

الفصل الثاني

محولات القياس

١-٢ أهمية محولات القياس :

إن وصل أجهزة القياس وحاكمات الحماية في منشآت التوتر العالي ذات التيار المتناوب يتم عادة بواسطة محولات توتر ومحولات تيار.

والهدف من هذه المحولات يتلخص في عزل أجهزة القياس والحماية عن دارات التوتر العالي بحيث يتم تحويل القيم الابتدائية العالية للتيار والتوتر إلى قيم أصغر بكثير من القيم الأصلية الملائمة لأجهزة القياس والحماية. وإن معظم المواصفات القياسية العالمية تحدد تصنيع محولات التوتر بتوتر ثانوي اسمي (100) أو (120) فولت ، والتيار الثانوي الاسمي لمحولات التيار بـ (1) أو (5) أمبير .

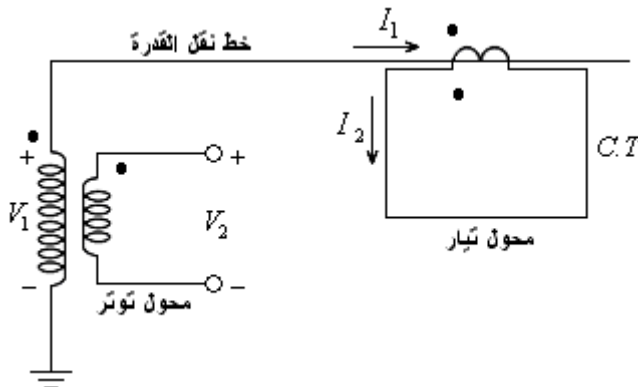
كما تصنع تلك المحولات بنوعية جيدة بحيث تكون :

- بسيطة، اقتصادية، ذات وثوقية عالية.

- ذات عزل كهربائي جيد .

- ذات نسبة تحويل قريبة من المثالية.

ويبين الشكل (١-٢) مخططاً رمزياً لمحول توتر (VT) ، ومحول تيار (CT) .



الشكل (١-٢) يبين مخططاً رمزياً لمحول تيار $C.T$ ، ومحول توتر $V.T$

توصل محولات التوتر إلى الشبكة على التفرع ، ومحولات التيار على التسلسل ، وتكون الشبكة إما أحادية الطور ، أو ثلاثية ، ولمختلف مستويات التوتر . وسنشرح فيما يلي بشكل مفصل كلا المحولين .

٢-٢ محولات التيار (CT) Current Transformers :

يتكون محول التيار من نواة حديدية مصنوعة من رقائق الحديد السيليكوني (لتقليل المفاقيد الحديدية)، ومن ملفين معزولين بعضهما عن بعض ، وعن القلب الحديدي ، وهما :

- ملف ابتدائي **Primary Winding** : ويحتوي على عدد قليل من اللفات ، ويوصل على التوالي مع الكابل أو الخط المراد قياس قيمة التيار المار به، يرمز للتيار المار في هذا الملف بـ I_P أو I_1 ، ولعدد اللفات بـ N_P أو N_1 .

- ملف ثانوي **Secondary Winding** : ويحتوي على عدد كبير من اللفات ، ويرمز للتيار المار في هذا الملف بـ I_S أو I_2 ، ولعدد اللفات بـ N_S أو N_2 ، ويوصل على التوالي مع ملف التيار لجهاز الحماية أو القياس .

- قلب حديدي على شكل مستطيل أو مربع : يستخدم لمحولات التيار الصغيرة والمتوسطة، إذ يتم لف الملف الثانوي أولاً على الساق ، ثم الملف الابتدائي .

- قلب حديدي على شكل حلقة : يستخدم لمحولات التيار المختلفة، وفيه يلف الملف الثانوي بانتظام حول القلب ، أما الملف الابتدائي فهو الخط الحامل للتيار .

- نسبة التحويل **Turns Ratio** : وهي النسبة بين $\frac{I_1}{I_2}$ أو $\frac{I_P}{I_S}$ ، أو النسبة العكسية

لعدد اللفات $\frac{N_2}{N_1}$ أو $\frac{N_S}{N_P}$ ، أي :

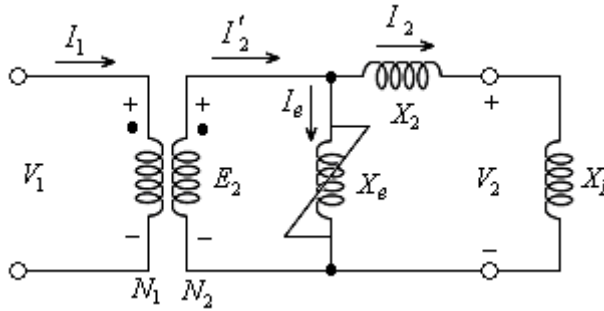
$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} \quad \text{أو} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

إن النوعية الجيدة لـ $C.T$ تكون أكثر موثوقية وأقل مشاكل في التطبيقات ، وبهذه الحالة يكون عمل أجهزة الحماية أكثر دقة، ويجب اختيار محولات تيار عالية الدقة عند استخدامها مع

حاكمات الحماية التفاضلية، إذ يتعلق عمل حاكمات الحماية هذه بشكل مباشر بدقة عمل المحولات ، في حالة العطل أو في ظروف العمل الطبيعية .

١-٢-٢ الدارة المكافئة لمحور التيار :

يكون الوصل المثالي لمحور التيار بربط الدارة الثانوية بشكل مقصور، وفي الحالة الطبيعية بوساطة ممانعة صغيرة جداً لكنها ليست صفراً ، ويبين الشكل (٢-٢) الدارة المكافئة لمحور C.T .



الشكل (٢-٢) يبين الدارة المكافئة لمحور تيار

حيث : X_2 : ممانعة التسرب للمحول منسوبة إلى الثانوي .

X_e : ممانعة التحريض للمحول منسوبة إلى الثانوي وهي ممانعة مشبعة .

X_L : ممانعة النهاية للثانوي وهي (حمل - حاكمة - مقياس).

ومنه نكتب :

$$I_2' = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad (2.2)$$

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (2.3)$$

$$I_2 = I_2' - I_e \quad (2.4)$$

$$E_2 = j I_2 (X_2 + X_L) \quad (2.5)$$

نعوض ونحسب (E_2) فنجد :

$$E_2 = j (X_2 + X_L) \left[\frac{N_1}{N_2} I_1 - I_e \right] \quad (2.6)$$

يعرف خطأ محول التيار CT_{error} بانحراف قيمة I_2 عن قيمة I'_2 ، ويعبر بنسبة مئوية عن قيمة I'_2 ، أي :

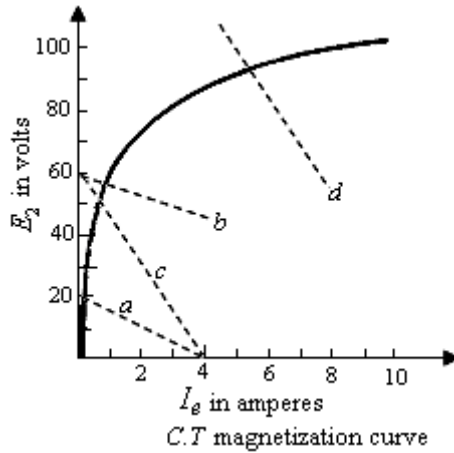
$$E_2 = (X_2 + X_L) \left[\frac{N_1}{N_2} I_1 - I_e \right] \quad (2.7)$$

$$I_2 = I'_2 - I_e$$

$$CT_{error} = \frac{I'_2 - I_2}{I'_2} = \frac{I_e}{I'_2} 100\% \quad (2.8)$$

٢-٢-٢ منحنى التمغنط :

يبين الشكل (٣-٢) منحنى التمغنط لمحول تيار $C.T$.



الشكل (٣-٢) يبين منحنى تمغنط ويبين علاقة التيار مع التوتر في المحول

مثال (١): لتكن نسبة التحويل (500:5) لمحول تيار $X_2 = 0,5$.

احسب قيمة (I_2) و CT_{error} ، أي نسبة الخطأ في الحالات المبينة في الجدول (١-٢).

الجدول (١-٢)

a	$X_L = 4,5 \Omega ; I_1 = 400 A(\text{Load Current})$
b	$X_L = 4,5 \Omega ; I_1 = 1200 A(\text{Fault Current})$
c	$X_L = 13,5 \Omega ; I_1 = 400 A(\text{Load Current})$
d	$X_L = 13,5 \Omega ; I_1 = 400 A(\text{Fault Current})$

الحل : من المعادلة (2.6) حيث عناصر الممانعة التحريضية .

بالاستفادة من منحنى التمغنط ، الشكل (٢-٣)، حيث منحنى التمغنط يتقاطع مع المستقيمات d, c, b, a ، وبالتالي نأخذ قيمة I_e من نقطة التقاطع عند الحالات d, c, b, a .
ومن المعادلات (2.2) وحتى (2.8) نحصل على الآتي :

<i>a</i>	$E_2 = 5(4 - I_e)$ <p style="text-align: center;"><i>line a.</i> $I_e = 0,1$</p> $\therefore I_2 = 3,9 \text{ amperes}$ $CT \text{ error} = \frac{0,1}{4,0} = 2,5\%$
<i>b</i>	$E_2 = 5(12 - I_e)$ <p style="text-align: center;"><i>line b.</i> $I_e = 0,8$</p> $\therefore I_2 = 11,2 \text{ amperes}$ $CT \text{ error} = \frac{0,8}{12} = 6,7\%$
<i>c</i>	$E_2 = 14(4 - I_e)$ <p style="text-align: center;"><i>line c.</i> $I_e = 0,6$</p> $\therefore I_2 = 3,4 \text{ amperes}$ $CT \text{ error} = \frac{0,6}{4,0} = 15\%$
<i>d</i>	$E_2 = 14(12 - I_e)$ <p style="text-align: center;"><i>line d.</i> $I_e = 5,4$</p> $\therefore I_2 = 6,6 \text{ amperes}$ $CT \text{ error} = \frac{5,4}{12} = 45\%$

نستنتج مما سبق أن خطأ محول التيار $C.T$ يتزايد مع تزايد ممانعة الحمل X_L ، أي أن قصر دائرة الطرف الثانوي لا تعني CT_{error} تساوي الصفر، وذلك بسبب ممانعة التمغنط الداخلية لمحول التيار.

مثال (٢): بيّن الحالة التي يمكن أن يكشف محول التيار فيها حالة العطل وذلك عند تيار عطل $1200[kA]$ في الحالتين عند :

$$X_L = 4,5 [\Omega] \quad (I)$$

$$X_L = 13,5 [\Omega] \quad (II)$$

الحل : في الحالة الأولى $X_L = 4,5 [\Omega]$ ، $I_1 = 1200[A]$ مع نسبة تحويل 500/5، ومن منحنى التمغنط والجدول (٢-١)، نجد أن $X_L = 4,5$ ، $I_1 = 1200[A]$ تيار عطل يعبر عنه المستقيم b الذي يتقاطع مع منحنى التمغنط عند تيار $I_e = 0,8$. ومن المعادلة (2.2) نكتب :

$$I'_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 = \frac{5}{500} \cdot 1200 = 12 \quad [A]$$

$$I_2 = I'_2 - I_e = 12 - 0,8 = 11,2 \quad [A]$$

في هذه الحالة تيار الخطأ :

$$CT_{error} = \frac{0,8}{12} \cdot 100 \% = 6,66 \%$$

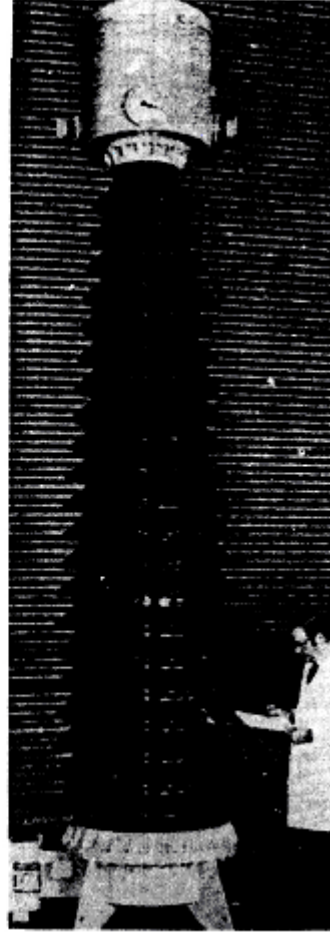
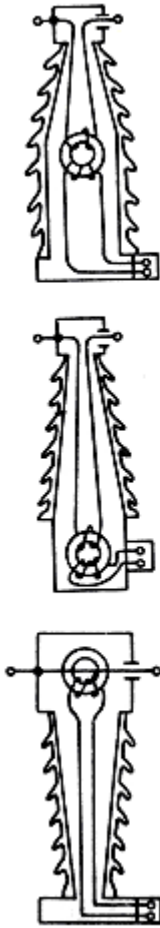
وبالتالي يمكن تحسس تيار العطل .

في الحالة الثانية عند $X_L = 13,5 [\Omega]$ ، $I_1 = 1200[A]$ ، يكون $I_2 = 6,6 [A]$ ، والخطأ $CT_{error} = 45$ ، في هذه الحالة لا يمكن كشف تيار العطل مع نسبة خطأ 45% .

تصنع محولات التيار النموذجية ضمن نسب تحويل حسب الجدول (٢-٢) بحيث يكون دائماً تيار الثانوي معادلاً إلى $5 [A]$.

الجدول (٢-٢)

CURRENT RATIO	URNS RATIO
50 : 5	1 : 10
100 : 5	1 : 20
200 : 5	1 : 40
400 : 5	1 : 800
600 : 5	1 : 120
800 : 5	1 : 160
1200 : 5	1 : 240



الشكل (٢-٥) يبين محول تيار نموذجاً صناعياً

لمحول تيار على توتر $240[kV]$

الشكل (٢-٤) يبين محول تيار نموذجاً صناعياً

يعمل على تحويل التيار عند خط توتر $240[kV]$

يبين الشكل (٢-٥) ثلاث حالات لتوضع محول التيار في قلب حامل البورسلان ، ونلاحظ ثلاث حالات مختلفة لمكان وجود المحول في قلب حامل البورسلان ، وأيضاً المخطط الرمزي للتوصيل ، علماً أن المواد العازلة في الحامل إما من الزيت الذي يتحمل درجات حرارة عالية، وإما من غاز SF_6 .

٣-٢-٢ حمولة المحول Burden :

الحمل لمحولات التيار هو القيمة المكافئة لمقاومة أجهزة الحماية أو القياس الموصلة إلى الملف الثانوي لمحول التيار مقدره بوحدات أوم أو فولت أمبير . وتكون عادة القيم القياسية

لحمل محولات التيار المستخدمة في الحماية وأجهزة القياس هي :

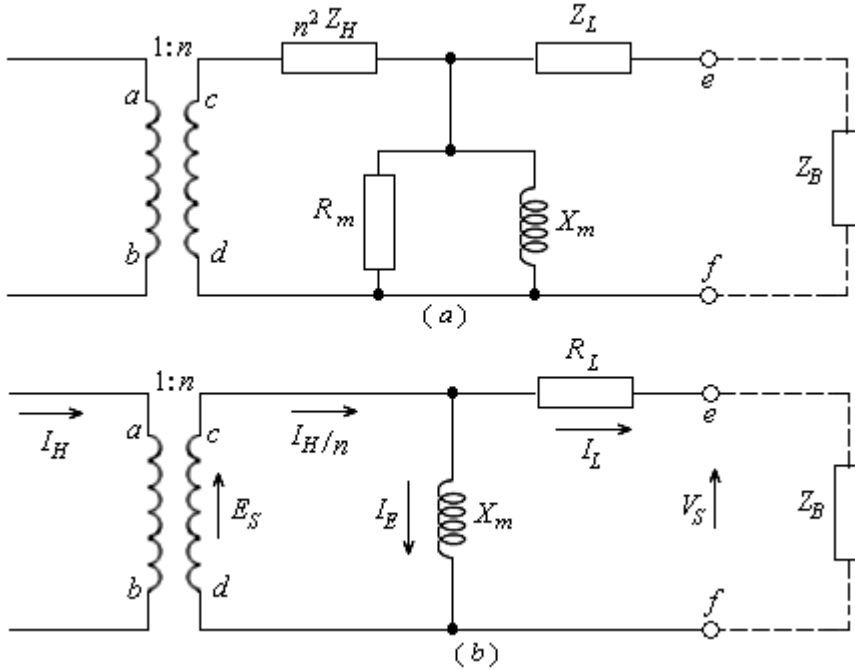
$$(2,5 - 5 - 7,5 - 10 - 15 - 25 - 30 - 50 - 100 - 200) VA$$

٢-٢-٤ اختيار محولات التيار :

محولات التيار جميعها يتم اختيارها وفقاً للتيار الاسمي ولتوتر المنشأة ، وتختبر وفقاً للاستقرار الحراري والديناميكي في أثناء القصر . وعند اختيار $C.T$ من المهم التأكد أيضاً من أن مستوى الخطأ وظروف الحمل العادية لا تسبب إشباعاً في النواة ، والأخطاء لا تتجاوز الحدود المقبولة. هذه العوامل تحدها :

- المعادلات أو القوانين .
- منحنيات المغنطة .
- تصنيفات الدقة .

الطريقتان الأولى والثانية تقدمان حقائق دقيقة لاختيار $C.T$ ، والثالثة تقدم فقط تقدير الجودة . التوتر الثانوي E_S من الشكل (٢-٦) يحدد لأجل الطرق الثلاث أعلاه .



الشكل (٢-٦) -a الدارة المكافئة لمحول تيار ، -b دارة مكافئة مع إهمال R من الفرع

آ- المعادلات :

إذا كانت X_m أو (X_e) ذات ممانعة عالية، فيمكن حذفها من الدارة المكافئة مع البقاء على خطأ صغير، الشكل (٢-٦ b). ليكن $E_S = V_S$ ، عندها باستخدام المعادلات :

$$V_S = I_L (Z_L + Z_C + Z_B) \quad (2.9)$$

حيث V_S : التوتر المنتج في ملفات الدارة الثانوية .

I_L : التيار الأعظمي في الدارة الثانوية ويقدر بالأمبير، ويمكن تحديده بتقسيم

تيار العطل الأعظمي في النظام على نسبة تحويل المحولة المعنية .

Z_B : الممانعة الخارجية المتصلة ممانعة الحمل (حاكمات الحماية -

مقياس .. إلخ).

Z_L : ممانعة ملفات الثانوي .

Z_C : ممانعة أسلاك التوصيل .

- المعادلة العامة للمحولة :

$$V_S = 4,44 FAN B_m \cdot 10^{-8} \quad [V] \quad (2.10)$$

حيث F : التردد ؛ $[Hz]$.

A : مساحة المقطع العرضي للنواة ؛ $[in]$ ، ويمكن ن تكون الواحدة $[cm]$.

N : عدد اللفات .

B : كثافة الفيض ؛ $[lines/in^2]$. (ويمكن استخدام وحدات أخرى).

مثال (٣): بفرض نسبة التحويل 2000/5 ، ونواة فولاذية مع نفاذية عالية، ومساحة المقطع

العرضي $[3,25[in^2]$ ، ولفات الدارة الثانوية ذات مقاومة $[0,13[\Omega]$ ، وممانعة وشيعة

الحاكمة مع أسلاك التوصيل $[2[\Omega]$.

المطلوب : حدد فيما إذا $C.T$ ستصبح في حالة إشباع عند تيار عطل مقداره $[35[kA]$

وتردد قدره $[50[Hz]$.

الحل : إذا كانت المحولة غير مشبعة فالتيار الثانوي يكون :

$$I_L = 35.10^3 .5 / 200 = 87,5 \quad [A]$$

حيث :

I_L : التيار الثانوي الأعظمي ويقدر بالأمبير، ويحسب بتقسيم تيار العطل الأعظمي (تيار القصر) في النظام على نسبة تحويل المحولة المختارة .

نأخذ الدارة المكافئة من الشكل (٢-٦)، ومنه نحسب عدد اللفات N من نسبة التحويل

$$N = 2000/5 = 400 \quad [Turns] \quad \text{فتكون :}$$

نحسب التوتر المنتج في ملفات الثانوي بإهمال الفرع X_m واعتبار $E_S = V_S$ فيكون:

$$V_S = I_L (Z_L + Z_C + Z_B)$$

وحيث إن $Z_C + Z_B = 2[\Omega]$ ، يكون :

$$V_S = 87,5(0,31+2) = 202,1 \quad [V]$$

باستخدام المعادلة (2.10) نجد أن :

$$B_{max} = \frac{202,1 \times 10^8}{4,44 \times 50 \times 3,25 \times 400} = 70030 \quad [lines/in^2]$$

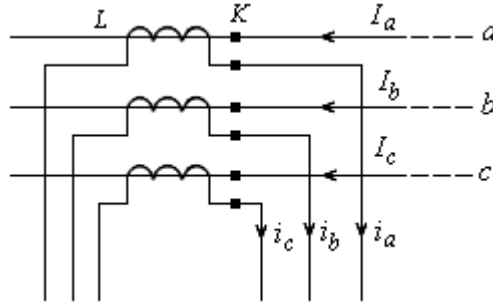
وبما أن المحولة في هذا المثال لديها نواة فولاذية مع نفاذية عالية، هذه القيمة المنخفضة نسبياً من كثافة الفيض لا تسبب إشباعاً .

الشكل (٢-١٤)

٢-٥ طرق توصيل محولات التيار والتوتر:

٢-٥-١ طرق توصيل محولات التيار:

تركب محولات التيار على نظام ثلاثي الطور بحيث يتم تركيب محول تيار لكل طور .
يبين الشكل (٢-١٥) خطأً ثلاثي الطور رُكِّبَ عليه ثلاث محولات تيار حيث الخطوط التي تمر بها التيارات I_a, I_b, I_c تمثل الملفات الابتدائية، وكل من هذه الخطوط يحتوي على ملف ثانوي $(K-L)$.



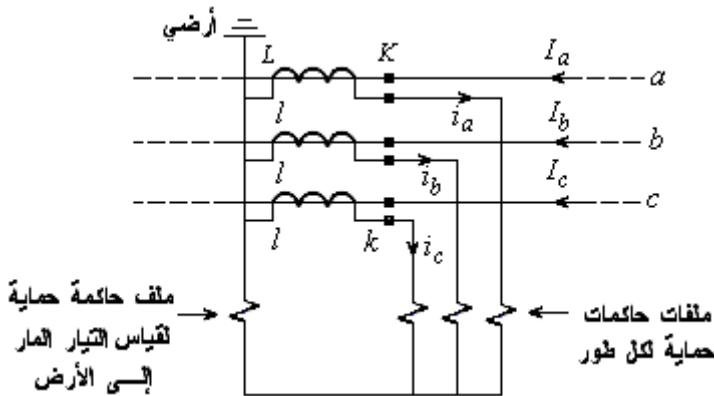
الشكل (٢-١٥) خط ثلاثي الطور مع ثلاث محولات تيار

يتم توصيل محولات التيار الثلاثية معاً بطريقتين :

أ- توصيلة نجمة Y Connection :

تستخدم هذه الطريقة في الحالات الآتية :

- قياس التيارات المارة بالأطوار الثلاثة باستخدام مقياس أمبير.
 - تركيب أجهزة حماية ذات حساسية للتيارات المارة في الأطوار الثلاثة، بحيث يتم توصيل ملف تيار خاص بجهاز الحماية لكل طور.
 - تركيب جهاز حماية ذي حساسية الجمع الاتجاهي للتيارات المارة بالأطوار الثلاثة، بمعنى آخر جهاز حماية ذي حساسية ضد التيار المار في نقطة التعادل أو الأرضي .
- ويبين الشكل (٢-١٦) توصيلة محول تيار ثلاثي الطور بشكل نجمي .



الشكل (١٦-١) محول ثلاثي الطور توصيلة Y

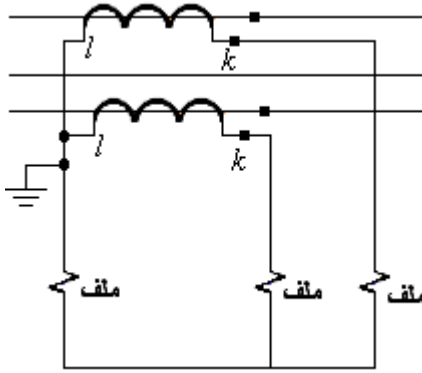
حيث :

- . I_a, I_b, I_c : التيارات الابتدائية المارة في الأطوار a, b, c .
- . i_a, i_b, i_c : التيارات الثانوية للمحول المارة في ملفات حاكمت الحماية.
- . $\bar{i}_a + \bar{i}_b + \bar{i}_c$: المجموع الجبري للتيارات المارة في ملف حاكمة الحماية الأرضية.

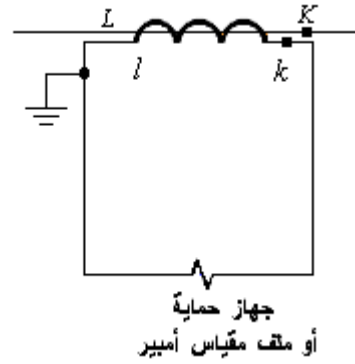
ب- توصيلة دلتا Δ Connection :

تستخدم هذه الطريقة في الحالات الآتية :

- قياس فرق التيارين المارين في طورين مختلفين ، مثلاً: $(I_a - I_b)$.
- تركيب جهاز حماية للكشف عن فرق التيارين المارين في طورين مختلفين .
- ويبين الشكل (٢-١٧) توصيلتين لمحول ثلاثي على شكل دلتا.

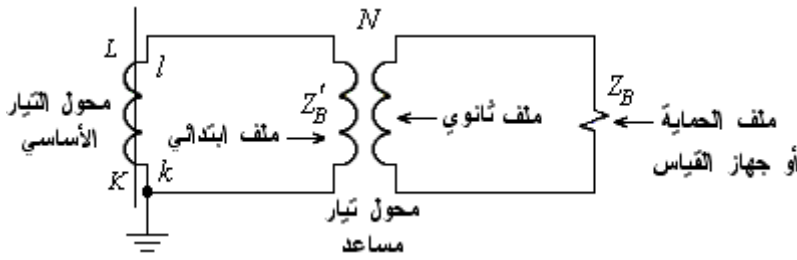


الشكل (٢-١٩)



الشكل (٢-١٨)

ويبين الشكل (٢-٢٠) محول تيار مركب على طور واحد مع توصيل جهاز الحماية على الملف الثانوي من خلال محول مساعد *Auxiliary C.T* .

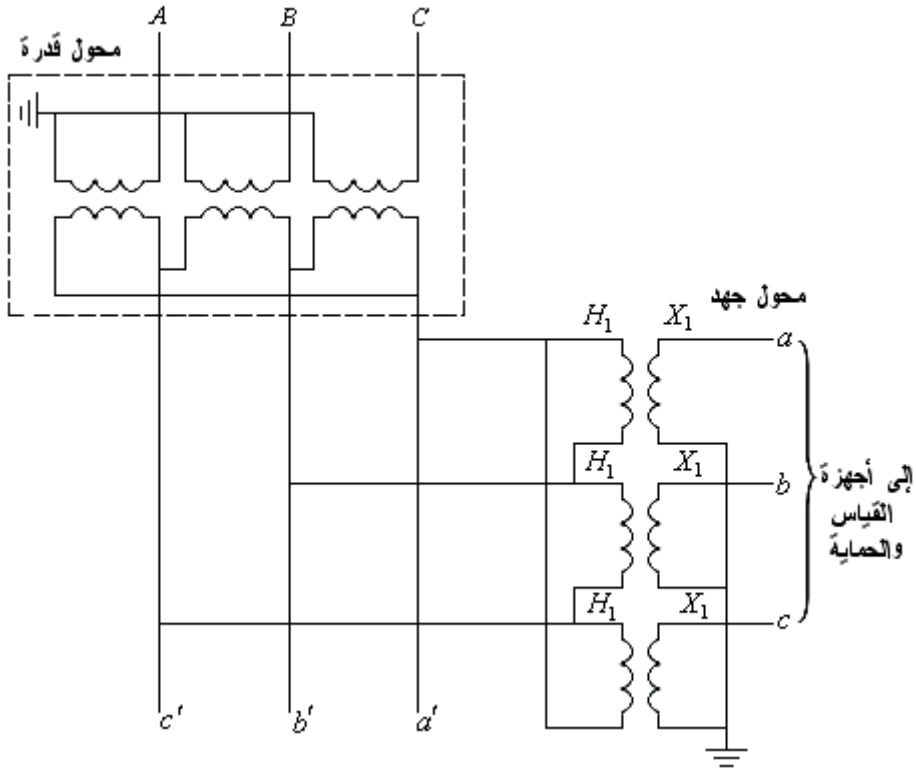


الشكل (٢-٢٠)

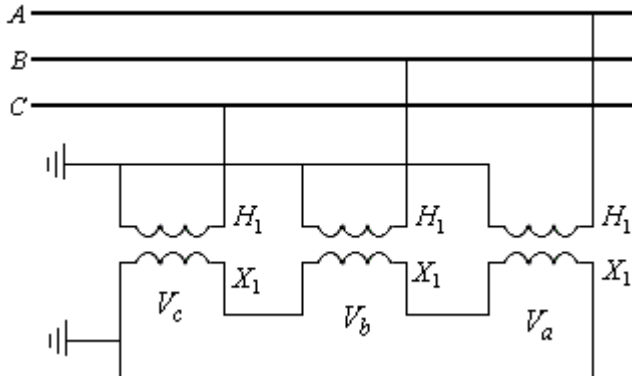
يعمل المحول المساعد على تعديل نسبة التحويل إلى القيمة المناسبة، ويتمتع هذا المحول بخصائص محول التيار جميعها لكنه يركب على خلية جهاز الحماية أو القياس وذلك بعيداً عن معدات التوتر العالي ، ويمكن استخدام المحولات المساعدة كدائرة عزل أو لتغيير زوايا التيارات . وهناك محولات تيار ثلاثية الطور مع نظام محولات تيار ثلاثية مساعدة تتركب عليها أجهزة حماية ثلاثية وحماية من التيارات الأرضية، وهناك أشكال أخرى لتوصيل محولات التيار لا مجال لشرحها في هذا الكتاب .

٢-٥-٢ طرق توصيل محولات التوتر:

يبين الشكل (٢-٢١) محول قدرة Δ / Y_2 تم توصيل محول توتر على دارته الثانوية لتغذية أجهزة الحماية والقياس .



الشكل (٢٢-٢)



الشكل (٢٣-٢)

يبين الشكل (٢٤-٢) نوعاً آخر لتوصيلة محولات الجهد لتغذية أجهزة الحماية والقياس كما تستخدم في هذا النوع محولة توتر مساعدة موصولة على شكل نجمة مؤرضة في دارتها الابتدائية ، ودلتا مفتوحة في دارتها الثانوية للحصول على الجهد $V_{nm} = V_a + V_b + V_c$.

