1.47)$$

حيث إن تيار الشحن عند طرف الاستقبال يحسب من العلاقة التالية :

$$I_{C1} = (Y/2) V_R = j (\omega C/2) V_R \quad (1.48)$$

أما تيار الشحن عند طرف الإرسال فيحسب من العلاقة :

$$I_{C2} = (Y/2) V_S = j (\omega C/2) V_S \quad (1.49)$$

وحيث إن الهبوط في الجهد على الخط يعطى بالعلاقة :

$$\Delta V = Z_L \cdot I_L = (R + j X_L) \cdot I_L \quad (1.50)$$

وعلى ذلك فإن الجهد عند جهة الإرسال يحسب كالتالي :

$$V_S = V_R + \Delta V = V_R + Z_L \cdot I_L = V_R + Z_L (I_R + I_{C1}) \quad (1.51)$$

بالتعويض من المعادلة (1.48) في المعادلة (1.51) نحصل على :

$$V_S = V_R + \Delta V_R + \Delta V_1 = (1 + \frac{Y Z_L}{2}) V_R + Z_L I_R \quad (1.52)$$

أما التيار عند جهة الإرسال فيحسب كالتالي :

$$I_S = I_L + I_{C2} = I_R + I_{C1} + I_{C2} = I_R + (Y/2) V_R + (Y/2) V_S \quad (1.53)$$

بالتعويض من المعادلة (1.52) في المعادلة (1.53) نحصل على :

$$I_S = Y (1 + \frac{Y Z_L}{2}) V_R + (1 + \frac{Y Z_L}{2}) I_R \quad (1.54)$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R \% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 \quad (1.55)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

• القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3 V_S I_S^* = \sqrt{3} V_{S_L} I_S = P_S + j Q_S \quad (1.56)$$

$$P_S = 3 V_S I_S \cos \phi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_S \cos \phi_S \quad (1.57)$$

$$Q_S = 3 V_S I_S \sin \phi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_S \sin \phi_S \quad (1.58)$$

• القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3 V_R I_R^* = \sqrt{3} V_{R_L} I_R = P_R + j Q_R \quad (1.59)$$

$$P_R = 3 V_R I_R \cos \phi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_R \cos \phi_R \quad (1.60)$$

$$Q_R = 3 V_R I_R \sin \phi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_R \sin \phi_R \quad (1.61)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة غير الفعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3 R I_L^2 = P_S - P_R \quad (1.62)$$

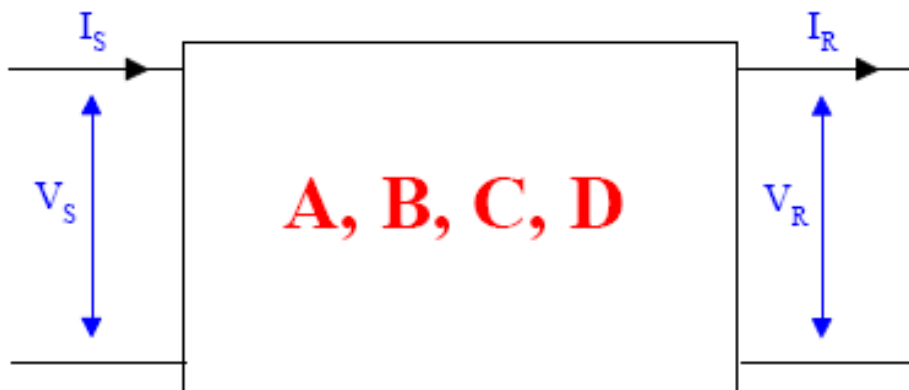
$$Q_{Loss} = Q_S - Q_R \quad (1.63)$$

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \quad (1.64)$$

ثوابت الدائرة المكافئة للخط المتوسط :

يمكن اختصار الدائرة الكهربائية المكافئة للخط المتوسط إلى دائرة مكافئة رباعية الأطراف ذات دخلين (الجهد والتيار عند جهة الإرسال) وخرجين (الجهد والتيار عند جهة الاستقبال) ، حيث ترتبط متغيرات الدخل والخرج بعلاقات تحوي ثوابت تسمى الثوابت العامة للخط كما هو موضح في شكل (١ - ١١) :



شكل (١ - ١١) - الثوابت العامة لخط النقل

$$V_S = A V_R + B I_R \quad (1.65)$$

$$I_S = C V_R + D I_R \quad (1.66)$$

وتتغير هذه الثوابت حسب طريقة التمثيل المستخدمة في دراسة خط النقل المتوسط ، ويمكن الرجوع إلى معادلات الجهد والتيار لكل من الدائرتين المكافئتين الممثلتين لخطوط النقل المتوسطة ، وبالتالي حساب الثوابت العامة لهذا الخط كما يلي :

• الثوابت العامة لخط نقل متوسط ممثل على طريقة T :

بالرجوع إلى معادلة الجهد عند جهة الإرسال (1.36) ومعادلة التيار عند جهة الإرسال (1.35) وترتيب المعاملات على شكل المعادلتين (1.66) , (1.65) يمكن تحديد الثوابت العامة للخط كما يلي :

$$V_S = (1 + \frac{Y Z_L}{2}) V_R + Z_L (1 + \frac{Y Z_L}{4}) I_R$$

$$I_S = Y V_R + (1 + \frac{Y Z_L}{2}) I_R$$

$$A = D = (1 + \frac{Y Z_L}{2}) \quad (1.67)$$

$$B = Z_L (1 + \frac{Y Z_L}{4}) \quad (1.68)$$

$$C = Y \quad (1.69)$$

• الثوابت العامة لخط نقل متوسط ممثل على طريقة II :

بالرجوع إلى معادلة الجهد عند جهة الإرسال (1.52) ومعادلة التيار عند جهة الإرسال (1.54) وترتيب المعاملات على شكل المعادلتين (1.66) , (1.65) يمكن تحديد الثوابت العامة للخط كما يلي :

$$V_S = (1 + \frac{Y Z_L}{2}) V_R + Z_L I_R$$

$$I_S = Y (1 + \frac{Y Z_L}{4}) V_R + (1 + \frac{Y Z_L}{2}) I_R$$

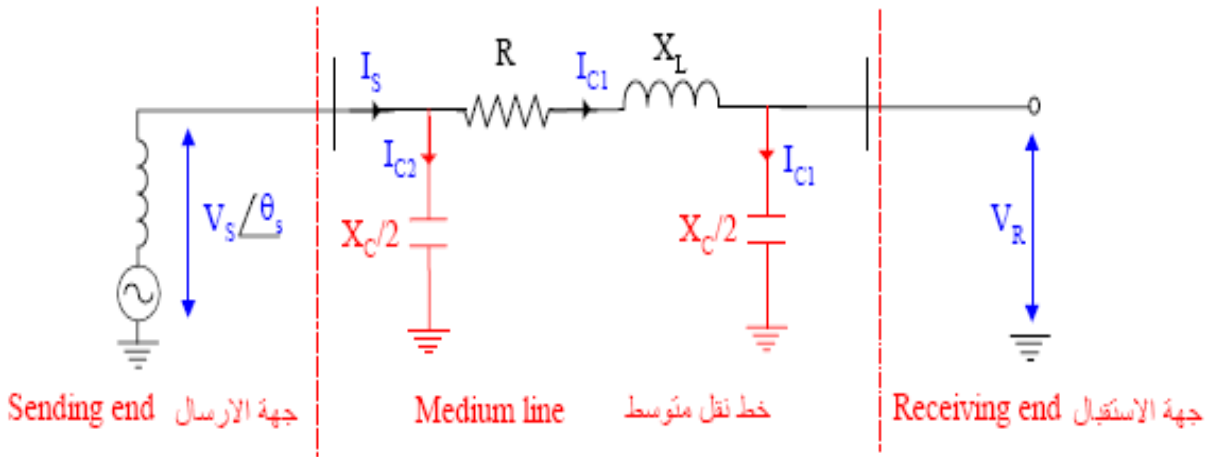
$$A = D = (1 + \frac{Y Z_L}{2}) \quad (1.70)$$

$$B = Z_L \quad (1.71)$$

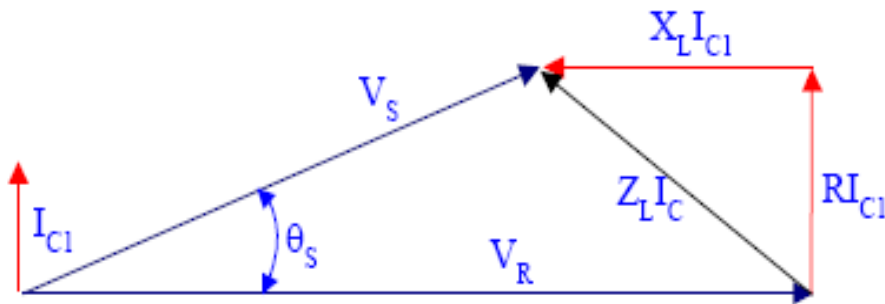
$$C = Y \left(1 + \frac{Y Z_L}{4}\right) \quad (1.72)$$

• تيار الشحن وجهد الإرسال لخط نقل متوسط عند اللاحمل :

نظرا لوجود السعة الكهربائية في تمثيل الخطوط المتوسطة فإن المفاعلة السعوية للخط X_C تحدث تيار شحن متقدما عند جهة الإرسال وخاصة عندما تكون الدائرة غير محملة ، وفي هذه الحالة يكون الجهد عند الاستقبال أكبر من الجهد عند الإرسال حيث تعرف هذه الظاهرة باسم ظاهرة فرانتي Ferranti Effect كما هو موضح بالدائرة المكافئة ومخطط المتجهات للخط تحت هذه الظروف في الأشكال (١٢ - ١) ، (١٣ - ١) :



شكل (١٢ - ١) - خط نقل متوسط غير محمل ممثـل بطريـقة II .



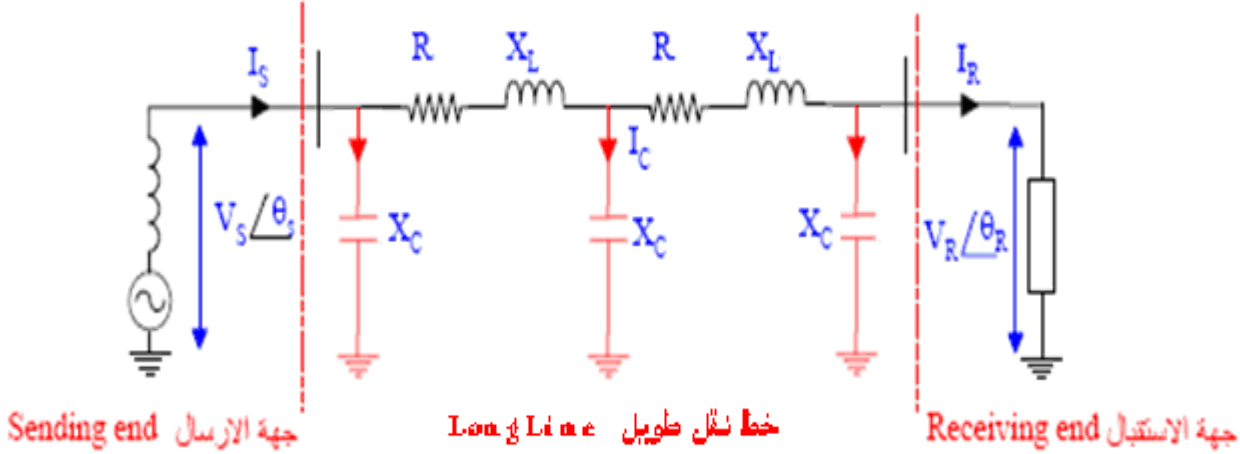
شكل (١٣ - ١) - مخطط المتجهات لخط نقل متوسط غير محمل ممثـل بطريـقة II .

ويحسب جهد الإرسال للخط عند اللاحمل من العلاقة التالية :

$$V_S = \sqrt{(V_R - X_L I_{C1})^2 + (R I_{C1})^2} \quad (1.73)$$

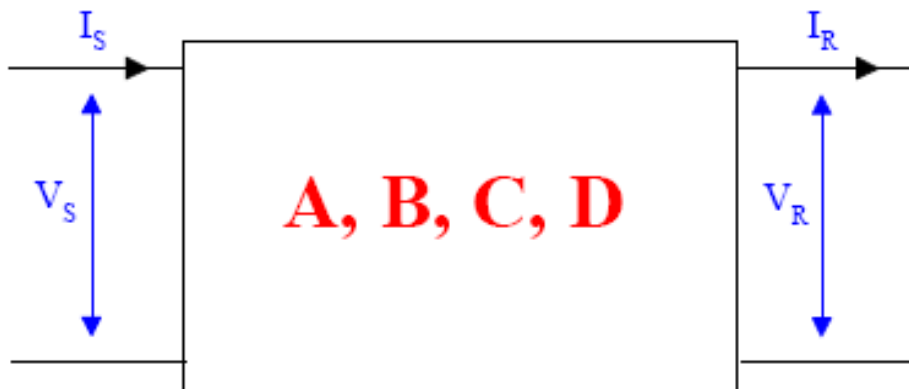
١ - ١ - ٤ : خطوط النقل الطويلة :

يعتبر الخط طويلا إذا كان طوله أكبر من 120 km حيث لا يمكن إهمال السعة الكهربائية C أو المساحة السعوية Y للخط ، وأيضا لا يمكن تركيزها في نقطة ما على الخط ، بل يتم توزيعها بانتظام على طول الخط وكذا الحال بالنسبة للمقاومة المادية R والمفاعلة الحثية X_L للخط ، ونظرا لتمثيل الحمل على الأوجه الثلاثة لخط النقل فإنه يمكن تبسيط الدائرة المكافئة للخط إلى دائرة أحادية الوجه مفردة ، وكتابة معاملات جهتي الإرسال والاستقبال للخط كما هو موضح بشكل (١ - ١٤) :



شكل (١ - ١٤) - الدائرة المكافئة المفردة لخط نقل طويل ثلاثي الأوجه .

ونظرا للتوزيع المنتظم للمقاومة والمفاعلات الحثية والسعوية على طول الخط فإنه يمكن تمثيل خط النقل الطويل باستخدام الدائرة المكافئة رباعية الأطراف واستخدام الثوابت العامة للخط كما هو موضح في شكل (١ - ١٥) :



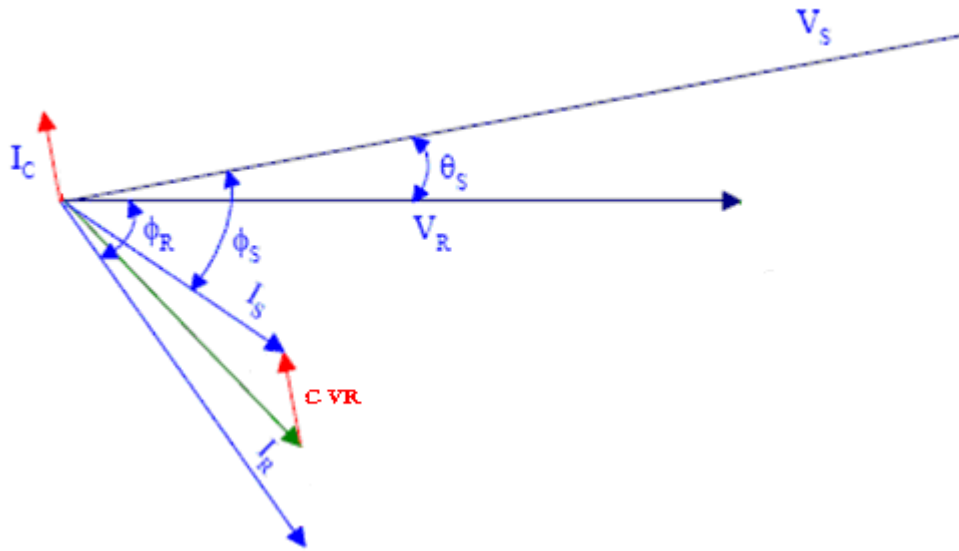
شكل (١ - ١٥) - الدائرة المكافئة والثوابت العامة لخط النقل الطويل

وعلى ذلك يمكن كتابة معادلات الجهد والتيار عند جهة الإرسال بدلالة الجهد والتيار عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V_S = A V_R + B I_R \quad (1.74)$$

$$I_S = C V_R + D I_R \quad (1.75)$$

وطبقا للدائرة المكافئة فإنه يمكن رسم مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط الطويل كما في الشكل (١ - ١٦) .



شكل (١ - ١٦) - مخطط المتجهات المكافئ لدائرة الخط الطويل .

وتحسب هذه الثوابت باستخدام معاوقة الخواص ومسامحة التوازي للخط ، وبالتالي تكون الثوابت العامة لهذا الخط كما يلي :

$$A = D = 1 + \frac{Y Z_L}{2} + \frac{Y^2 Z_L^2}{6} \quad (1.76)$$

$$B = Z_L \cdot \left(1 + \frac{Y Z_L}{4} + \frac{Y^2 Z_L^2}{24} \right) \quad (1.77)$$

$$C = Y \cdot \left(1 + \frac{Y Z_L}{4} + \frac{Y^2 Z_L^2}{24} \right) \quad (1.78)$$

ويحسب تنظيم الجهد على الخط Line voltage regulation : وهو النسبة المئوية بين جهد اللاحمل وجهد الحمل عند جهة الاستقبال كما يلي :

$$V.R \% = \frac{V_{R_{n.L}} - V_{R_L}}{V_{R_L}} * 100 = \frac{V_S - V_R}{V_R} * 100 \quad (1.79)$$

كما يمكن حساب القدرة الظاهرية والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة (المفاعلة) عند جهتي الإرسال والاستقبال في حالة الأحمال المتزنة (المتوازنة) من العلاقات التالية :

• القدرة عند جهة الإرسال :

$$S_S = 3 V_S I_S^* = \sqrt{3} V_{S_L} I_S = P_S + j Q_S \quad (1.80)$$

$$P_S = 3 V_S I_S \cos \phi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_S \cos \phi_S \quad (1.81)$$

$$Q_S = 3 V_S I_S \sin \phi_S = \sqrt{3} V_{S_L} I_S \sin \phi_S \quad (1.82)$$

• القدرة عند جهة الاستقبال :

$$S_R = 3 V_R I_R^* = \sqrt{3} V_{R_L} I_R = P_R + j Q_R \quad (1.83)$$

$$P_R = 3 V_R I_R \cos \phi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_R \cos \phi_R \quad (1.84)$$

$$Q_R = 3 V_R I_R \sin \phi_R = \sqrt{3} V_{R_L} I_R \sin \phi_R \quad (1.85)$$

وتتسبب كل من المقاومة R والمفاعلة الحثية للخط X_L في فقدان كمية من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حيث يتناسب هذا الفقد في القدرة مع مربع التيار ، وتفقد القدرة الفعالة P_{Loss} على مقاومة الخط بينما تفقد القدرة الغير فعالة Q_{Loss} على المفاعلة الحثية للخط ، ويمكن حساب هذه المفاقد طبقا للعلاقات التالية :

$$P_{Loss} = 3 R I_L^2 = P_S - P_R \quad (1.86)$$

$$Q_{Loss} = Q_S - Q_R \quad (1.87)$$

إضافة إلى ما سبق فإن كفاءة خط النقل Transmission Line Efficiency والتي تمثل النسبة بين القدرة الفعالة المنقولة على الخط والتي تصل إلى المستهلك والقدرة الفعالة المولدة عند الإرسال يمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$\eta \% = \frac{P_R}{P_S} * 100 \quad (1.88)$$

١- ٢ : تركيبات خطوط النقل الكهربائي :

الوظيفة الأساسية لخطوط النقل الكهربائي هي نقل القدرة الكهربائية من مكان إلى آخر، والمكون الرئيس لخط النقل هو الموصل حيث إن الموصل هو الناقل الفعلي للطاقة الكهربائية أما باقي تركيبات خطوط النقل فهي إما لحمل وتثبيت الموصل أو لعزل الموصلات عن الأرض وعن بعضها ، وخطوط النقل الكهربائي غالبا ما تكون في صورة خطوط نقل هوائية فوق الرأس، ويطلق عليها الخطوط الهوائية لكون الهواء هو العازل الرئيسي بين الموصلات وبعضها حيث تستخدم الموصلات المكشوفة غير المعزولة محمولة على أبراج لرفع هذه الموصلات عن سطح الأرض بمسافة كافية لتوفير الأمان، وكذلك للحفاظ على المسافة بين الموصلات ثابتة، وتكون الموصلات معزولة عن جسم البرج باستخدام عوازل من البورسلين أما على طول مسار الخط يكون الهواء هو العازل بين الموصلات والأرض وبين الموصلات وبعضها.

وخطوط النقل يجب أن تتوافر لها الخصائص الآتية :

- يجب أن يكون الجهد ثابتا على طول الخط
- يجب أن يكون الفقد في القدرة أقل ما يمكن حتى تكون كفاءة النقل عالية وتكلفة النقل أقل ما يمكن
- يجب أن لا يتسبب الفقد في القدرة في تسخين الموصل لدرجة تسبب تغييرا في الخواص الكهربائية والميكانيكية للموصل
- يجب أن يتحمل الموصل الإجهاد الميكانيكي الواقع عليه نتيجة وزنه وكذلك نتيجة لتراكم الثلوج وتأثير ضغط الرياح عليه

وسوف نتعرف في هذه الوحدة على أهم الاعتبارات الخاصة بتركيبات خطوط النقل الهوائية وعلى أهم المواد المستعملة في صناعة موصلات خطوط النقل وكذلك على الأشكال المختلفة لأبراج خطوط النقل الكهربائي.

وحيث إن الترخيم في الموصلات من أهم الاعتبارات التي يجب أن تؤخذ في الحسبان عند تصميم وإنشاء خط النقل لما له من علاقة مباشرة بالإجهاد الميكانيكي المؤثر على الموصل ولأن مقدار الترخيم يحدد مقدار الخلوص بين الموصل والأرض والذي يجب أن لا يقل عن حد معين يتم تحديده تبعا لمستوى جهد الخط طبقا لاشتراطات الأمن والسلامة المعمول بها في هذا المجال فإننا سوف ندرس كيفية حساب الترخيم عندما يكون الخط معلقا بين برجين متماثلين على أرض مستوية، وكذلك عندما تكون نقاط تثبيت الموصل ليست على نفس المستوى وذلك عندما يكون الموصل معلقا بين برجين مختلفين أو عندما

يكون مسار الخط مارا بمنطقة جبلية أو هضابية. وسندرس أيضا كيفية حساب تأثير تراكم الثلوج وضغط الرياح على مقدار الترخيم والشد في الموصل.

١- ٢- ١ : المواد المستعملة في صناعة الموصلات وخصائصها :

الموصل هو الجزء الرئيس في خط النقل حيث إنه هو الناقل الذي يقوم بنقل الطاقة الكهربائية من مكان إلى آخر والموصلات المستخدمة في خطوط النقل غالبا ما تكون مكشوفة أي غير مغطاة بمادة عازلة وتكون معلقة بين أعمدة أو أبراج تبعد عن بعضها مسافات قد تصل في بعض الأحيان إلى أكثر من 250 مترا وهذه المسافة تعرف بباع البرج أو بحر السلك "span".

وكون الموصل معلقا يجعله دائما واقعا تحت تأثير وزنه الذي يؤثر رأسيا إلى أسفل مسببا إجهاد شد في الموصل، ولذلك فإنه يجب أن تكون المادة التي يصنع منها الموصل ذات متانة ميكانيكية عالية تجعلها تتحمل الإجهاد الواقع عليها، وأن تكون خفيفة الوزن حتى تكون قوة الشد المؤثرة على الموصل قليلة وحتى يمكن زيادة المسافة بين الأبراج لتقليل تكلفة إنشاء الخط، وعموما فإن اختيار مادة الموصل في خطوط النقل يخضع لعدة اعتبارات:

- المسافة بين البرجين و مقدار الترخيم المسموح به
- الشد في الموصلات
- ما إذا كان الجو المحيط يحتوي على مواد أكالة أي تسبب تآكل الموصلات أم لا
- هل سيكون الخط معرضا للاهتزازات أم لا ؟
- الفقد في القدرة على الخط
- الهبوط في الجهد على الخط
- الطقس والعوامل المناخية في موقع الخط
- مساحة مقطع الموصل أو حجم الموصل ويتم تحديد حجم الموصل بناءً على مجموعة من الاعتبارات كالهبوط في الجهد والسعة الحرارية للموصل واعتبارات اقتصادية خاصة بتكلفة الموصل.

والمواد التي يمكن استخدامها في صناعة الموصلات كثيرة كالنحاس والألنيوم وغيرها، وللحكم على مناسبة أي منها لصناعة موصلات خطوط النقل يلزم المفاضلة بين الخصائص الميكانيكية (المتانة الميكانيكية ومعامل المرونة ومعامل التمدد الحراري) والخصائص الكهربائية (كالموصلية) لكل من هذه المواد واختيار المادة التي لها أفضل مجموعة من الخواص بأقل تكلفة، وفيما يلي سنتعرف على خصائص المواد المستعملة في صناعة الموصلات:

أ - الموصلية Conductivity :

يجب أن تكون المادة التي تصنع منها موصلات خط النقل ذات موصلية عالية وذلك حتى يكون الفقد في القدرة على الخط أقل ما يمكن حتى تكون عملية النقل اقتصادية. حيث إن الفقد في القدرة (P_L) في خط ثلاثي الأوجه يمكن حسابه كالاتي:

$$P_L = 3I^2 R \quad (1.89)$$

$$R = \frac{L}{\sigma \cdot a} \quad (1.90)$$

حيث : R هي مقاومة موصل الوجه الواحد مقدرة بالأوم (Ω)

L طول الموصل مقدرا بالمتر (m)

(a) مساحة مقطع الموصل مقدرة بالمتر المربع (m^2)

(σ) الموصلية للمادة المصنوع منها الموصل مقدرة بالأوم.متر ($\Omega.m$)

وواضح من المعادلة (1.90) أنه كلما زادت الموصلية قلت مقاومة الموصل وقل بالتبعية الفقد في القدرة في الخط، وإذا زادت الموصلية يمكن أيضا استخدام موصلات ذات مساحة مقطع أقل مما يؤدي إلى توفير في مادة الموصل وتوفير في تكلفة الموصل المستخدم.

ب - المتانة الميكانيكية Mechanical Strength :

تقاس المتانة الميكانيكية بأقصى إجهاد تتحمله المادة، وعادة ما تستخدم نسبة المتانة إلى الوزن للمفاضلة بين المواد المختلفة حيث إنه كلما كانت نسبة المتانة إلى الوزن أكبر أمكن زيادة خطوة البرج وتقليل تكلفة إنشاء الخط.

ج - معامل المرونة Modulus of Elasticity

يعرف معامل المرونة (معامل يونج Young's Coefficient) لأي مادة بأنه نسبة الإجهاد الواقع على المادة إلى الانفعال الحادث لها. (الانفعال هو مقدار التغير الحادث في أبعاد المادة منسوباً إلى أبعادها الأصلية)، وكلما كان معامل المرونة لمادة الموصل أكبر كلما كان الموصل قادراً على الحفاظ على أبعاده دون تغيير، لأن استطالة الموصل تحت تأثير إجهاد الشد الواقع عليه تؤدي إلى نقص مساحة المقطع مما يؤدي إلى ضعف الموصل وانقطاعه.

د - معامل التمدد الحراري Heat expansion coefficient :

حيث إن خطوط النقل الهوائية تكون معرضة للتغيرات المناخية نظراً لوجودها بالعراء فهي عرضة للتغيرات في درجة الحرارة من درجات تقترب من درجة التجمد في الشتاء إلى درجات تريبو على 40 درجة مئوية وقد تصل إلى 50 درجة وأكثر في بعض المناطق، فإذا كان معامل التمدد الحراري للموصل كبيراً فإن أسلاك خط النقل ستمدد لدرجة تجعلها تقترب من الأرض في الصيف في حين أنها ستتكمش انكماشاً شديداً في الشتاء مما يزيد الشد في الموصل ويجعله ينقطع، ولهذا السبب فإنه يفضل صناعة الموصل من مادة ذات معامل تمدد حراري صغير.

هـ - التكلفة Cost :

والتكلفة من أهم العوامل المؤثرة في اختيار مادة الموصل وذلك للمحافظة على تكلفة نقل الطاقة الكهربائية أقل ما يمكن، والمادة التي يصنع منها الموصل يتم اختيارها بحيث يكون لها أفضل مجموعة من الخصائص بأقل تكلفة.

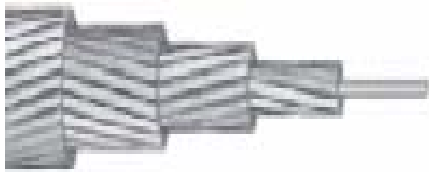
وبالنظر إلى المواد الموصلة نجد أن الفضة لها أعلى موصلية كهربائية ولكن تكلفتها العالية تحول دون استخدامها كموصل كهربائي إلا في بعض التطبيقات الدقيقة المحدودة جداً. وبعد الفضة من حيث جودة التوصيل الكهربائي يأتي النحاس، والنحاس كمادة موصلة يتمتع بموصلية عالية لا يفوقه فيها إلا الفضة وتكلفته أقل بكثير من الفضة، ويمكن بالمعالجات الحرارية أن نحصل على خواص مختلفة فمثلاً النحاس المسحوب على البارد هو أفضل أنواع النحاس توصيلاً للكهرباء ولكن تنقصه المرونة، في حين أن النحاس الأحمر المخمر أقل قليلاً في الموصلية والمتانة الميكانيكية ولكنه يتمتع بمرونة عالية ولذلك يستخدم في تصنيع أسلاك التمديدات الداخلية للمباني والمصانع، في حين يستخدم النحاس المسحوب على البارد في تصنيع القضبان العمومية والموصلات التي تحتاج إلى متانة ميكانيكية عالية، وأدت كثرة الطلب على النحاس (لما له من خواص مميزة في التوصيل في التوصيل الكهربائي والمتانة الميكانيكية) إلى ارتفاع سعره لدرجة تجعله غير مناسب اقتصادياً لتصنيع موصلات خطوط النقل الهوائي إلا في أضيق الحدود وحين تكون هناك ضرورة تقنية ملحة كأن تكون المتانة الميكانيكية للموصلات مطلباً أساسياً كما في الموصلات الهوائية الخاصة بوسائل النقل الكهربائي كالترام ومترو الأنفاق.

والمادة الأكثر استعمالاً في صناعة موصلات خطوط النقل الهوائي هي الألمنيوم حيث إن الألمنيوم يتمتع بخصائص تؤهله لأن يكون بديلاً جيداً للنحاس وهي أن الألمنيوم له موصلية عالية تزيد على 60%

من موصلية النحاس ، ويتمتع الألمنيوم إلى جانب الموصلية العالية نسبيا بخفة الوزن ورخص الثمن ، وإذا كانت المتانة الميكانيكية للألمنيوم أقل من النحاس فإنه يتم التغلب عليها بطرق مختلفة سنستعرضها فيما يلي ونحن نستعرض أهم أنواع موصلات خطوط النقل المستخدمة فعلا في الحياة العملية.

١- ٢- ٢ : أنواع الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائي :

معظم الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائية تكون عبارة عن جديلة مكونة من قلب مكون من سلك واحد مستقيم محاطاً بطبقة أو أكثر من الأسلاك المجدولة بطريقة حلزونية حول هذا القلب ويكون اتجاه جدل الأسلاك في كل طبقة مخالفاً لاتجاه الجدل في الطبقة السابقة كما هو موضح بشكل (١- ١٧) ، وبالإضافة إلى الموصلات المجدولة المصنوعة من النحاس أو من سبيكة النحاس والكاديوم يوجد عدة أنواع من الموصلات المبنية على الألمنيوم والتي تعطي أفضل الحلول لمتطلبات خطوط النقل الهوائية في الظروف المختلفة.



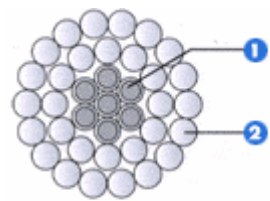
أ- الألمنيوم All Aluminum Conductor AAC

أرخص أنواع الموصلات حيث إنه أرخص من أي موصل آخر يمكن أن يستخدم لنفس التيار ولكن المتانة المنخفضة لهذا النوع من الموصلات تجعله مناسباً فقط عندما تكون خطوة البرج قصيرة.

شكل (١- ١٧) اتجاه جدل السلك

ب - الألمنيوم المقوى بالصلب Aluminum Conductor Steel Reinforced ACSR

يتكون هذا الموصل من قلب عبارة عن طبقة أو أكثر من أسلاك الصلب المجلفن المحاطة بطبقة أو أكثر من أسلاك الألمنيوم ، كما هو موضح بالشكل (١- ١٨) ، ويتم تعريف هذه الموصلات بعدد أسلاك الألمنيوم وأسلاك الصلب وأكثر موصلات هذا النوع شيوعاً هي الموصلات 26/7 أي التي تتكون من 26 سلك ألمنيوم و 7 أسلاك من الصلب إلا أنه توجد أنواع كثيرة بنسب مختلفة من أسلاك الصلب والألمنيوم . وهذا النوع من الموصلات له متانة أعلى من موصلات الألمنيوم



١ . قلب من أسلاك الصلب
٢ . أسلاك الألمنيوم

شكل (١- ١٨) أسلاك الألومنيوم المقوى بالصلب

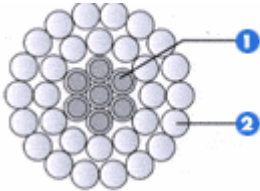
ولذلك يستخدم عندما تكون المسافة بين الأبراج أكبر ويمكنه كذلك تحمل الظروف الجوية السيئة وله كذلك معامل مرونة أعلى ومعامل تمدد حراري أقل من الألمنيوم ولذلك فإن خصائصه الميكانيكية

أعلى بكثير من الألمنيوم ويمكن التحكم في هذه الخصائص بتغيير نسبة الألمنيوم إلى الصلب في الموصل المجدول.

ج - موصلات سبائك الألمنيوم AAAC All Aluminum Alloy Conductor

وهذا النوع عبارة عن سبيكة متجانسة معالجة حرارياً من الألمنيوم والمغنسيوم والسيليكون ، وهذا الموصل له خصائص تميزه عن ACSR ، AAC حيث إن له متانة عالية جداً (له أكبر نسبة متانة/الوزن) وذلك يتيح زيادة المسافة بين الأبراج والتقليل من تكلفة إنشاء الخط أو زيادة قدرة حمل التيار عند استخدامه على الأبراج الموجودة فعلاً وتحسين أداء الخط . وهذا الموصل له مقاومة كهربائية أقل وبالتالي يسبب فقد أقل في القدرة على الخط ، وهو أيضاً غير معرض لمشكلة تآكل الجلفنة كما في موصلات ACSR وتركيباته أقل تعقيداً وأسطحه أقل عرضة للتلف ولذلك يكثر استخدام هذا النوع من الموصلات في الخطوط الحديثة.

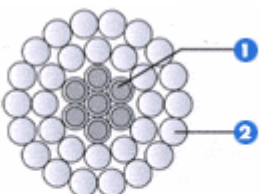
د - الألمنيوم المقوى بسبيكة الألمنيوم Aluminum Conductor Alloy Reinforced ACAR



1- قلب من سبيكة من الألمنيوم
2- أسلاك من الألمنيوم

وهو مشابه تماماً ل ACSR ولكن مع استبدال القلب المكون من أسلاك الصلب بأسلاك من سبيكة الألمنيوم وبذلك يعطي خصائص بين خصائص موصلات الألمنيوم وموصلات الألمنيوم المقوى بالصلب.

هـ - سبيكة الألمنيوم المقواه بالصلب AACSR Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced



1- قلب من أسلاك الصلب
2- أسلاك من سبيكة من الألمنيوم

وهو مشابه ل ACSR حيث يحتوي على قلب مكون من أسلاك الصلب ولكن تستبدل أسلاك الألمنيوم بأسلاك من سبيكة الألمنيوم، وهذا النوع له متانة ميكانيكية عالية على حساب الموصلية ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات عندما تكون مثل هذه الخصائص مرغوبة وخصوصاً في أسلاك الأرضي.

Power Poles and Towers

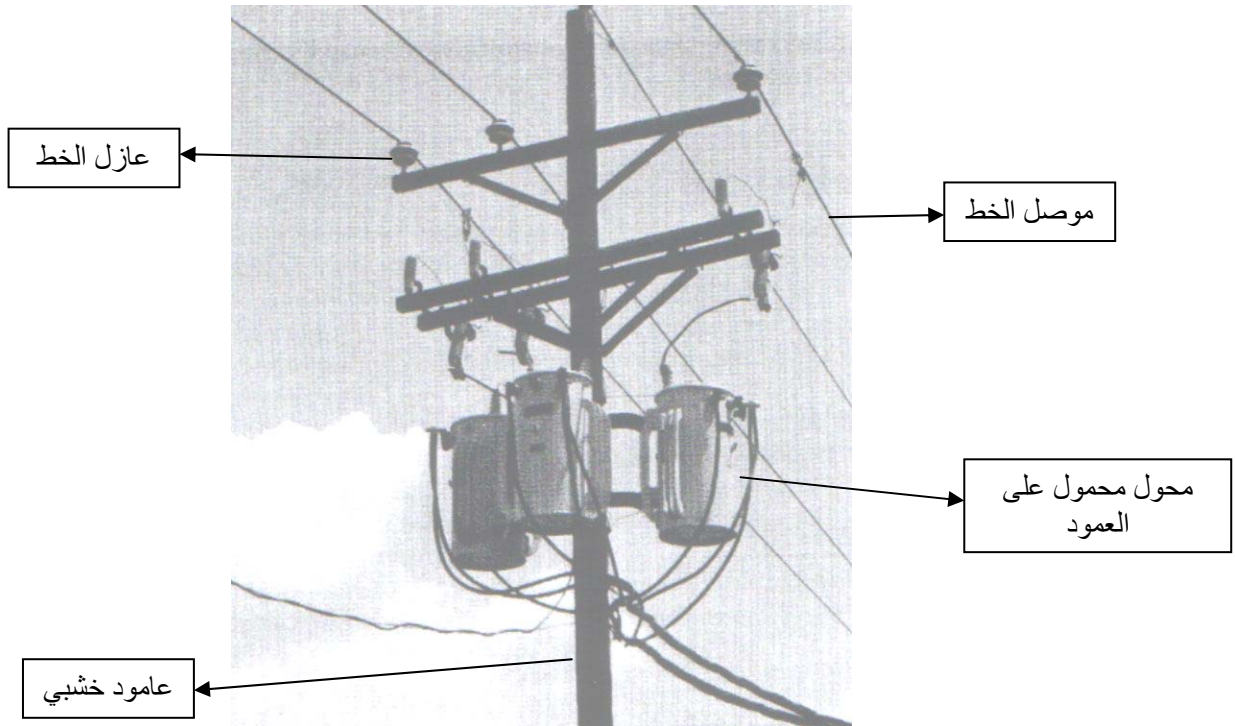
١- ٢- ٣ : أبراج خطوط النقل الكهربائي :

وظيفة أبراج خطوط النقل هي تثبيت الموصلات ويجب أن تكون هذه الأبراج محصورة داخل حقوق المرور المتاحة ومطابقة للاعتبارات الجمالية للمنطقة التي يتم تركيبها بها فالأبراج التي تستخدم لحمل

خطوط النقل في الصحراء لا تصلح بحال لحمل أسلاك الكهرباء داخل المدن، وهناك العديد من الوسائل المستخدمة لحمل وتثبيت خطوط النقل وهي:

١. الأعمدة الخشبية : Wooden Poles

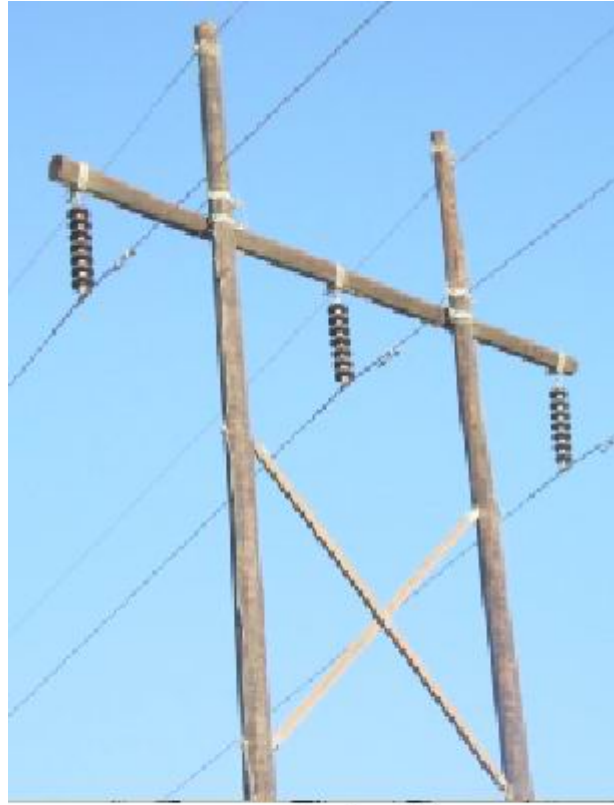
تعتبر الأعمدة الخشبية أرخص أنواع الأعمدة وتصنع من أخشاب شجر الأرز والصنوبر وذلك لطولها واستقامتها وتتوافر الأعمدة الخشبية في أطوال تبدأ من 25 قدم حتى 130 قدم أو أكثر حسب الطلب وبزيادة مقدارها ٥ أقدام. وتتميز الأعمدة الخشبية بمرونتها حيث تنحني إذا تعرضت لأحمال ميكانيكية عالية ثم تعود إلى وضعها الطبيعي بزوال الحمل وهذه الخاصية تجعلها ملائمة تماماً لأغراض تثبيت الموصلات ولذا ينصح باستعمالها كلما أمكن ذلك، لأنه في حالة تعرض الموصلات لقوى شديدة كتلك الناتجة عن عاصفة مثلاً فإن حركة العمود الخشبي تمتص هذه القوة وتخفف من تأثيرها على الموصلات. بعد قطع الخشب وتجفيفه وعمل التجايف والنقر المطلوب لتثبيت الأذرع المستعرضة يتم معالجة الخشب بمشتقات قطران الفحم - عادة الكريوزوت - حتى يتشبع تماماً وهذه المعالجة تجعل عمر الخشب يتراوح ما بين 40 - 50 سنة ما لم يهاجم بواسطة العفن أو نকার الخشب اللذان يمثلان أكبر عدوين للأعمدة الخشبية.



شكل (١ - ١٩) - عمود خشبي في منظومات النقل الكهربائي

وتبعا لمتطلبات الحالات المختلفة يمكن استخدام الأعمدة الخشبية في صورة عمود مفرد كما في شكل (١ - ١٩) أو في صورة تركيبات على شكل حرف H كما في شكل (١ - ٢٠). وتتميز الأعمدة المفردة بأن حق المرور المطلوب لها أقل ما يمكن في حين أن ما يحد استعمال الأعمدة الخشبية المفردة هو أقصى جهد يمكن وضعه على عمود مفرد والمسافة بين الموصلات وكذلك وزن الموصلات.

وتتميز تركيبات H بأنها متينة وقوية لدرجة تمكنها من تحمل وزن موصلات ذات مساحة مقطع كبيرة ومسافات كبيرة بين كل برجين متتاليين ويمكن كذلك استخدامها لجهود مرتفعة وذلك للإمكانية المتاحة لديها من تثبيت الموصلات على مسافات أكبر، ويعيبها فقط أن متطلبات حق المرور لمثل هذه الأبراج أكبر.



شكل (١ - ٢٠) - عمود خشبي على شكل H

وتتميز الأعمدة الخشبية إلى جانب ما ذكرناه بمقاومتها لمرور التيار ويمكن تصنيفها في حالة الجهود المنخفضة كمادة عازلة، وتتميز كذلك بسهولة تركيبها وبحاجتها إلى أساسات بسيطة لتثبيتها. و عندما لا يمكن توفير الأعمدة الخشبية بطريقة اقتصادية وعندما تكون المتانة العالية مطلوبة تستخدم الأعمدة الخرسانية والمعدنية، وكذلك عندما يكون الشكل ذا أهمية كبرى حيث يمكن تصنيع الأعمدة الخرسانية والمعدنية بأشكال وألوان عديدة .

٢. الأعمدة الخرسانية : Concrete Poles

تصنع الأعمدة الخرسانية - وكذلك المعدنية - بمقاطع دائرية أو مربعة أو مضلعة (عادة ستة أو ثمانية أضلاع) ، وتكون مجوفة وذلك لتقليل وزنها الذي مازال يمثل عيبا كبيرا وخصوصا عند تداولها أثناء النقل والتثبيت. ويستغل التجويف داخل العمود في تمرير الكابلات التي تقوم بتوصيل الكهرباء من أو إلى أعلى العمود . وتستخدم أسياخ حديد طولية - عادة 8 أسياخ - لتقوية العمود وعادة ما تكون سابقة الإجهاد أي معرضة لإجهاد شد عند التصنيع والذي يعادله إجهاد الضغط الواقع على العمود بعد التركيب ، ويتم أيضا استخدام أسياخ تسليح عمودية في صورة حلزون ملفوف حول الأسياخ الطولية ويتم لحامه بطريقة تمنع حركة الأسياخ أثناء عملية صب الخرسانة. كل الأعمدة الخرسانية تكون مدببة أي تقل مساحة مقطعها مع ارتفاع العمود والأعمدة المضلعة والمربعة يتم شطف أركانها ويكون بالعمود فتحة لدخول الكابلات وفتحات تسمح بدخول يد العامل أو الفني لسحب وتركيب الكابل في القلب المجوف للعمود. بالإضافة إلى ثقل وزنها فإن الأعمدة الخرسانية أكبر تكلفة من الأعمدة الخشبية وهذا ما يحد من استخدامها وخصوصا عند توافر الأعمدة الخشبية .

وتتميز الأعمدة الخرسانية بالآتي:

- لا تتأثر الأعمدة الخرسانية بالتعفن ولا بالطيور ولا بالنار ولا تصدأ و كذلك لا تتأثر بالمواد الكيميائية .
- أقوى وأصلب من الخشب ولا تحتاج إلى صيانة
- تؤثر رطوبة التربة والجو تأثيرا سلبيا على الأنواع الأخرى من الأعمدة إلا أنها تعمل لصالح الأعمدة الخرسانية حيث تزيد صلابتها ومتانتها
- باعتبار عمر العمود فإن العمود الخرساني يعتبر الأقل تكلفة/السنة بالنسبة لباقي الأنواع من

الأعمدة



شكل (١ - ٢١)

الأعمدة الخرسانية



٣. الأعمدة المعدنية : Metallic Poles

تصنع الأعمدة المعدنية بأطوال مختلفة وسمك يعتمد على المتانة المطلوبة ، وتصنع في أشكال الأعمدة الخرسانية - دائرية أو مربعة أو مضلعة - وتكون مدببة كذلك ، وتكون عادة بلون المعدن المصنوعة منه ولكن يمكن طلاؤها بالألوان المطلوبة ، ويمكن تثبيتها في الأرض مباشرة ، أو في قواعد خرسانية ، أو بمسامير في ألواح معدنية مثبتة في قواعد خرسانية .

الأعمدة المعدنية ليس لها مرونة الأعمدة الخشبية ولا حتى عمرها الزمني حيث يتراوح عمر العمود المعدني من 25 حتى 30 سنة في حين يصل عمر العمود الخشبي من 40 - 50 سنة في حالة معالجاتها بطريقة تمنع حدوث التعفن ويعتمد عمر العمود المعدني على سمك طبقة الجلفنة. والأعمدة المعدنية أكبر تكلفة من الأعمدة الخشبية ولكن تصبح أكثر اقتصادية للأطوال من 90 - 130 قدم ، ويرجع السبب الرئيسي لاستخدام الأعمدة المعدنية إلى منظرها حيث يعتقد الكثير من الناس أن الأعمدة المعدنية لها شكل أكثر جاذبية أو قبولا من الأعمدة الخشبية ، وأكثر استخدامها في إنارة الطرق السريعة والشوارع والملاعب الرياضية وفي المناطق السكنية والتجارية ، ويمكن استخدامها في خطوط النقل في صورة أعمدة منفردة أو تكوينات من عمودين أو أكثر.

وتتميز الأعمدة المعدنية على الأعمدة الخشبية بسهولة النقل وخصوصا للأعمدة الطويلة حيث يمكن تصنيع العمود المعدني من عدة أجزاء يسهل نقلها ثم يتم تجميعها في موقع التركيب ، وأيضا لأنه يمكن تصنيع الأعمدة المعدنية في مواقع عديدة فيسهل نقل الأعمدة من أقرب مواقع التصنيع إلى موقع التركيب بعكس الأعمدة الخشبية التي تعتمد أماكن إنتاجها على أماكن توافر الأشجار.

٤. الأبراج الحديدية : Steel Towers

هي عبارة عن تركيب شبكي من عناصر من الصلب المجلفن والتي يتم تجميعها معا بصواميل ومسامير لتكون شكل البرج ، وتعتبر الأبراج الحديدية أكثر أنواع الأبراج استخداما حيث إنها :

- الأعلى من حيث نسبة المتانة/الوزن

- الأطول عمرا وذات تكلفة معقولة

- يمكن نقل مكونات البرج بسهولة وتجميعها بسهولة أيضا في مكان التركيب

ورغم أنها تحتاج إلى أساسات خاصة ولكنها غير باهظة التكاليف ولا صعبة التركيب. وتعتمد أبعاد البرج - ارتفاعه والمسافات بين الأذرع المستعرضة واتساعها - على مستوى الجهد ، ويعتمد تصميم البرج وطريقة تثبيته على موقعه من الخط. وأنواع الأبراج هي :

أ- برج تعليق/تثبيت suspension/support tower

وهو البرج الذي يستخدم لتعليق/تثبيت الموصلات وغالبية الأبراج الموجودة في مسار الخط تكون من هذا النوع ، ولا يبذل هذا البرج أي شد على الموصل فهو بمثابة نقطة تعليق/تثبيت فقط ويمكن تمييز هذا البرج بوجود عازل واحد لكل موصل . ويختلف برج التعليق عن برج التثبيت في وضع الموصل بالنسبة للعازل ، ففي برج التثبيت يكون العازل مثبتا رأسيا لأعلى ويكون السلك موضوعا فوق العازل أما في برج التعليق يكون العازل مثبتا رأسيا لأسفل ويكون السلك معلقا في أسفل العازل كما في شكل (١ - ٢٢) وفي كلا النوعين لا يكون السلك مربوطا في العازل .

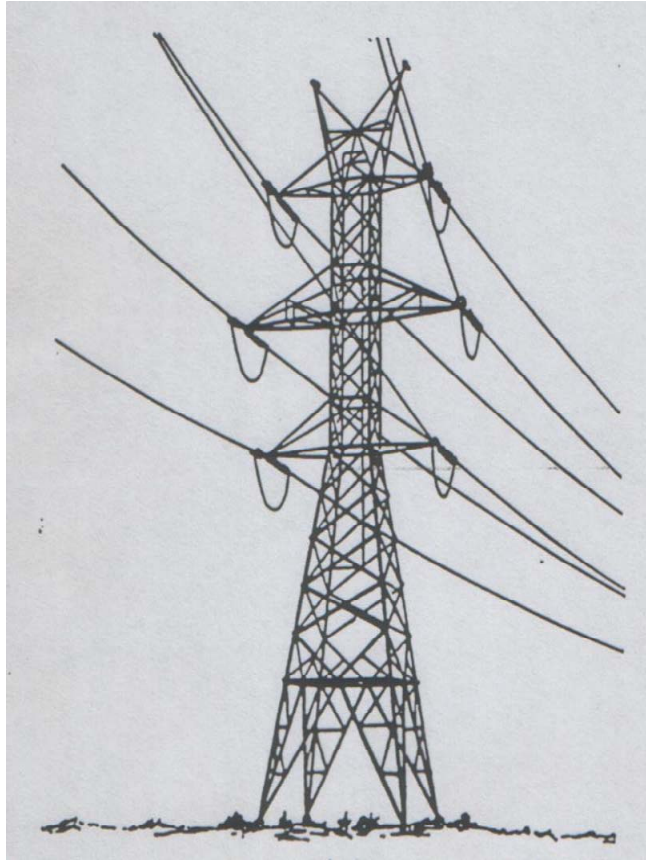


شكل (١ - ٢٢) - برج تعليق على خط نقل كهربائي .

ب- برج الشد Tension tower

ويمكن تمييز هذا البرج بوجود عازلين عند كل نقطة تثبيت حيث يكون الموصل بينه وبين البرج الذي يسبقه مربوطا بأحد العازلين والموصل بينه وبين البرج الذي يليه مربوطا بالعازل الثاني شكل (١ - ٢٣) . ويوضع برج من هذا النوع بعد كل عدة أبراج تعليق - كل عشرة أبراج في المتوسط - وذلك

لتفادي سقوط السلك من على الأبراج حالة حدوث قطع فيه . لأنه إذا كانت جميع الأبراج على مسار الخط أبراج تعليق/ تثبيت و حدث قطع في الموصل فإن الموصل سيسقط من على جميع الأبراج وسيلزم إعادة تركيب الموصلات على الأبراج وما يلزم ذلك من وقت طويل ومجهود كبير و تكلفة عالية. ولكن في وجود أبراج الشد لن يسقط إلا السلك في المسافة بين برج الشد الذي حدث بينهما القطع في الموصل. ويكون هذا البرج معرضا لشد متساوٍ من كلتا جهتيه.



شكل (١ - ٢٣) - برج شد على خط نقل كهربائي

ج. برج الزاوية Angle tower

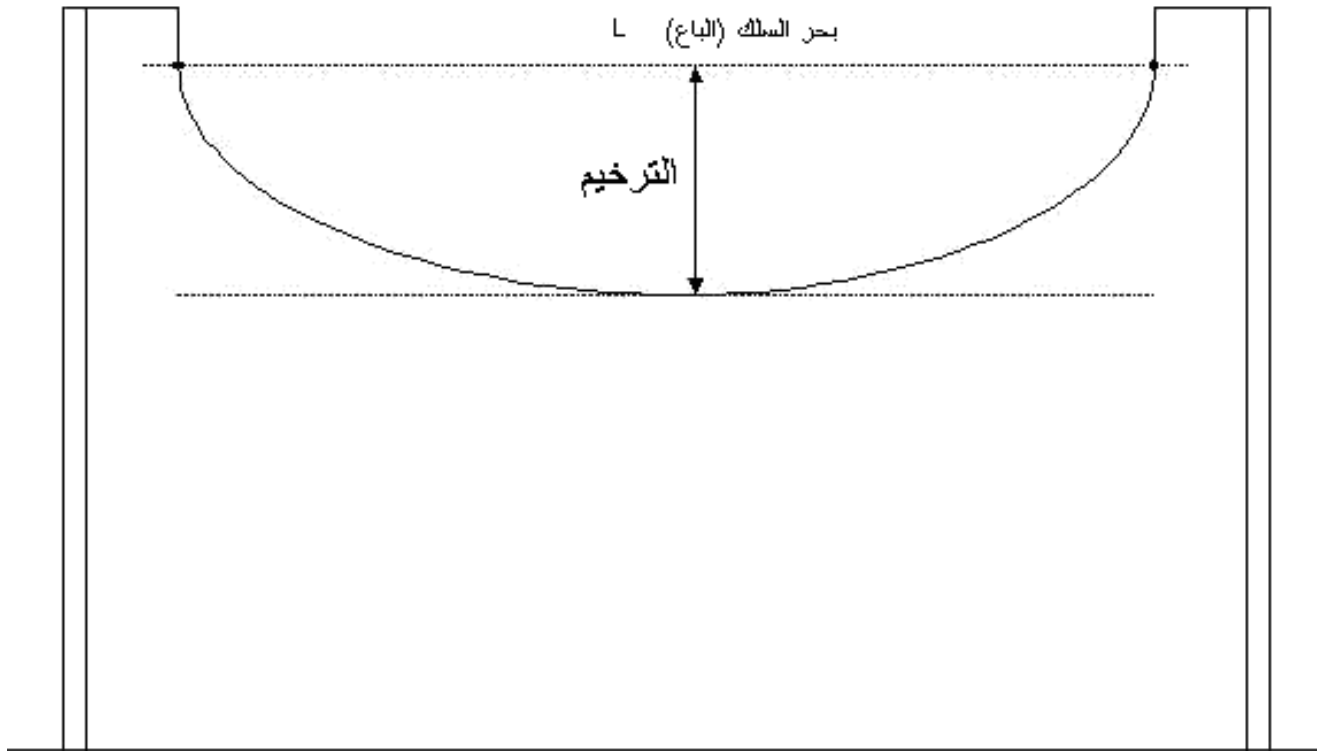
ويشبه إلى حد كبير برج الشد إلا أنه يستخدم عند حدوث تغير في اتجاه خط النقل ويكون طرفا السلك المربوطان به ليسا على استقامة واحدة مما يجعله معرضا لقوة شد تساوي محصلة الشد في الموصلين المربوطين فيه .

د. برج النهاية End tower

وهذا النوع من الأبراج يوجد في بداية الخط وفي نهايته ويكون معرضا للشد من ناحية واحدة ويلزم أخذ هذا الشد في الاعتبار عند تصميم و تثبيت البرج.

١ - ٢ - ٤ : حسابات الترخيم في خطوط النقل الكهربائي :

في خطوط النقل الكهربائي تكون الموصلات معلقة على الأبراج عن طريق عوازل تعزلها عن جسم البرج، وفي المسافة بين برجين متتاليين والتي تعرف بالباع أو خطوة البرج أو بحر السلك يكون السلك معلقاً تحت تأثير ثقله - و ثقل ما قد يتراكم عليه من ثلوج وتأثير ضغط الرياح إن وجدت - ويتخذ الموصل شكل منحنى تعليق السلاسل (Catenary's curve)، كما هو موضح بشكل (١ - ٢٤) والترخيم عند أية نقطة هو مقدار انخفاض هذه النقطة عن مستوى نقطة التعليق. وفي حالة كون نقطتي التعليق على نفس المستوى يحدث أقصى ترخيم في منتصف المسافة بين البرجين. ونظراً لاهتمامنا بالترخيم الأقصى فقط حيث إنه هو الذي يحدد مقدار الخلوص بين الموصل والأرض فإنه عند إطلاق كلمة الترخيم فإننا نقصد بها الترخيم الأقصى وهو مقدار الانخفاض الحادث للسلك عند أقرب نقاطه من سطح الأرض.



شكل (١ - ٢٤) - الترخيم في خط النقل الكهربائي

١- ٢- ٤- ١ : العوامل التي تؤثر في الترخيم :

يتأثر مقدار الترخيم بعدة عوامل نوجزها فيما يلي:

١. وزن السلك (W_c) وعادة ما يستخدم وزن السلك لكل وحدة طول كمقياس لوزن السلك، وكلما زاد وزن السلك زاد الترخيم
 ٢. المسافة بين البرجين (الباع L) وكلما زادت المسافة بين البرجين زاد الترخيم
 ٣. الشد في السلك (T) وهو من العوامل التي تؤثر تأثيرا كبيرا في مقدار الترخيم وكلما زاد الشد في السلك قل الترخيم
 ٤. العوامل البيئية كتراكم الثلوج على الأسلاك وضغط الرياح وسوف ندرس تأثير هذين العاملين بالتفصيل
 ٥. درجة الحرارة: كلما زادت درجة الحرارة تمدد السلك وزاد طوله وزاد الترخيم و يحدث العكس عند انخفاض درجة الحرارة
- وحسابات الترخيم في خطوط النقل الكهربائي لها أهمية كبرى حيث إنه من خلال هذه الحسابات يمكن تحديد مقدار الخلوص بين السلك والأرض والتأكد مما إذا كان مطابقا لشروط الأمن والسلامة، وأيضا لأن الترخيم يؤثر في مقدار الشد الذي يتعرض له السلك فإنه يجب ضبط الخلوص عند تركيب الموصلات بحيث لا يتعدى الشد في الموصل القيمة المسموح بها حتى عند تعرض الأسلاك إلى أسوأ حالات التحميل الميكانيكي الممكنة.

١- ٢- ٤- ٢ : حساب الترخيم بين برجين متماثلين :

عندما يكون البرجان متماثلين تكون نقاط تعليق الموصل على نفس الارتفاع وفي هذه الحالة يحدث أقصى ترخيم في منتصف المسافة بين نقطتي التعليق. وكما ذكرنا سابقا فإن السلك يأخذ شكل منحنى تعليق السلاسل، وهذا المنحنى يمكن تقريبه دون التأثير بدرجة كبيرة في دقة الحسابات بمنحنى تربيعي، وإذا اعتبرنا أكثر النقاط انخفاضا هي نقطة الأصل فإن:

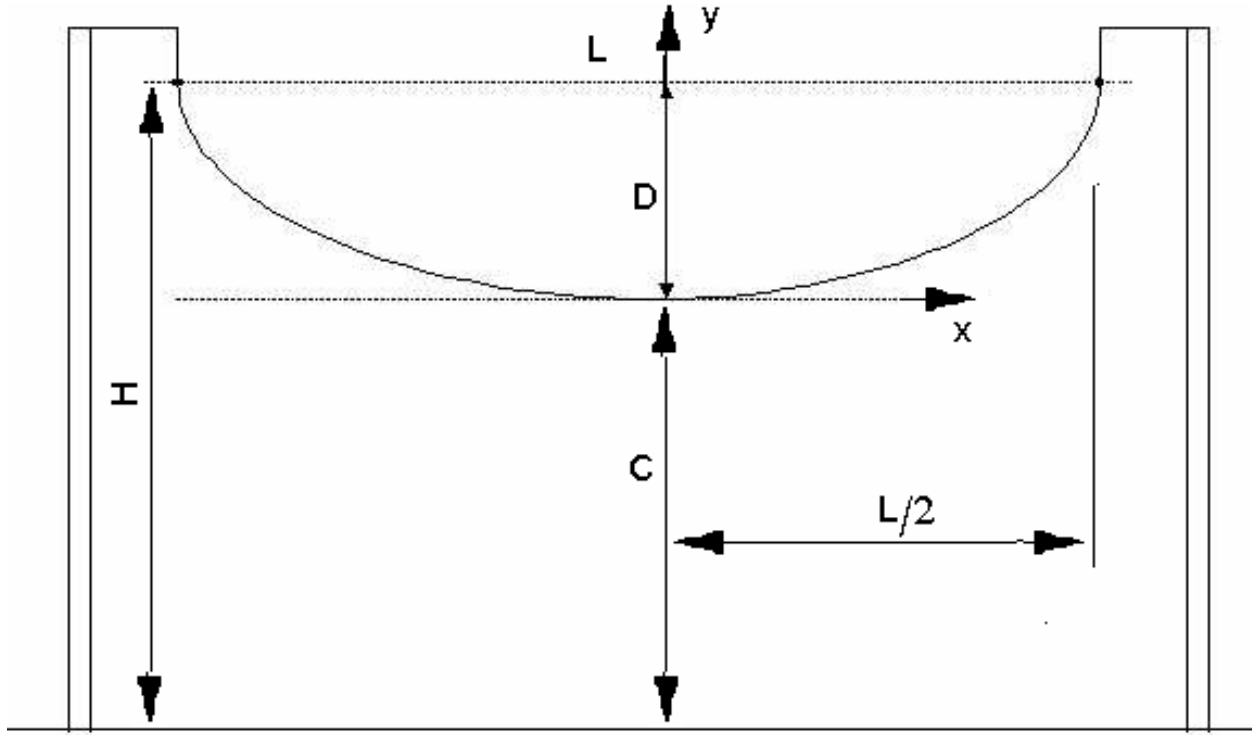
$$y = \frac{w_c x^2}{2T} \quad (1.91)$$

حيث w_c هو وزن الموصل لكل متر طولي مقدرا بالكيلوجرام/متر

T الشد في الموصل مقدرا بالكيلوجرام

x, y إحداثيات أية نقطة على الموصل بالنسبة لنقطة الأصل وكل منهما مقدر بالمتري

ومن شكل (١ - ٢٥) نجد أن أقصى ترخيم (D) هو قيمة (y) عندما تكون $x = L/2$ حيث L هي الباع وبالتعويض في معادلة المنحنى نجد أن:



شكل (١ - ٢٥) - الترخيم بين برجين متماثلين في خط النقل الكهربائي

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} \quad (1.92)$$

والخلوص بين الموصل والأرض في هذه الحالة:

$$C = H - D \quad (1.93)$$

حيث H هو ارتفاع نقطة التعليق عن سطح الأرض.

مثال ١ - ٣ : لخط نقل كهربائي كانت المسافة بين البرجين هي 160 m ، ووزن الموصل 0.75 kg/m والشد في الموصل 600kg ، فإذا كانت نقطتا التثبيت على نفس الارتفاع H=20 m احسب الخلوص بين الموصل والأرض.

الحل

الخلوص = ارتفاع نقطة التثبيت - الترخيم

$$C = H - D$$

وحيث أن نقطتي التثبيت على نفس الارتفاع فإن:

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} = \frac{0.75 \times (160)^2}{8 \times 600} = 4 \text{ m.}$$

ويكون الخلوص

$$C = 20 - 4 = 16 \text{ m}$$

مثال ١ - ٤ : احسب مقدار الترخيم لخط نقل كهربائي مثبت بين برجين متماثلين المسافة بينهما 275 متر إذا كان وزن الموصل 0.85 كجم/متر وأقصى شد يتحملة الموصل هو 8000 كجم ومعامل الأمان المطلوب هو 2.

الحل

نحسب الشد المسموح به في الموصل :

$$\frac{\text{أقصى شد}}{\text{معامل الأمان}} = \text{الشد المسموح}$$

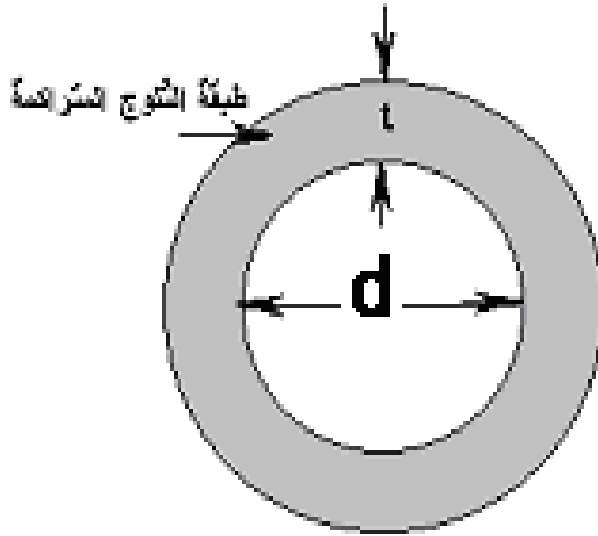
$$T = \frac{8000}{2} = 4000 \text{ kg}$$

نحسب الترخيم حيث $w_c = 0.85 \text{ kg/m}$, $L = 275 \text{ m}$, $T = 4000 \text{ kg}$

$$D = \frac{w_c L^2}{8T} = \frac{0.85 \times (275)^2}{8 \times 4000} = 2 \text{ m}$$

١ - ٢ - ٣ : تأثير الثلوج على الترخيم :

عند تراكم طبقة من الثلوج سمكها (t) على سطح الموصل كما في شكل (١ - ٢٦) فإنها تضيف وزنا إضافيا يؤثر إلى أسفل ويضاف إلى وزن الموصل ، وهذا الوزن هو عبارة عن وزن الثلج المتراكم. ولحساب هذا الوزن نحسب أولاً حجم طبقة الثلج المتراكم لوحدة الأطوال.



شكل (١ - ٢٦) - الترخيم بين برجين متماثلين في خط النقل الكهربائي

حجم الثلج المتراكمة/متر V_i :

$$V_i = \frac{\pi}{4}((d+2t)^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(2d+2t).2t$$

$$V_i = \pi(d+t).t$$

حيث d هو قطر الموصل.

ويكون وزن الثلج المتراكمة W_i مساويا لهذا الحجم مضروباً في كثافة الثلج ρ :

$$W_i = \pi \cdot \rho \cdot (d+t) \cdot t \quad (1.94)$$

وحيث إن وزن الثلج يؤثر رأسياً إلى أسفل في نفس الاتجاه مع وزن الموصل فستتم إضافته مباشرة إلى وزن الموصل ويصبح الوزن الفعلي مساوياً لوزن الموصل مضافاً إليه وزن الثلج ويستخدم هذا الوزن الفعلي في حساب الترخيم بدلاً من وزن الموصل فقط ، أي إن :

$$W_e = W_c + W_i \quad (1.95)$$

مثال ١ - ٥: احسب مقدار الترخيم لخط نقل كهربائي مثبت بين برجين متماثلين المسافة بينهما 180 متراً إذا كان وزن الموصل 0.624 كجم/متر والشدة في الموصل هو 1220 كجم إذا كان سمك طبقة الثلج المتراكمة على الموصل هو 0.3 سم ووزن الثلج هو 910 كجم/م^٣، وقطر الموصل 0.94 سم.

الحل

نحسب وزن الثلج المتراكمة على الموصل (w_i)

$$\begin{aligned} w_i &= \pi \cdot \rho \cdot (d + t) \cdot t \\ &= \pi * 910 * (0.94 + 0.3) * 10^{-2} * 0.3 * 10^{-2} \\ w_i &= 0.106 \text{ kg / m} \end{aligned}$$

ويكون الوزن الفعال للموصل

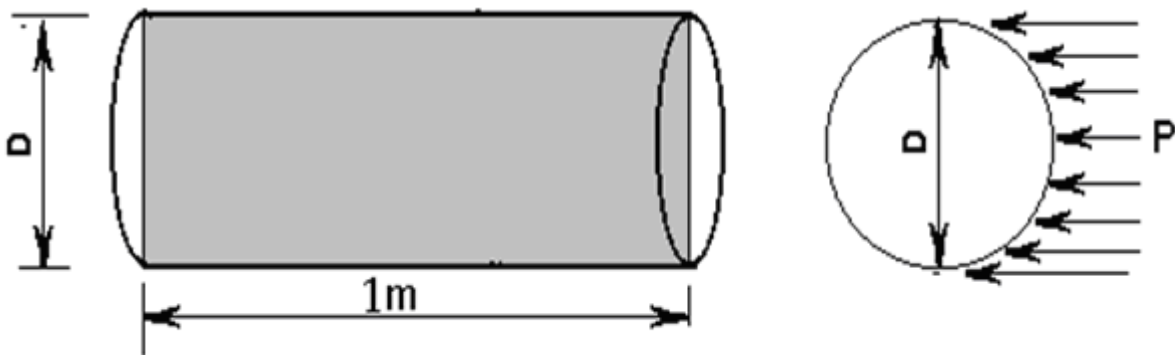
$$w_e = w_c + w_i = 0.624 + 0.106 = 0.73 \text{ kg/m.}$$

ويكون الترخيم :

$$D = \frac{w_e L^2}{8T} = \frac{0.73 * (180)^2}{8 * 1220} = 2.42 \text{ m}$$

١ - ٢ - ٤ - ٤ : تأثير الرياح على الترخيم :

عند تعرض الموصلات لضغط رياح مقداره $P \text{ kg/m}^2$ فإنه يتعرض لقوة تؤثر عليه أفقياً مقدارها يساوي حاصل ضرب ضغط الرياح في المساحة المسقطية للموصل. المساحة المسقطية للموصل لكل متر طولي (A_p) - المساحة المظللة في شكل (١ - ٢٧) تساوي عددياً قطر الموصل.



شكل (١ - ٢٧) - المساحة المسقطية للموصل والمعرضة لتأثير الرياح

$$A_p = d \cdot 1 \text{ m}^2$$

أي إن:

والقوة المؤثرة على الموصل نتيجة ضغط الرياح هي :

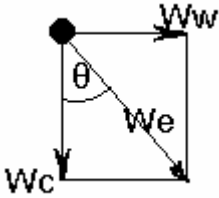
$$w_w = A_p \cdot P = d \cdot P \quad \text{kg / m}$$

وهذه القوة تؤثر أفقيا فيكون الوزن المحصل للموصل في هذه الحالة :

$$w_e = \sqrt{w_c^2 + w_w^2} \quad (1.96)$$

ويستخدم هذا الوزن المحصل في حساب الترخيم D_e :

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T} \quad (1.97)$$



والترخيم في هذه الحالة لا يكون رأسيا وإنما يميل بزاوية θ على الرأسي ، حيث :

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{w_w}{w_c}\right) \quad (1.98)$$

ويكون الترخيم الرأسى D والالتواء الأفقى للموصل D_h هما مركبتا D_e في الاتجاهين الرأسى والأفقى على الترتيب أي إن :

$$D = D_e \cos(\theta) \quad , \quad D_h = D_e \sin(\theta) \quad (1.99)$$

وفي حالة تعرض الخط لضغط الرياح بالإضافة إلى تراكم الثلج عليه فإن :

$$w_e = \sqrt{(w_c + w_i)^2 + w_w^2} \quad (1.100)$$

حيث w_c هو وزن الموصل/متر

w_i هو وزن الثلج المتراكمة/متر

w_w قوة ضغط الرياح/متر

مع الأخذ في الاعتبار سمك طبقة الثلج عند حساب المساحة المسقطة أي إن :

$$w_w = (d + 2t) \cdot p \quad \text{kg / m}$$

ويتم حساب الترخيم بنفس الطريقة أي إن :

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T}$$

وعلى ذلك يكون الترخيم الرأسى والالتواء الأفقى كالتالى :

$$D = D_e \cos(\theta) \quad , \quad D_h = D_e \sin(\theta)$$

إلا أن زاوية الميل على الرأسى تختلف قليلا في هذه الحالة :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{w_w}{w_c + w_i} \right)$$

مثال ١- ٦ : خط نقل هوائي له البيانات الآتية:

المسافة بين البرجين	160 m
قطر الموصل	0.95 cm
وزن الموصل	0.65 kg/m
الشدة في الموصل	602.5 kg

احسب الترخيم الرأسي والالتواء الأفقي إذا كان الخط معرضا لضغط رياح مقداره 40 kg/m^2

الحل

قوة ضغط الرياح لكل متر من طول الموصل :

$$w_w = d * 1 * p = 0.95 * 10^{-2} * 1 * 40 = 0.38 \text{ kg/m}$$

ويكون الوزن المحصل للموصل :

$$w_e = \sqrt{w_c^2 + w_w^2} = \sqrt{(0.65)^2 + (0.38)^2} = 0.7529 \text{ kg/m}$$

وبالتالي نحسب الترخيم D_e وزاوية ميل الموصل على الرأسي θ :

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T} = \frac{0.7529 \times (160)^2}{8 \times 602.5} = 4 \text{ m.}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{w_w}{w_c} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.38}{0.65} \right) = 30.31^\circ$$

نحسب الترخيم الرأسي:

$$D = D_e \cos(\theta) = 4 \times \cos(30.31) = 3.45 \text{ m.}$$

ويكون الالتواء الأفقي:

$$D_h = D_e \sin(\theta) = 4 \times \sin(30.31) = 2.02 \text{ m.}$$

مثال ١- ٧ : خط نقل هوائي له البيانات الآتية:

المسافة بين البرجين	275 m
قطر الموصل	19.5 mm
وزن الموصل	0.85 kg/m
الشدة في الموصل	4000 kg

احسب الترخيم الرأسي والالتواء الأفقي إذا كان الخط معرضا لضغط رياح مقداره 39 kg/m^2 وكان سمك طبقة الثلج المتراكمة على الموصل 13 mm ، كثافة الثلج 910 kg/m .

الحل

القطر الخارجي للموصل d_o في وجود طبقة الثلج :

$$d_o = d + 2t = 19.5 + 2 * 13 = 45.5 \text{ mm}$$

المساحة المسقطة لكل ١ متر من طول الموصل :

$$A_p = d_o * 1 = 45.5 * 10^{-3} * 1 = 0.0455 \text{ m}^2$$

قوة ضغط الرياح لكل 1 متر :

$$w_w = A_p * P = 0.0455 * 39 = 1.77 \text{ kg/m}$$

وزن الثلج لكل متر :

$$w_i = \pi \cdot \rho \cdot (d + t) \cdot t = \pi * 910 * (19.5 + 13) * 13 * 10^{-6} \\ = 1.207 \text{ kg/m}$$

الوزن المحصل للموصل :

$$w_e = \sqrt{(w_c + w_i)^2 + w_w^2} = \sqrt{(0.85 + 1.207)^2 + (1.77)^2} \\ = 2.714 \text{ kg/m}$$

وعلى ذلك يكون الترخيم كالتالي :

$$D_e = \frac{w_e L^2}{8T} = \frac{2.714 * (275)^2}{8 * 4000} = 6.4 \text{ m.}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{w_w}{w_c + w_i} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1.77}{0.85 + 1.207} \right) = 40.71^\circ$$

نحسب الترخيم الرأسي:

$$D = D_e \cos(\theta) = 6.4 * \cos(40.71) = 4.85 \text{ m.}$$

والالتواء الأفقي:

$$D_h = D_e \sin(\theta) = 6.4 * \sin(40.71) = 4.17 \text{ m.}$$

وفي أحيان كثيرة تكون نقاط تعليق الموصل ليست على نفس مستوى الارتفاع لاختلاف ارتفاع البرجين كما يحدث عند عبور خط النقل لمجرى مائي أو عند الاضطرار إلى أن تكون المسافة بين برجين أكبر بكثير من الباع المتوسط فيلزم زيادة ارتفاع البرجين اللذين يثبتان الموصل خلال هذه المسافة الكبيرة عن ارتفاع الأبراج العادي، وتحدث هذه الحالة أيضا عند مرور خط النقل في منطقة جبلية أو هضابية حتى وإن كانت الأبراج لها نفس الارتفاع فإن اختلاف منسوب سطح الأرض يتسبب في أن تكون الأبراج ليست على مستوى واحد مما يجعل نقاط تثبيت الموصل على البرجين ليست على نفس المستوى كما لو كانت الأبراج مختلفة الارتفاع.