وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

الجامعة التقنية الشمالية

المعهد التقني / الموصل

قسم التقنيات الكهربائية

مكائن التيار المتناوب

الفصل الثاني - الجزء النظري

للمرحلة الثانية بفرعي القوى والشبكات الكهربائية

إعداد مدرسي المادة

أ.م.د. أحمد عطية علو

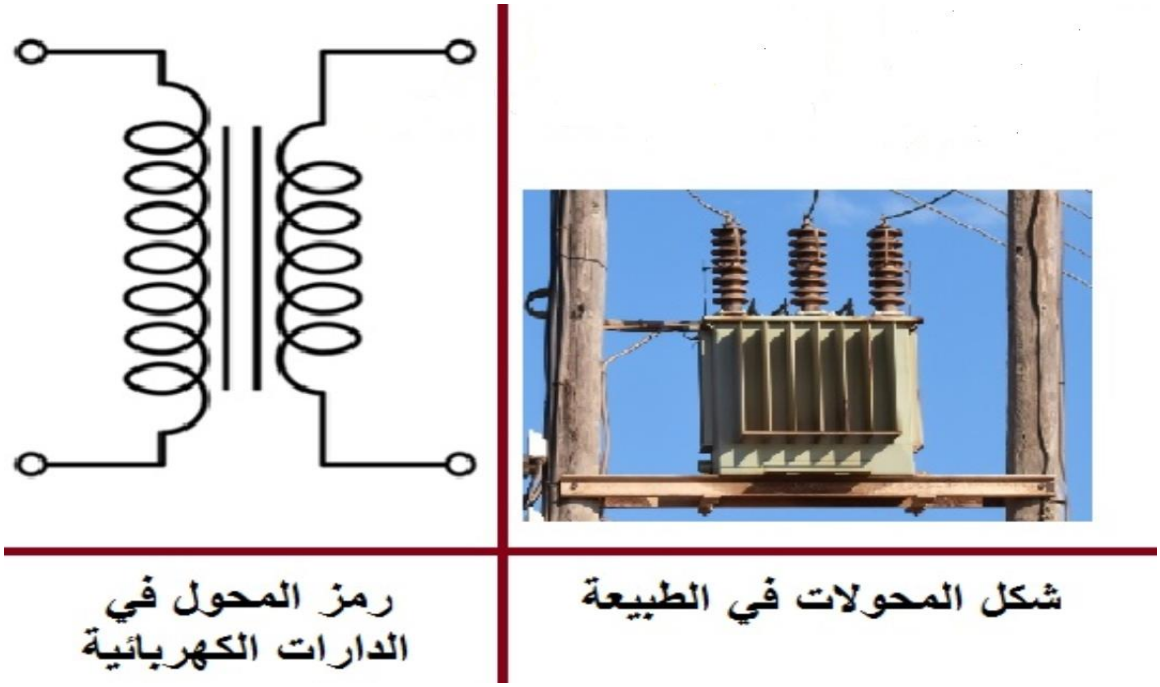
م.م صفاء عبد الجبار يوسف

2023-2022 م

المحولات الكهربائية

يعرف المحول بأنه ماكنة استاتيكية ليس فيها اجزاء دوارة تحول الطاقة الكهربائية من دائرة الى اخرى بنفس التردد مع خفض او رفع الفولتية و حدوث مفقودات قليلة تتبدد بشكل طاقة حرارية. لها استخدامات كثيرة منها:

1) في الاجهزة الكهربائية بشكل عام والانواع الخاصة منها تستخدم في ماكنات اللحام
2) تستخدم بكثرة في نظام نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية
3) تستخدم في دوائر القياس والسيطرة والوقاية

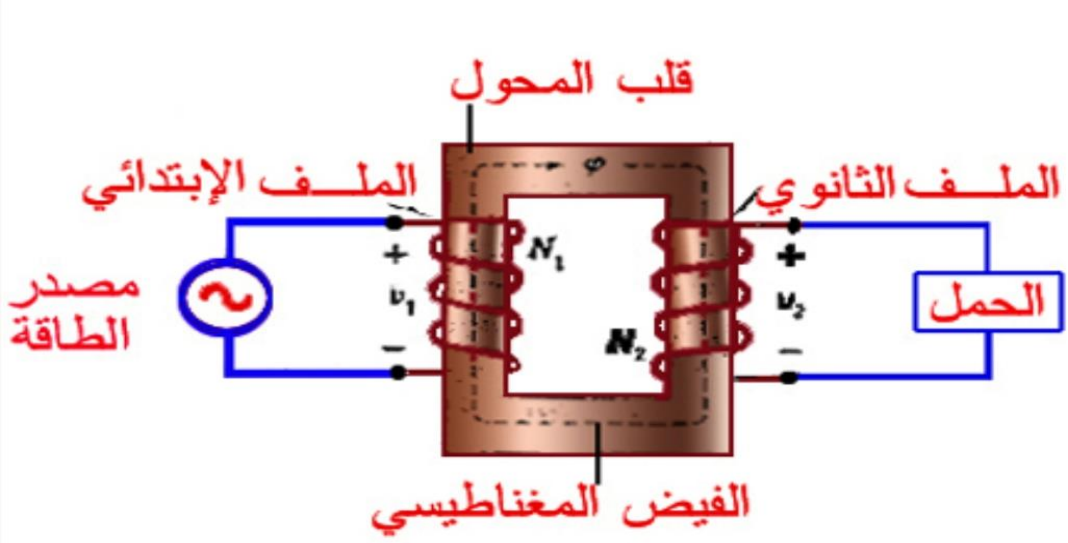


الشكل (1.1)

1/ تركيب المحولة:

تتركب المحولة من عنصرين اساسيين كماموضح في الشكل (2.1) وهما:

1. القلب الحديدي (اللب الحديدي (Iron Core)) وهو يمثل الدائرة المغناطيسية
2. الملفات (Winding) وهي تمثل الدائرة الكهربائية

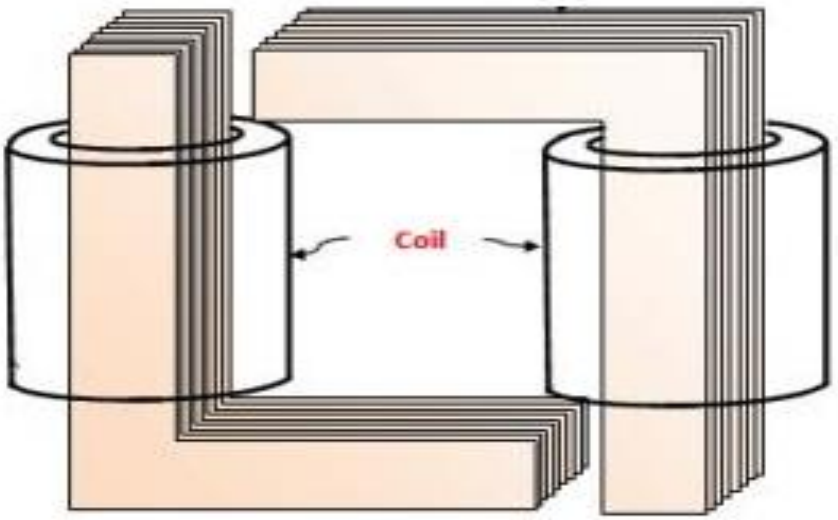


الشكل (2.1)

اولا/ القلب الحديدي (Iron Core):

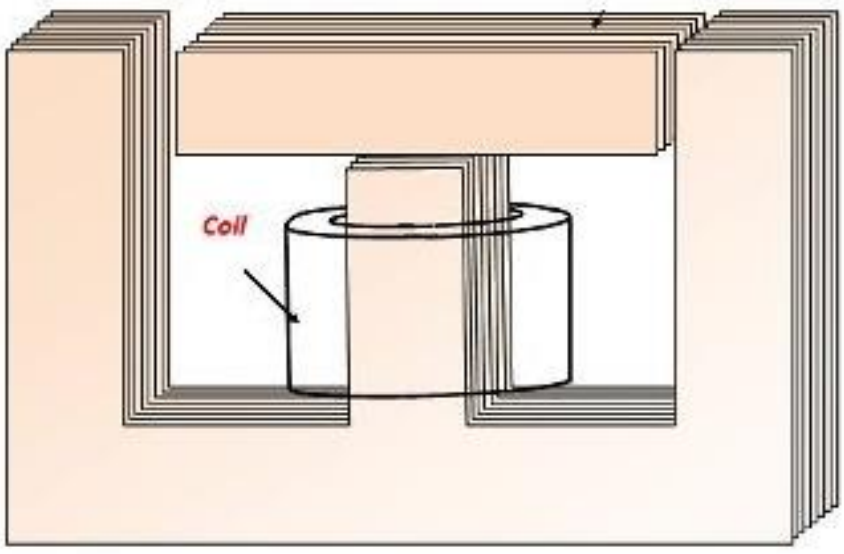
يتكون القلب الحديدي من رقائق مصنوعة من مادة الصلب والذي يحتوي على نسبة عالية من السليكون واحيانا يعامل حراريا للحصول على نفاذية عالية من اجل تقليل المفاقيد النحاسية فيه. تجمع هذه الرقائق وترص سويا بحيث تكون الفجوات الهوائية اقل مايمكن وتعزل عن بعضها البعض بعازل كالورنيش او الورق, اذ يدهن احد وجهي كل رقيقة بالورنيش او يلصق احد وجهي كل رقيقة بالورق. ان سبب صنع القلب الحديدي من رقائق هو لتقليل الطاقة المفقودة بشكل حرارة بسبب التيارات الدوامة التي تزداد بزيادة سمك الرقيقة. يتراوح سمك الرقيقة الواحدة بين (0.35mm) و (0.5mm).هناك نوعين رئيسيين للقلب الحديدي هما:

1) ذو القلب المركزي (Core Type): ترص فيه الرقائق على شكل حرف (L) كما موضح في الشكل (3.1). تلف فيه الملفات حول اللب الحديدي ويتميز ببساطة التصميم وسهولة عزل الملفات.



الشكل (3.1)

2) الهيكلي او القشري (ذو القلب الخارجي (Shell Type): ترص فيه الرقائق على شكل حرف (E) و(I) كما موضح في الشكل (4.1). في هذا النوع يحيط اللب الحديدي بالملفات مكونا درعا لها لذلك يمتاز هذا النوع بان الملفات تكون محمية من الاضرار الميكانيكية.

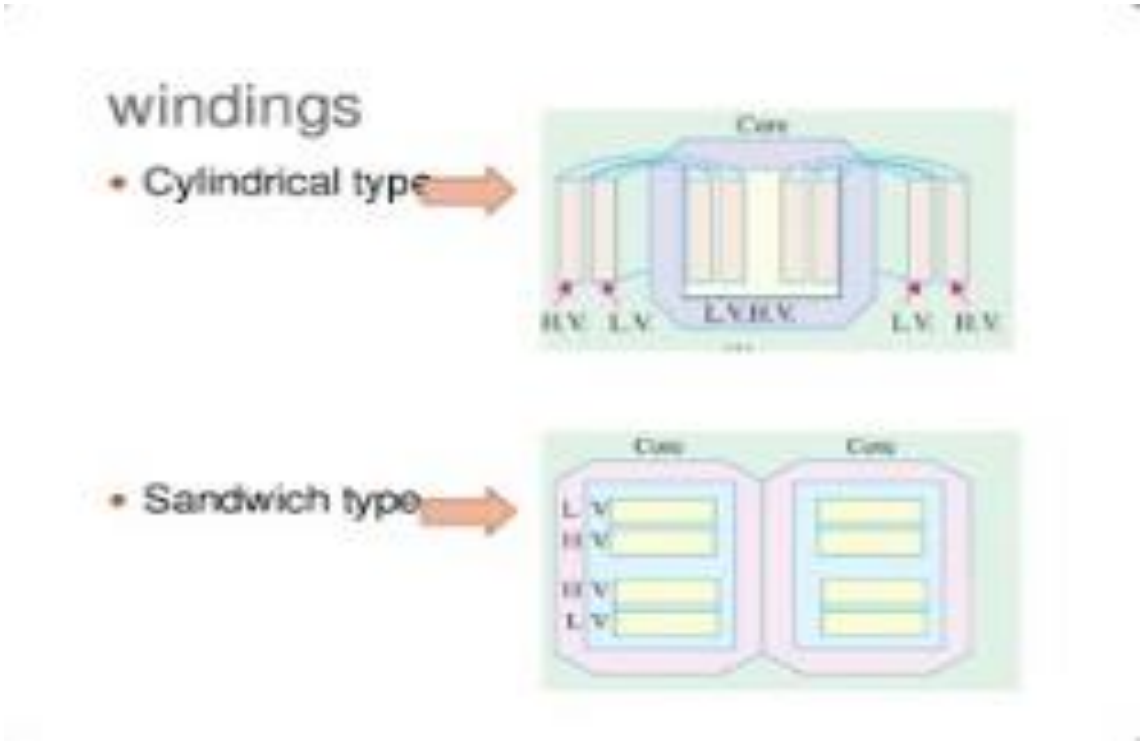


الشكل (4.1)

ثانيا/ الملفات (Winding):

هي عبارة عن ملفين غير متصلين كهربائيا تربطهما دائرة مغناطيسية ذات معاوقة صغيرة. يسمى الملف الاول المرتبط بالمصدر بالملف الابتدائي (Primary Coil) بينما يسمى الملف الثاني الذي تؤخذ منة الطاقة او يوصل به الحمل بالملف الثانوي (Secondary Coil) . تصنف ملفات المحولة الى صنفين هما:

1) الملفات المتحدة المركز (Cylindrical or Concentric Winding)
2) الملفات المتداخلة (Sandwich Winding) وكماموضح في الشكل (5.1)

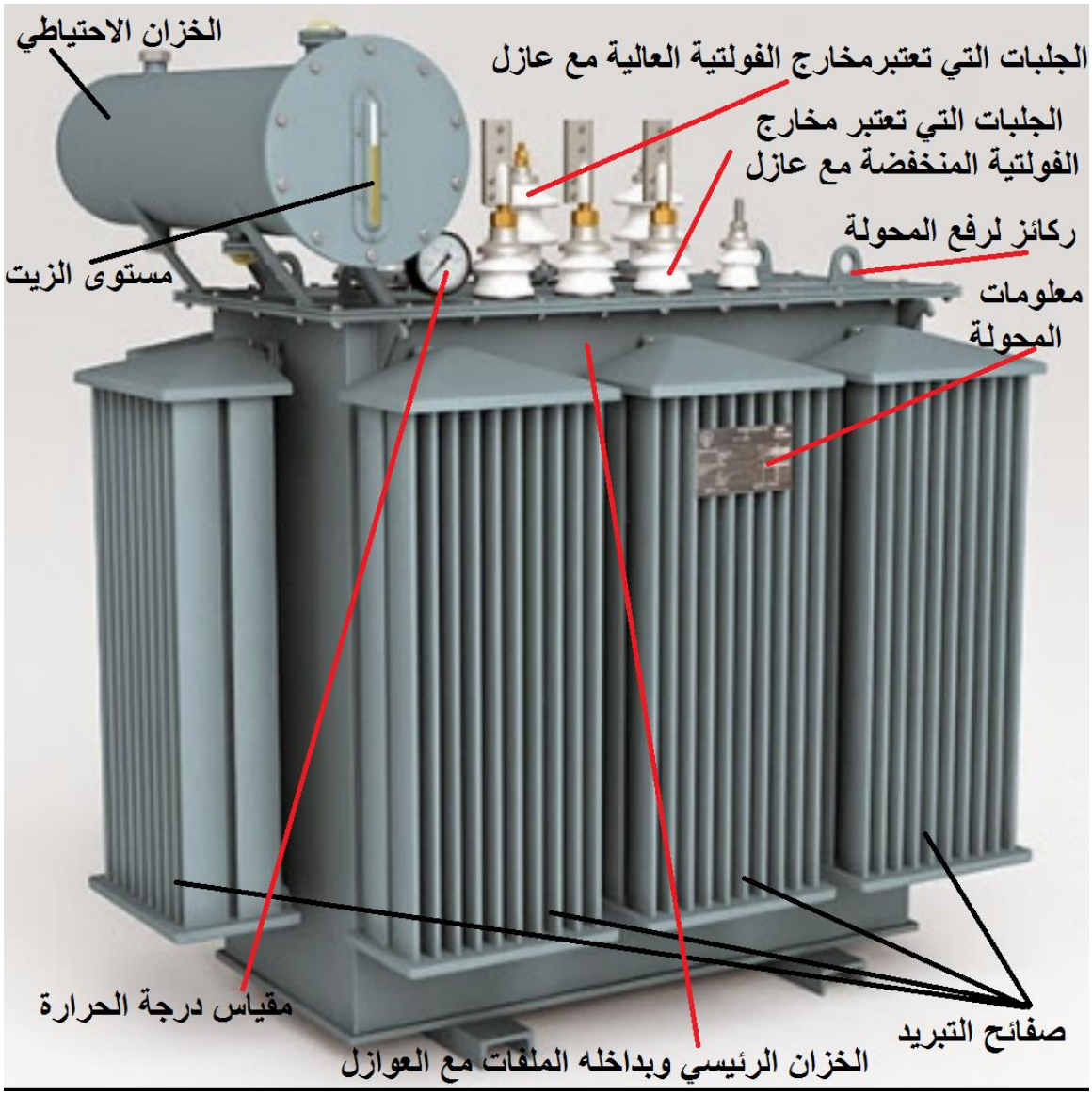


الشكل (5.1)

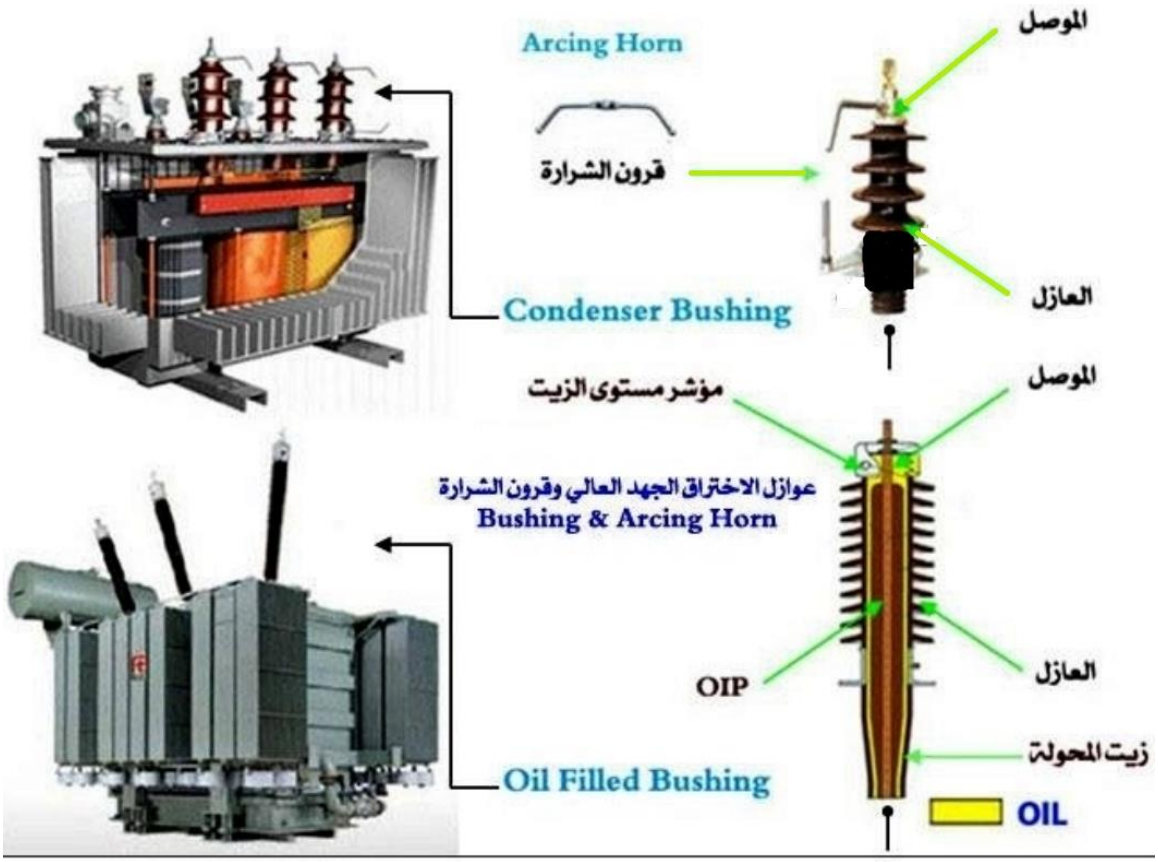
ثالثا/ ترافق المحولة اجزاء اخرى كما موضح في الشكل (6.1) هي :

1) الخزان الحاوي للب الحديدي والملفات: في المحولات الكبيرة توضع الملفات داخل خزان بحيث تكون معزولة عن الخزان الحاوي على الزيت و الذي يقوم بعمليتي العزل والتبريد ويمكن زيادة مساحة الخزان المعرضة للهواء للحصول على تبريد افضل.
2) الخزان الاحتياطي: هو خزان احتياطي للزيت يوضع في مكان مرتفع عن الملفات وفيه مقياس لمعرفة مستوى الزيت للمحولات المغمورة بالزيت.
3) اسلاك التوصيل: هي عبارة عن قضبان نحاسية تربط نهايات الملفات بخارج المحولة.
4) الجلبات: يستخدم البورسلين العادي للجهود حتى (33KV) اما اذا تعدت هذه القيمة فتستخدم جلبات مملوءة بالزيت كماموضح في الشكل (7.1).
5) العوازل: توضع بين ملفي الجهد المرتفع والمنخفض كما توضع بين الجهد المنخفض واللب الحديدي والانواع المستخدمة من العوازل هي :
    1. الورنيش
    2. الورق
    3. القطن
    4. الاشرطة الزجاجية

6) صفائح التبريد مع المراوح
7) مقياس درجة حرارة الزيت واخر للملفات
8) صمامات لاضافة وسحب الزيت
9) نقاط تثبيت لرفع وحمل المحولة



الشكل (6.1):الاجزاء المرافقة للمحولة



الشكل (7.1): الجلبات المستخدمة في المحولات

2/ تصنيف المحولات:

- تقسم المحولات من ناحية **التركيب** الى:
  1. محولات ذات ملفين مستقلين
  2. محولات ذات ملف واحد مشترك (المحول الذاتي)

- تقسم المحولات من ناحية **التغذية** الى:
  1. محولات احادية الطور
  2. محولات ثلاثية الطور

❖ تقسم المحولات من ناحية **تطبيقاتها** الى:

1. محولات القدرة (Power Transformers): ترافق مولدات الجهد المتردد وذلك لرفع كفاءة نقل الطاقة الكهربائية كما تستخدم في محطات التوزيع لخفض الجهد العالي.
2. محولات الالكترونيات (Electronic Transformers): تستخدم في دوائر التكبير الالكترونية للربط بين المصدر والحمل وتعمل على توافق دائرتين ذي معاوقة مختلفة لنقل اقصى قدرة. كما تعمل كمرحلة عزل كهربائي بين دوائر مختلفة القدرة.
3. محولات القياس (Instrument Transformers): تستخدم في اجهزة قياس الجهد والتيار العالي والتي تستعمل في اجهزة الحماية. كماتستعمل كحساس للجهد والتيار في انظمة التحكم.

❖ تقسم المحولات من ناحية **موضع استخدامها** كماموضح في الشكل (8.1),(9.1) الى:

1. محول داخل غرفة
2. محول معلق
3. محول بالخارج (في العراء)

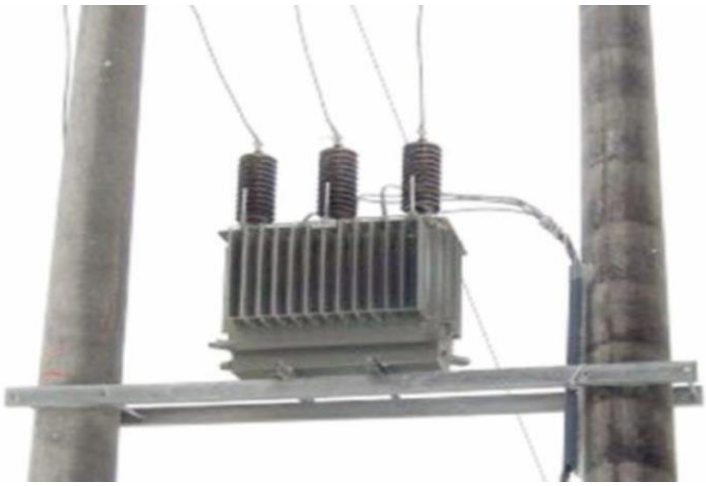
❖ تقسم المحولات من ناحية **انواعها** كماموضح في الشكل (10.1) الى:

1. محولات القياس (قياس الجهد والتيار)
2. محولات القدرة (عالي القدرة, متوسط القدرة, صغير القدرة)
3. محولات التوزيع (معلق, في الغرفة, وحدة مركبة)
4. محولات التأريض
5. محولات الاوتو

❖ تقسم المحولات من ناحية **طريقة تبريدها** الى:

1. بالهواء
2. بالزيت
3. بغاز sf6

الشكل (8.1):محولة في الخارج



الشكل (9.1):محولة معلقة

الشكل (10.1):بعض انواع المحولات الكهربائية

3/ نظرية عمل المحولة:

تعتمد نظرية عمل المحول على التأثير المتبادل بين دائرتين معزولتين كهربائيا لكنهما مرتبطتين مغناطيسيا بفيض مغناطيسي متغير. وهو في ابسط صوره يتكون من ملفين معزولين كهربائيا وملفوفين على قلب حديدي يربط الملفين مغناطيسيا. فعندما تتم تغذية الملف الابتدائي بجهد كهربائي سوف يمر تيار فيه فينشأ فيض مغناطيسي يسري في القلب الحديدي لتتولد قوة دافة كهربائية مستحثة تبعا لقانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي تكون مساوية للجهد المسلط بالمقدار معاكسة له بالاتجاه, يراعى ان تكون مقاومة الملف صغيرة نسبيا ليمر خلال الملف الابتدائي تيار كافي لانتاج الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي, تتحدد القيمة الانية (e_1) للقوة الدافعة الكهربائية المعاكسة حسب قانون لنز من المعادلة:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\emptyset}{dt} \qquad volt$$

N_1:عدد لفات الملف الابتدائي

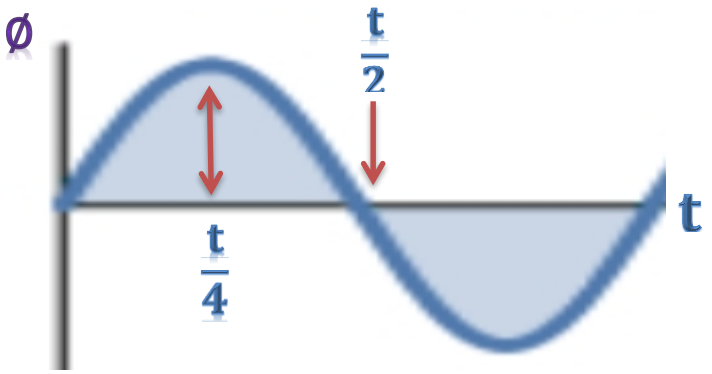
$\emptyset$: القيمة الانية للتدفق المغناطيسي في القلب الحديدي

بأهمال قيمة مقاومة الملف الابتدائي تصبح القيمة الانية للجهد المسلط (V_1) تساوي تقريبا القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بالمقدار وتعاكسها بالاتجاه كما موضح بالمعادلة التالية:

$$V_1 = + N_1 \frac{d\emptyset}{dt} \qquad volt$$

عكس اتجاه القوة الدافعة الكهربائية

وعلى فرض ان شكل موجة الجهد المسلط على الملف الابتدائي موجة جيبية, اذن سيكون شكل موجة الفيض المغناطيس أيضا موجة جيبية وبنفس الشكل كما موضح ادناه



الشكل (11.1)

من الشكل السابق نلاحظ ان الفيض المغناطيسي يزداد من الصفر ليصل لاعلى قيمة له عند ربع الدورة وبذلك تكون معادلة الفيض المغناطيسي:

$$\emptyset = \emptyset_m \, Sin \, \omega t \, \ldots\ldots (1)$$

وبما ان القوة الدافعة الكهربائية المتولدة لكل لفة حسب قانون فاراداي هي عبارة عن تغير الفيض بالنسبة للزمن:

$$\mathrm{E} = \frac{d\emptyset}{dt} \qquad volt \, \ldots\ldots (2)$$

اذن سنشتق المعادلة (1) للحصول على معادلة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة :

$$\mathrm{E} = \emptyset_m \, \omega \, Cos \, \omega t \, \ldots\ldots (3)$$

$$\mathrm{E} = \emptyset_m \, N_1 \;\; \omega \;\; Cos \, \omega t \, \ldots\ldots (4)$$

القوة الدافعة الكهربائية المتولدة لكل لفة

حيث:

$$\mathrm{E}_{max} = \emptyset_m \;\; N_1 \;\; \omega \qquad , \qquad \omega = 2\pi F$$

وعلى اساس التعامل مع القيمة الفعلية للقوة الدافعة الكهربائية المتولدة تصبح المعادلة:

$$\mathrm{E}_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \, f \;\; \emptyset_m \;\; N_1 \;\; \ldots\ldots (5)$$

$$\mathrm{E}_1 = 4.44 \;\; f \;\; \emptyset_m \;\; N_1 \;\; \ldots (6)$$

حيث ان (E_1) تساوي تقريبا (V_1) لكنها معاكسة لها بالاتجاه

وبما ان الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي كما يقطع الملفات الابتدائية يقطع ايضا الملفات الثانوية اذن بنفس الطريقة يمكن الوصول الى:

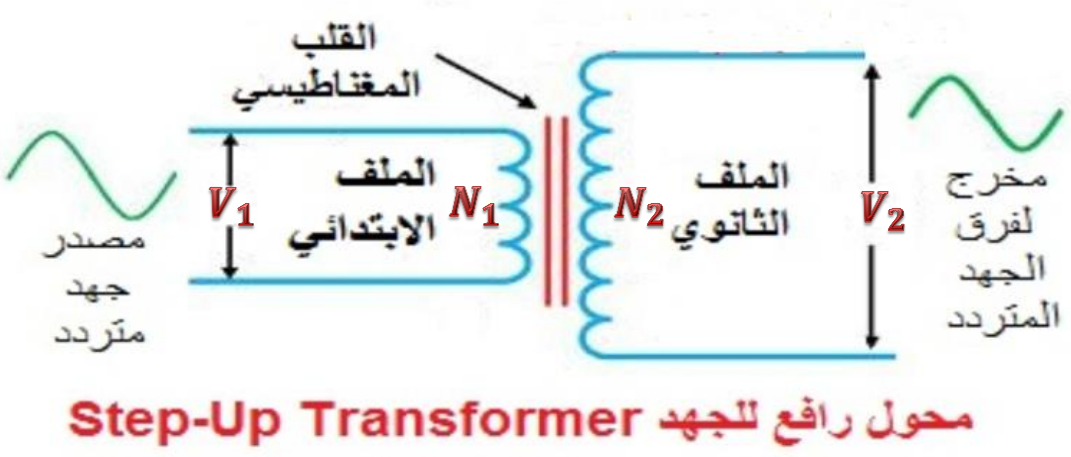
$$\mathrm{E}_2 = 4.44 \;\; f \;\; \emptyset_m \;\; N_2 \;\; \ldots (7)$$

ومن المعادلتين (6) و(7) نحصل على:

$$\frac{\mathrm{V}_2}{\mathrm{V}_1} = \frac{\mathrm{N}_2}{\mathrm{N}_1} = K \, \ldots\ldots (8)$$

تكون المحولة اما رافعة للجهد (Step Up) وعندئذ تكون:

$$N_2 > N_1 \, \ldots\ldots K > 1$$



الشكل (12.1)

او تكون خافضة للجهد (Step Down) وعندئذ ستكون:

$$N_1 > N_2 \dots\dots K < 1$$

الشكل (13.1)

واذا اعتبرنا المحولة مثالية بمعنى ان القدرة الداخلة = القدرة الخارجة اي:

$$I_1 V_1 = I_2 V_2 \dots\dots (9)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} = K \dots (10)$$

من المعادلتين (8) و(10) يمكن الوصولل الى:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = K \ldots\ldots (11)$$

4/ المحولة في حالة اللاحمل:

1. عمليا سيكون هناك مفاقيد في الملفات الابتدائية وكذلك في القلب الحديدي والتي تتضمن مفاقيد الهسترة والتيار الاعصاري وجزء قليل يضيع في النحاس. لن يكون هناك فقد في الملفات الثانوية لان الدائرة مفتوحة.
2. يمر تيار اللاحمل في ملفات الابتدائي ويكون متاخر عن الجهد بزاوية (θ_o) حيث $(\theta_o < 90)$ وينقسم تيار اللاحمل الى مركبتين هما (I_a, I_m), حيث:

أ- المركبة الاولى (تيار I_a) يكون بنفس اتجاه الجهد وهو المسبب للفقد الحديدي

$$I_a = I_O \, Cos\theta_o$$

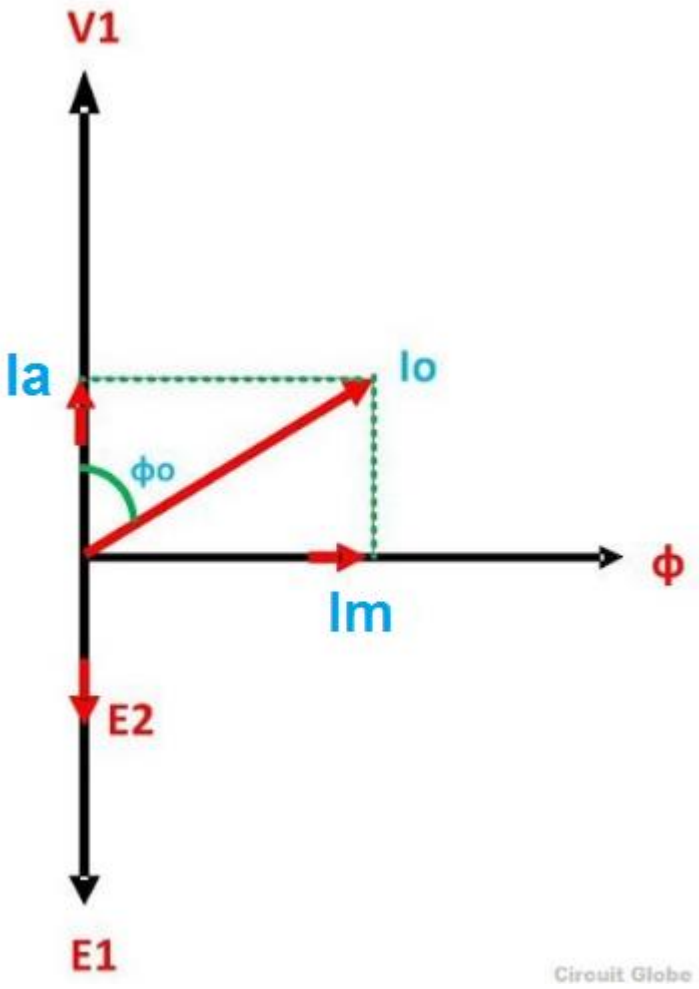
ب- المركبة الثانية (تيار I_m) يكون عمودي على الجهد او متاخر (90^o) عنه وهو المسبب لمغنطة الدائرة المغناطيسية

$$I_m = I_O \, Sin\theta_o$$

وبهذا يكون تيار اللاحمل:

$$I_o = \sqrt{{I_m}^2 + {I_a}^2}$$

3. تيار اللاحمل في الابتدائي يكون صغيرا جدا بالمقارنة مع تيار الحمل في الابتدائي.
4. لكون تيار اللاحمل صغير جدا يمكن اهمال المفاقيد النحاسية وبهذا تكون القدرة الداخلة في الابتدائي لحالة اللاحمل =المفاقيد الحديدية في القلب الحديدي.كماموضح في الشكل (14.1)



الشكل (14.1)

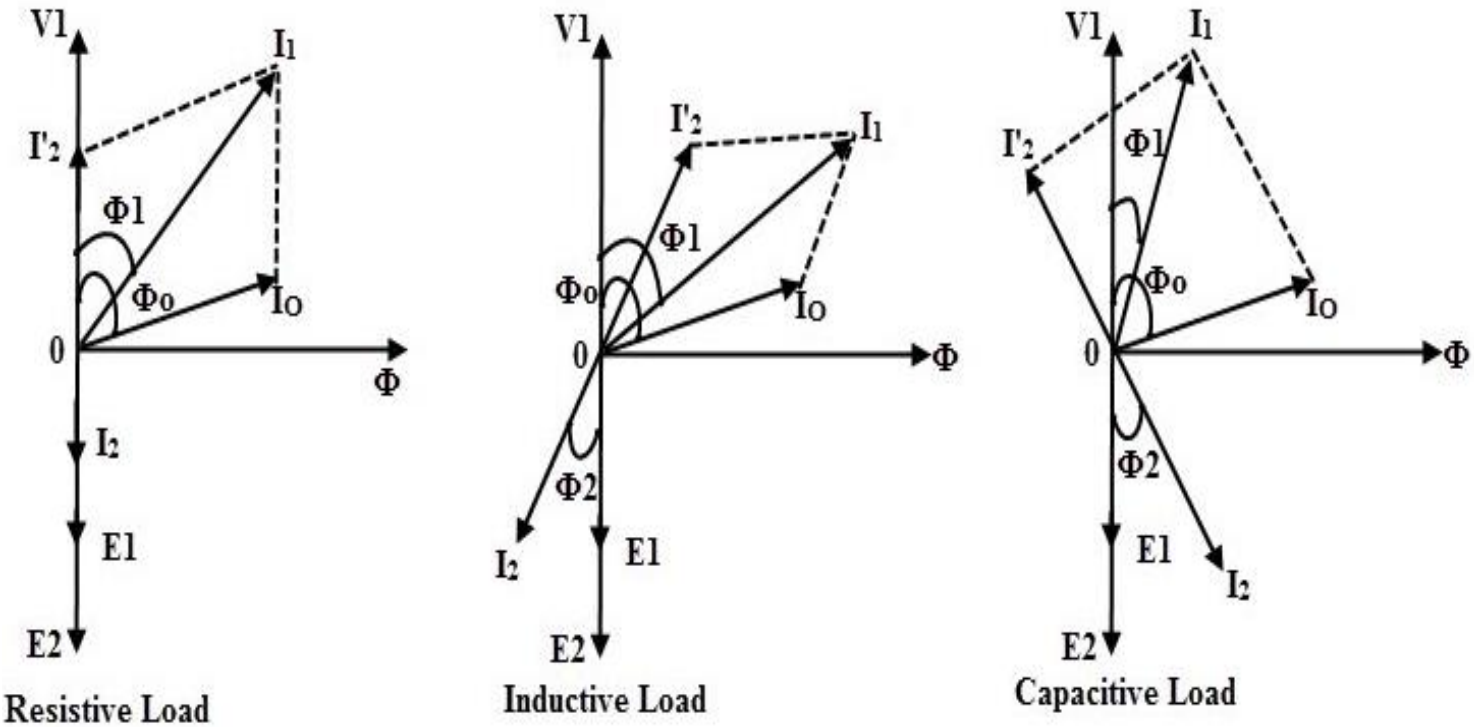
5/ المحولة في حالة الحمل:

1. عند تحميل المحولة بربط الحمل على اطراف الملف الثانوي سـوف يمر تيار الحمل (I_2) في ملفات الثانوي. قيمة واتجاه هذا التيار سـتحددها خواص الحمل ,فاذا كان الحمل عبارة عن **مقاومة نقية** يكون التيار (I_2) **بنفس اتجاه** (V_2) اما اذا كان الحمل عبارة عن مقاومة **حثية** يكون التيار (I_2) **متاخر** بزاوية (θ_o) عن (V_2) , لكن اذا كان الحمل عبارة عن مقاومة **سعوية** سيكون التيار (I_2) **متقدما** عن (V_2) كما موضح في الشكل (15.1).

2. عندمرور تيارالحمل (I_2) في ملفات الثانوي ســـتولد فيض مغناطيســـي في القلب الحديدي معاكس للفيض الاصـــلي الناتج عن (I_O) ويقوم باضـــعافه وبذلك تقل قيمة القوة الدافعة الكهربائية (E_1) .
3. عندما تقل القوة الدافعة الكهربائية (E_1) يزداد التيار المسـحوب في الابتدائي, حيث سـيكون التيار المار في الابتدائي في حالة التحميل مكون من مركبتين هما:
   أ- تيار اللاحمل (I_O)
   ب- مركبة تيار الحمل (I_2) وهوعبارة عن مركبة تيار الحمل بعد تحويله الى الابتدائي وبذلك ستكون قيمته :

$$I'_2 = K\, I_2$$

فتكون قيمة (I_1) هو الجمع الاتجاهي لكل $(I_2 + I_O)$



الشكل (15.1)

6/كفاءة المحولة:

تعرف كفاءة المحولة بأنها النسبة بين القدرة الخارجة منها مقسومة على القدرة الداخلة اليها. حيث ان:

$$P_{out} = P_{in} - P_{losses}$$

$$\mu = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\%$$

$$or: \mu = \frac{P_{in} - P_{losses}}{P_{in}} = \frac{P_{in}}{P_{in}} - \frac{P_{losses}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{losses}}{P_{in}} * 100\%$$

ملاحظة:

عندما تتساوى الخسائر النحاسية مع الخسائر الحديدية تكون الكفاءة اعظم مايمكن

مثال:

محولة خافضـــة (110 V/440 V) مقاومة ملفها الابتدائي (0.3 Ω) ومقاومة ملفها الثانوي (0.02 Ω) فاذا كانت مفاقيد اللب عند الفولتية المقننة هي (150w) احســب تيار الملف الثانوي الذي عنده تكون الكفاءة قيمة عظمى, علما ان عامل القدرة يساوي (1), ثم جد احسب الكفاءة

المعطيات المتوفرة:

$$R_1 = 0.3\ \Omega \quad R_2 = 0.02\ \Omega \quad , P_{iron} = 150\ W \ , V_1 = 440\ V \ , V_2 = 110\ V$$

$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{110}{440} = 0.25$$

$$P_{iron} = P_{cu}$$

$$150 = I_1^2 R_{eq} \longrightarrow \quad R_{eq} = R_1 + \frac{R_2}{K^2} = 0.3 + \frac{0.02}{(0.25)^2} = 0.62\ \Omega$$

$$150 = I_1^2 R_{eq} \quad I_1^2 = \frac{150}{R_{eq}} = \frac{150}{0.62}$$

$$I_1 = 15.6A$$

$$K = \frac{I_1}{I_2} \longrightarrow 0.25 = \frac{15.6}{I_2} \longrightarrow I_2 = \frac{15.6}{0.25} = 62.4A$$

لايجاد الكفاءة سنجد المفاقيد الكلية وقدرة الاخراج حيث:

المفاقيد الكلية = المفاقيد الحديدية +المفاقيد النحاسية

المفاقيد الحديدية = المفاقيد النحاسية لكون الكفاءة اعظم مايمكن اذن كلاهما قيمته =150W

واذن المفاقيد الكلية = المفاقيد الحديدية +المفاقيد النحاسية = 150+150 =300W

اما قدرة الاخراج:

$$P_{out} = I_2 V_2 Cos\theta_2 = 62.4 * 110 * 1 = 6844\ W$$

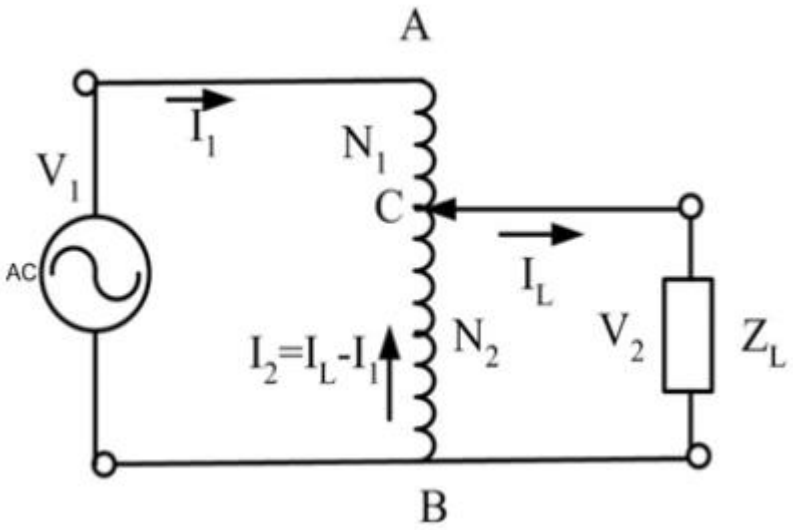
$$\mu = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} = \frac{6844}{6844 + 300} * 100 = 96\%$$

7/ المحول الذاتي:

وهو محول ذو ملف واحد يستخدم لكل من الجهدين الداخل والخارج بدلا من الملفين الابتدائي والثانوي في المحول العادي وبالتالي يكون جهد المصدر والجهد الخارج غير معزولين عن بعضهما البعض وكماموضح في الشكل (16.1), يمثل الملف (AC) في الشكل ادناه الملف الابتدائي وعدد لفاته (N_1) بينما يمثل الملف (BC) الملف الثانوي وعدد لفاته (N_2), بتغيير موضع النقطة (C) نتحكم بعدد لفات الملف الثانوي بالتالي الجهد الخارج. يمتاز المحول الذاتي :

1. صغر حجمه نسبيا
2. قلة تكاليف الصنع (كونه يتكون من ملف واحد فقط وبذلك تقل كمية النحاس المستخدمة ولذلك يعتبر محولا اقتصاديا).
3. قابلية تنظيم الجهد على مدى واسع (من خلال التحكم بمقدار ملفات الثانوي (N2) يتم تغيير مقدارالجهد الخارج V2)

من عيوب المحول الذاتي ان العزل الكهربائي بين المصدر والحمل غير متوفر نظرا لاستخدام ملف واحد بين الادخال والاخراج ولنفس السبب لايفضل استخدامه بنسبة تحويل كبيرة اذ يسبب خطورة وامكانية حدوث قصر بين ملفات الجهد العالي والمنخفض.



الشكل (16.1)

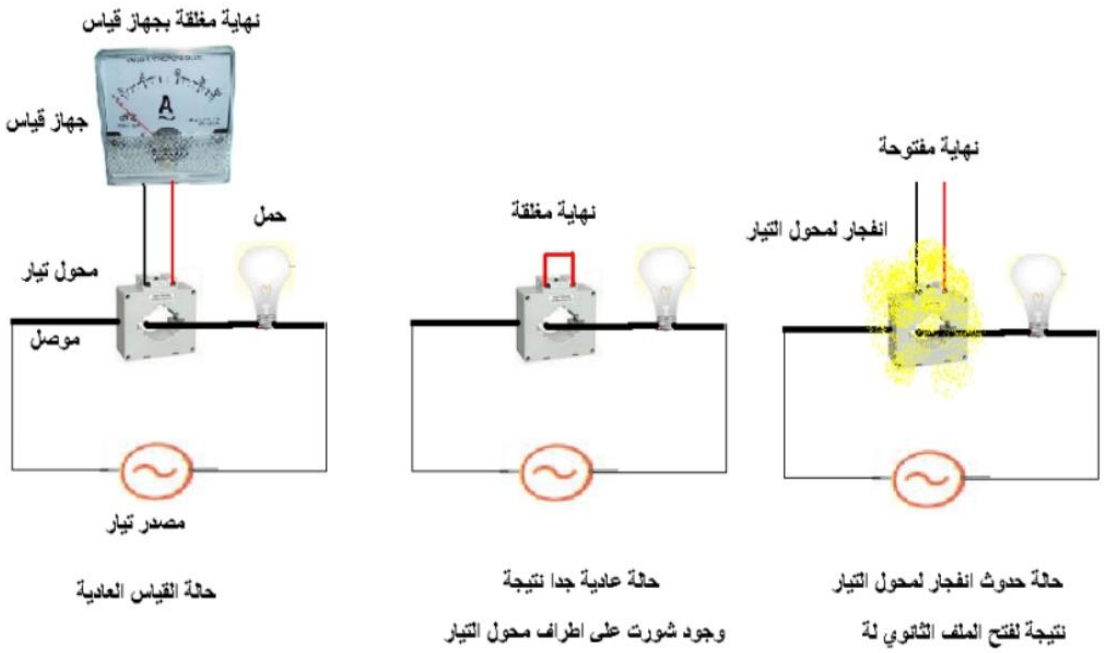
8/ محولات القياس:

لانه من الصـعب التعامل مباشـرة مع قيم تيار او فولتية عالية في الشـبكات او المنظومات الكهربائة لذلك تستخدم محولات القياس التي تقوم بتخفيض قيمة التيار او الفولتية الى قيم مناسبة يمكن التعامل معها . اذ تقسـم محولات القياس الى محولات التيار (CURRENT TRANSFORMER) ومحولات الفولتية او الجهد (VOLTAGE TRANSFORMER)

1- محولات التيار (CT):

استخداماتها: تستخدم في دوائر التيار المتناوب لخفض التيار بنسبة دقيقة من اجل القياس والوقاية والتنظيم.

طريقة ربطها: يوصل الملف الابتدائي لمحول التيار مع الدائرة المراد قياس تيارها فيمايحول الملف الثانوي الى دائرة قصر بتوصيله مباشرة باجهزة القياس كماموضح في الشكل (17.1),(18.1), (19.1)



الشكل (17.1)

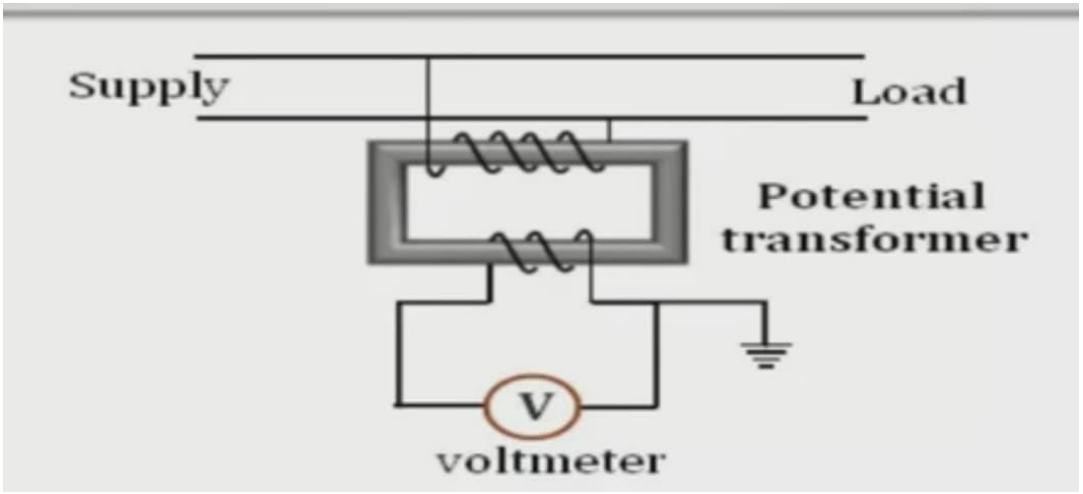
الشكل (18.1):محول تيار عمليا

الشكل (19.1):بعض انواع محولات التيار

2- محولات الفولتية او الجهد (VT):

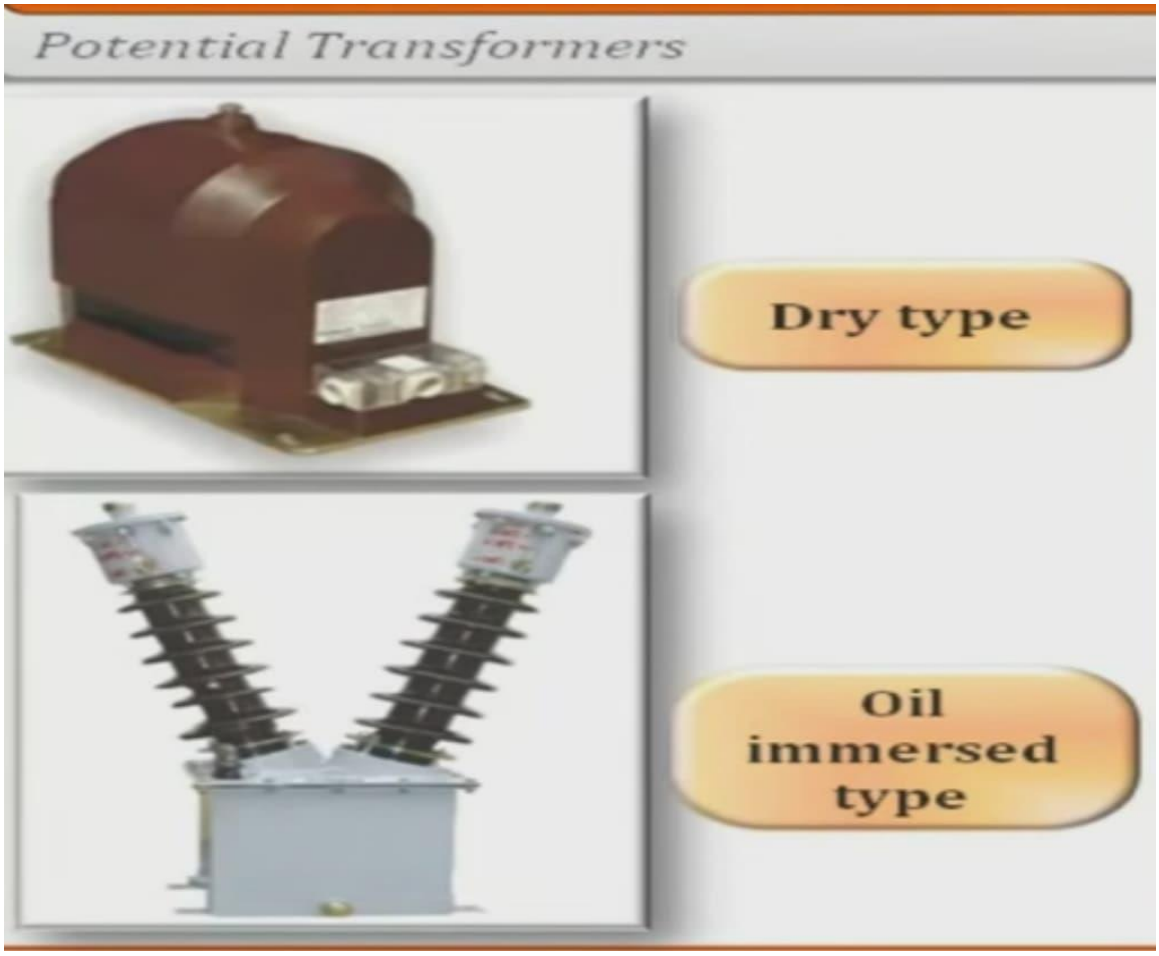
استخداماتها: تستخدم في دوائر التيار المتناوب لخفض الفولتية بنسبة دقيقة من اجل القياس والوقاية والتنظيم

طريقة ربطها: يوصـــل الملف الابتدائي لمحول الفولتية مع الدائرة المراد قياس جهد طرفيها فيما يوصـــل الملف الثانوي بالفولتميتر او الواطميتر او بالمرحل او اي جهاز جهد اخركما في الشـــكل (20.1),(21.1),(22.1).



الشكل (20.1)

الشكل (21.1)



الشكل (22.1)

مثال 1: محول ذاتي يقلل الفولتية من (500 V الى 400 V), اذا كان تيار الحمل (100 A) اوجد قيمة التيار في كل جزء من ملف المحول

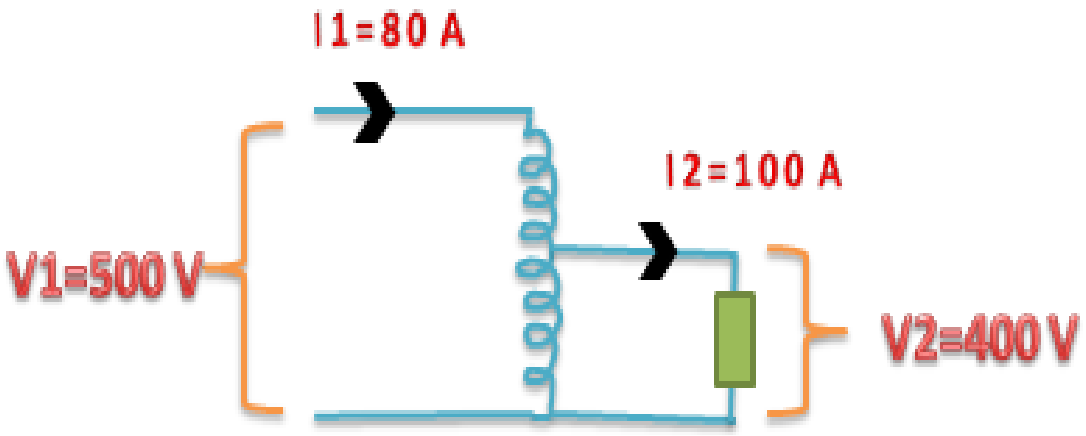
الحل:

المعطيات المتوفرة : محول ذاتي فيه (V_1 = 500 V , V_2=400 V) و (تيار الحمل اي تيار الملف الثانوي I_2 = 100 A)

$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{400}{500} = 0.8$$

وبما ان

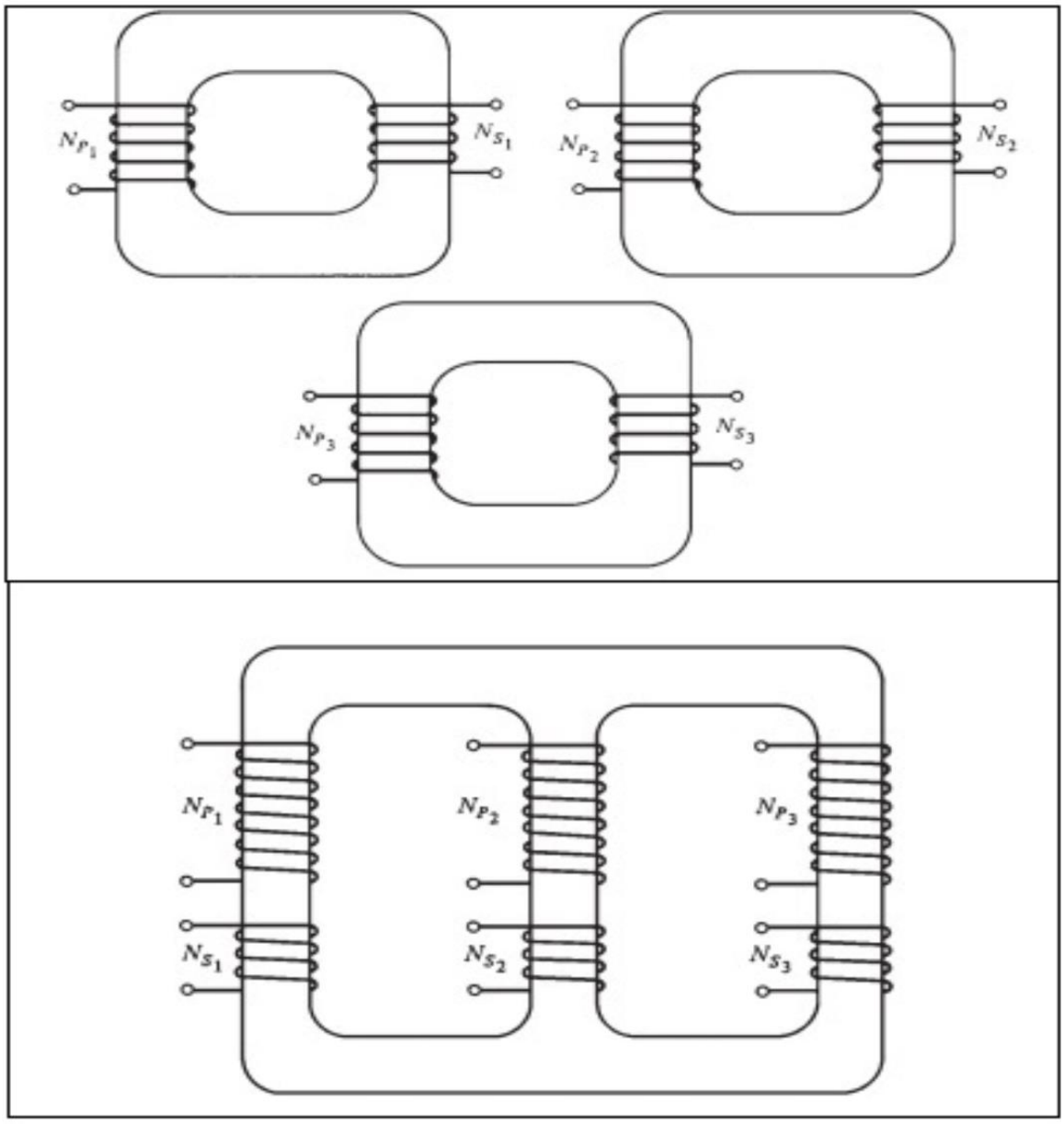
$$K = \frac{I_1}{I_2} \rightarrow I_1 = 0.8*100 = 80\ A$$



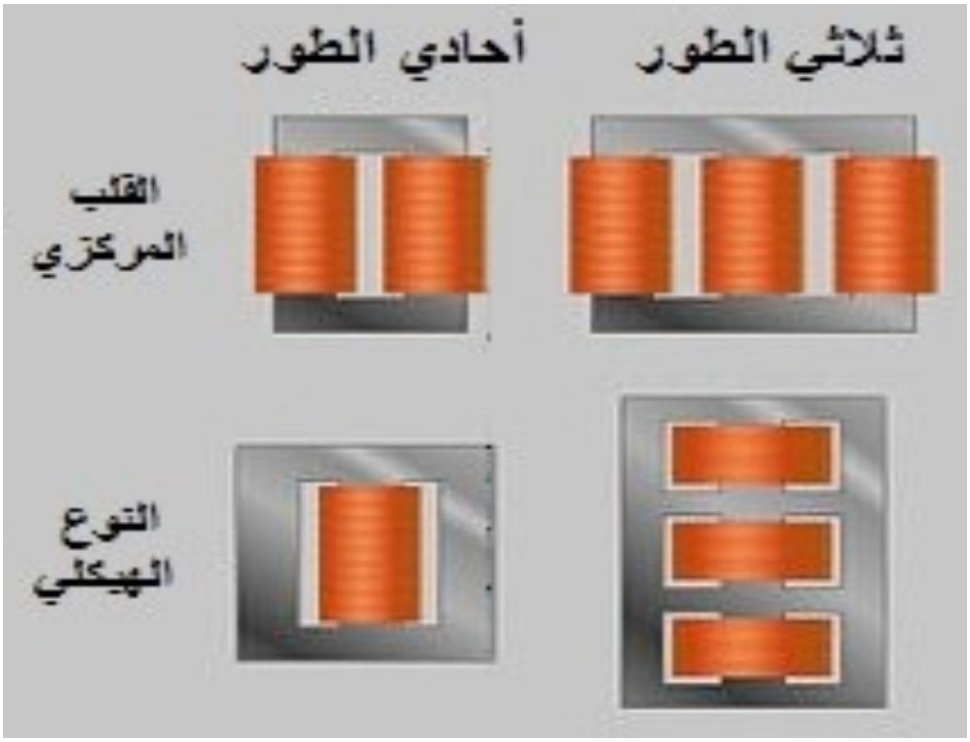
الشكل (23.1)

9/ المحولات ثلاثية الطور Three Phase Transformer:

لسد مستلزمات المدنية الحديثة برزت الحاجة لتوليد ونقل قدرات كبيرة من الطاقة الكهربائية بحيث اصبحت المحولات ذات الطور الواحد لاتفي بالغرض لذلك لجأ العلماء الى استعمال ثلاث محولات ذات طور واحد لنقل الطاقة من الشـــبكات ثلاثية الطور وبالقدرات المطلوبة .ثم تم تطويرها بربط الاطوار الثلاثة على لب واحد مشترك فسميت بالمحولة ثلاثية الطور كماموضح في الشكل (24.1) (25.1) (26.1).



الشكل (24.1)



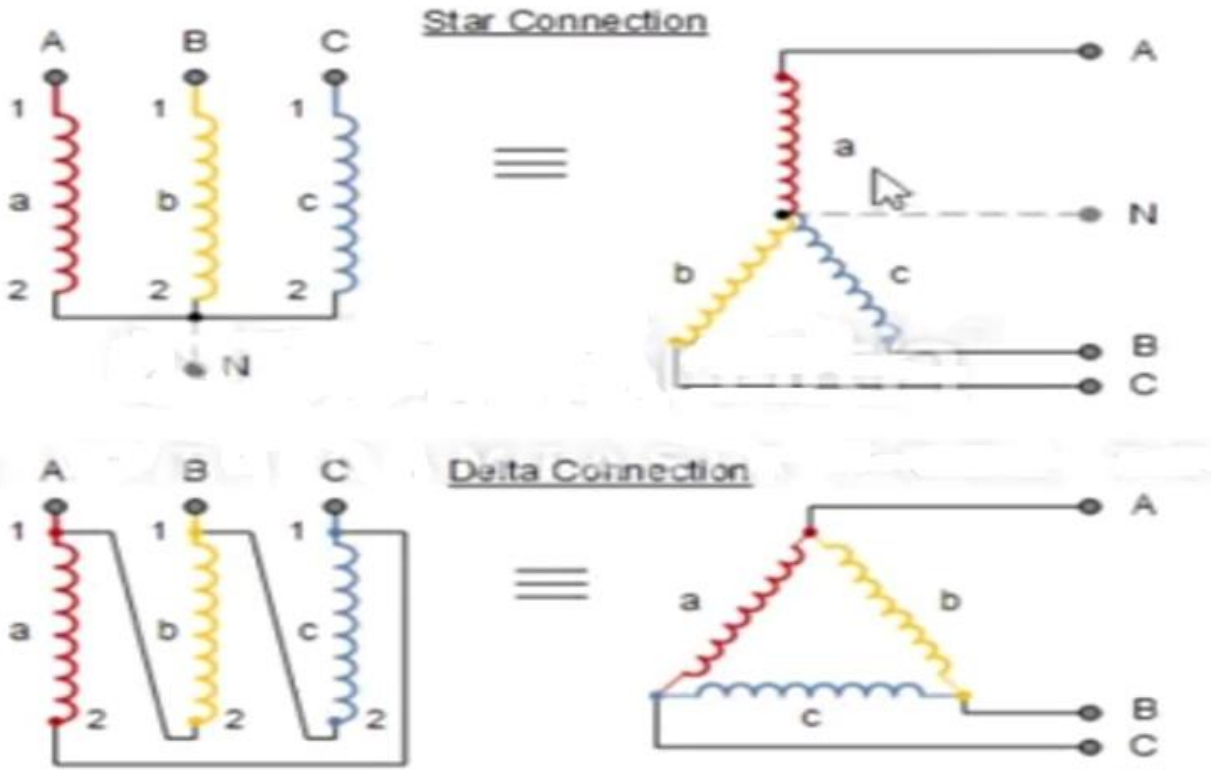
الشكل (25.1)

الشكل (26.1):المحولات الثلاثية الطور عمليا

1.9/ طرق ربط المحولات ذات الثلاثة اطوار Three Phase Transformer:

1) **نجم/نجم** **Y/Y** **Star/Star**
2) مثلث/مثلث Δ/Δ Delta/Delta
3) نجم/مثلث Y/ Δ Star/Delta
4) مثلث/نجم Δ /Y Delta/Star
5) المثلث المفتوح V/V Open Delta
6) ربط سكوت T/T Scot connection

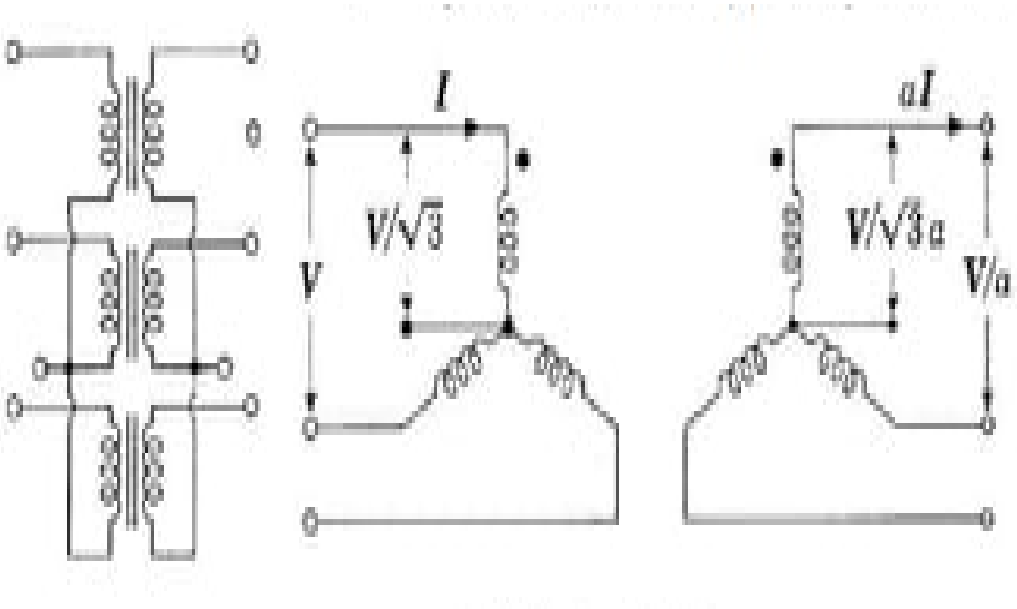
ادناه رسم توضيحي لكيفية الربط النجمي (Star) والمثلثي (Delta):



الشكل (27.1)

1) **طريقة ربط (نجم/نجم Y/Y Star/Star):**

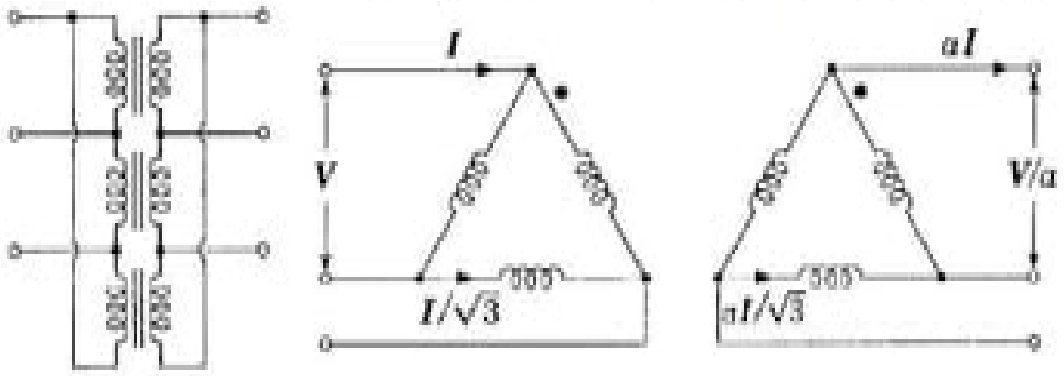
يستخدم: في القدرات الصغيرة ذات الضغوط العالية كمايعمل بشكل جيد في الاحمال ثلاثية الطور المتوازية كماموضح في الشكل ادناه



الشكل (28.1)

2) **طريقة ربط (مثلث/مثلث Δ/Δ Delta/Delta)**

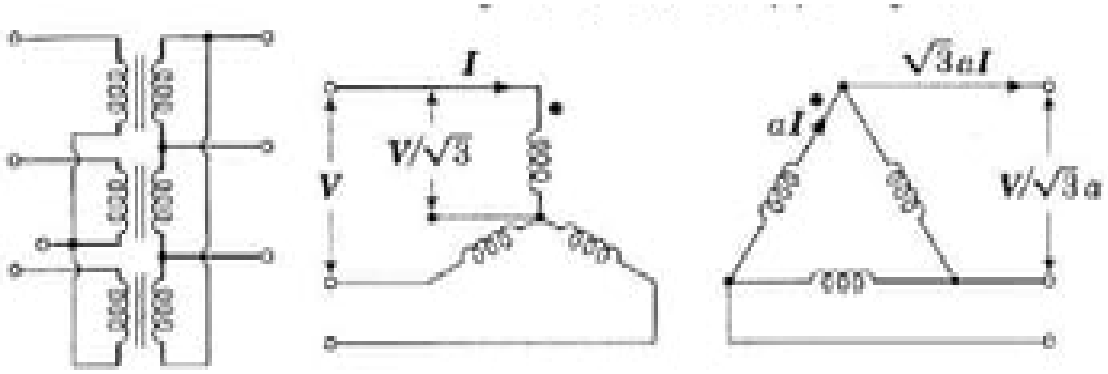
يستخدم في القدرات الكبيرة ذات الفولتيات المنخفضة كمايعمل بشكل جيد في الاحمال الغير متوازية وايضا عند اختفاء احد الاطوار لكن بكفاءة اقل



الشكل (29.1)

3) **طريقة ربط (نجم/مثلث Y/ Δ Star/Delta)**

يستخدم في نهايات خطوط نقل القدرة حيث ترتبط نقطة التعادل للملف الابتدائي مع الارض



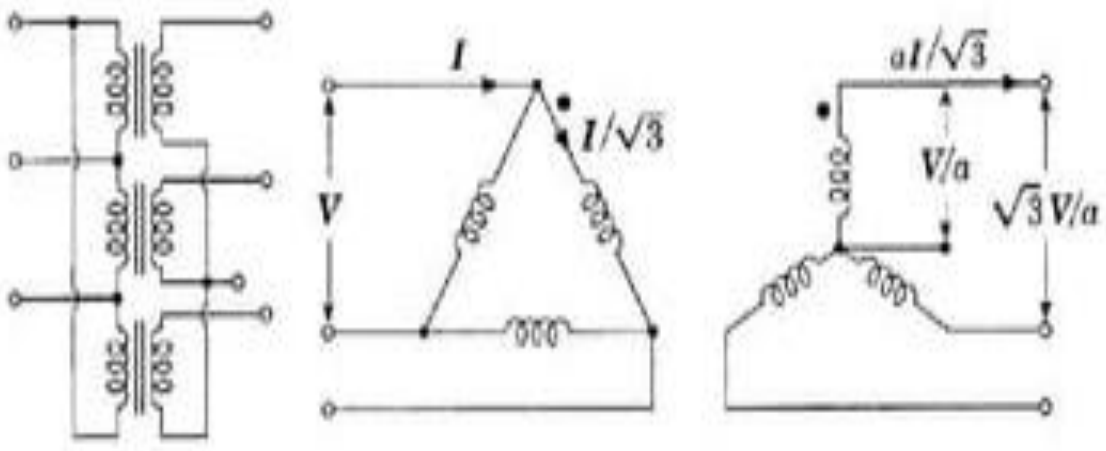
الشكل (30.1)

4) **طريقة ربط (مثلث/نجم Δ /Y Delta/Star)**

يستخدم:

ا) كمحولات خافضة للفولتية للاحمال احادية وثلاثية الطور في شبكات التوزيع

ب) كمحولات رافعة للفولتية في بدايات خطوط نقل القدرة في الشبكات الرئيسية حيث يتم ربط نقطة التعادل للملف الثانوي مع الارض.



الشكل (31.1)

الفصل الثاني

المحركات الحثية ثلاثية الطور

المحركات الحثية ثلاثية الطور:

ان تيار الاســتهلاك في المصــانع ومجالات الحياة المتنوعة هو تيار متناوب ذو ضــغوط مختلفة طور واحد وثلاثة اطوار لذلك اتجهت مصـــانع المحركات الى تصـــنيع مختلف انواع المحركات لتغطية احتياجات المصانع والخدمات العامة ولذلك يمكن تصنيف انواع المحركات حسب نظرية عملها الى:

أ) المحركات التزامنية (Synchronus motor)

1. التزامنية المستوية
2. التزامنية الفائقة

ب) المحركات الحثية الغير تزامنية (Induction Motors)

1. ذات القفص السنجابي المفرد والمزدوج (Squirrel cage) وذات حلقات الانزلاق (Slip Ring)
2. ذات الموحد (Commutator Motors)

❖ **للمحركات الحثية استعمالات واسعة في الصناعة لمميزاتها التالية:**

1) بسيطة التركيب ومتينة الاجزاء
2) رخيصة الثمن وذات اداء جيد في العمل
3) ذات كفاءة عالية في ظروف العمل الاعتيادي
4) ذات معامل قدرة جيد
5) خالية من الفحمات وتحتاج لصيانة قليلة
6) لاتحتاج الى محركات مساعدة لتشغيلها

❖ **مساوى المحركات الحثية**

1) لايمكن تغيير سرعتها بسهولة وتقل كفاءتها مع تغير السرعة
2) تقل سرعتها قليلا مع زيادة الحمل

3) عزم تشغيلها الابتدائي صغير قياسا لعزم الدوران

2/ النظرية الاساسية والتركيب:

تتكون محركات التيار المتناوب من جزئين رئيسين هما

1. الجزء الثابت (Stator)
2. الجزء الدوار (Rotor)

❖ مكونات الجزء الثابت (Stator):

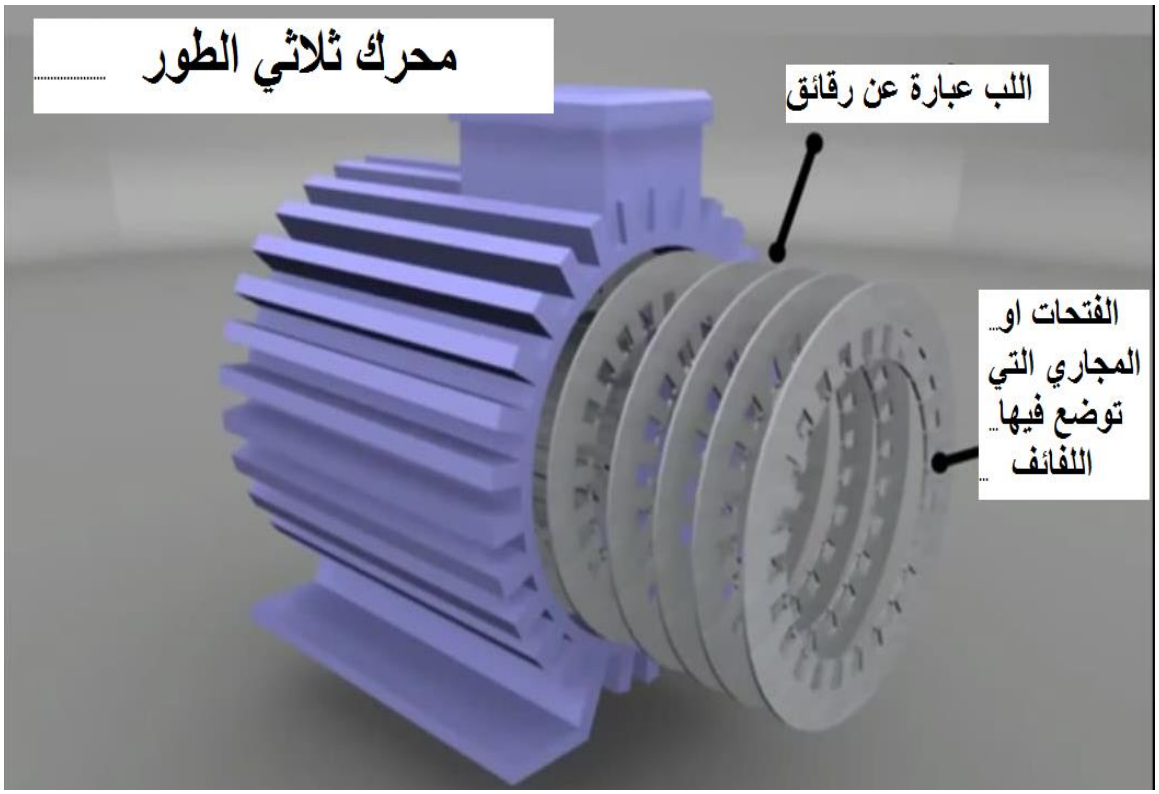
1) لب الجزء الثابت (Stator Cors)

يتكون من رقائق الفولاذ المطروق او سبيكة الفولاذ والسليكون والمرصوصة لبعضها البعض والمعزولة بطبقة من مادة عازلة بحيث تشكل اسطوانة مجوفة حافاتها مجاري توضع بداخلها لفائف الاطوار الثلاثة وفق حسابات دقيقة حسب نوع المحرك وتوصل لفائف الاطوار الثلاثة بمصدر القدرة بواسطة مفاتيح التشغيل كماموضح في الشكل (1-2-4-5)

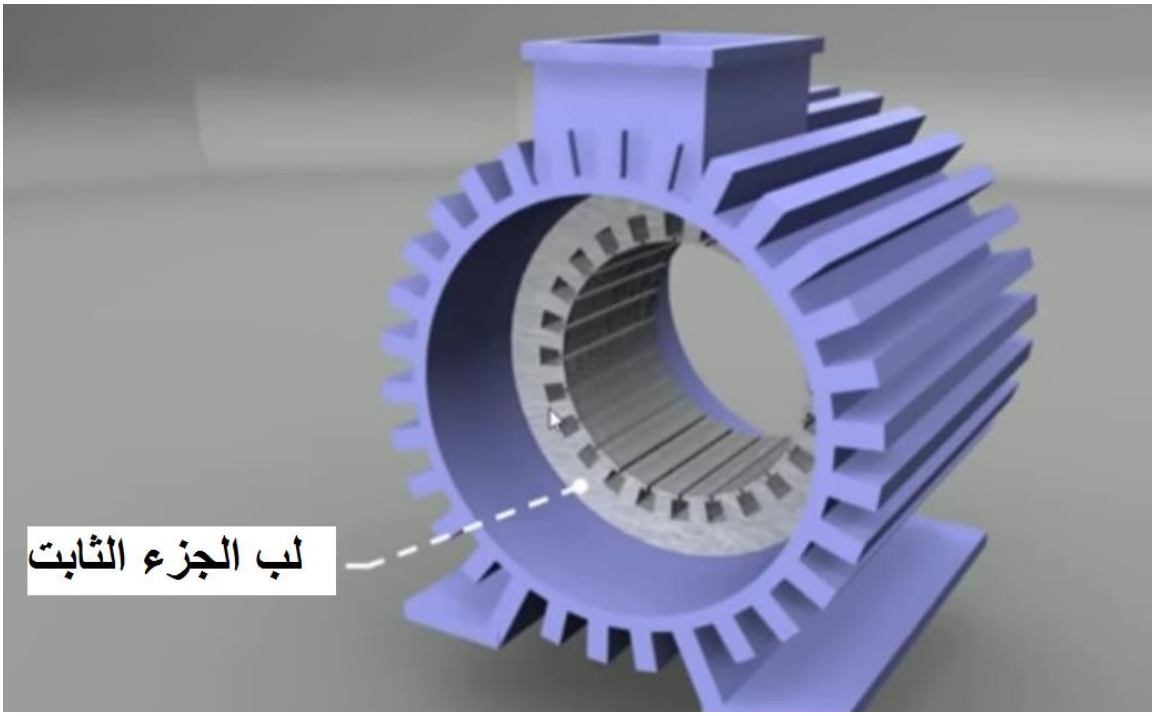
2) ملفات الجزء الثابت:

هي ملفات ثلاثية الطور تصمم وفق حسابات خاصة كما موضح في الشكل (3-4-5).

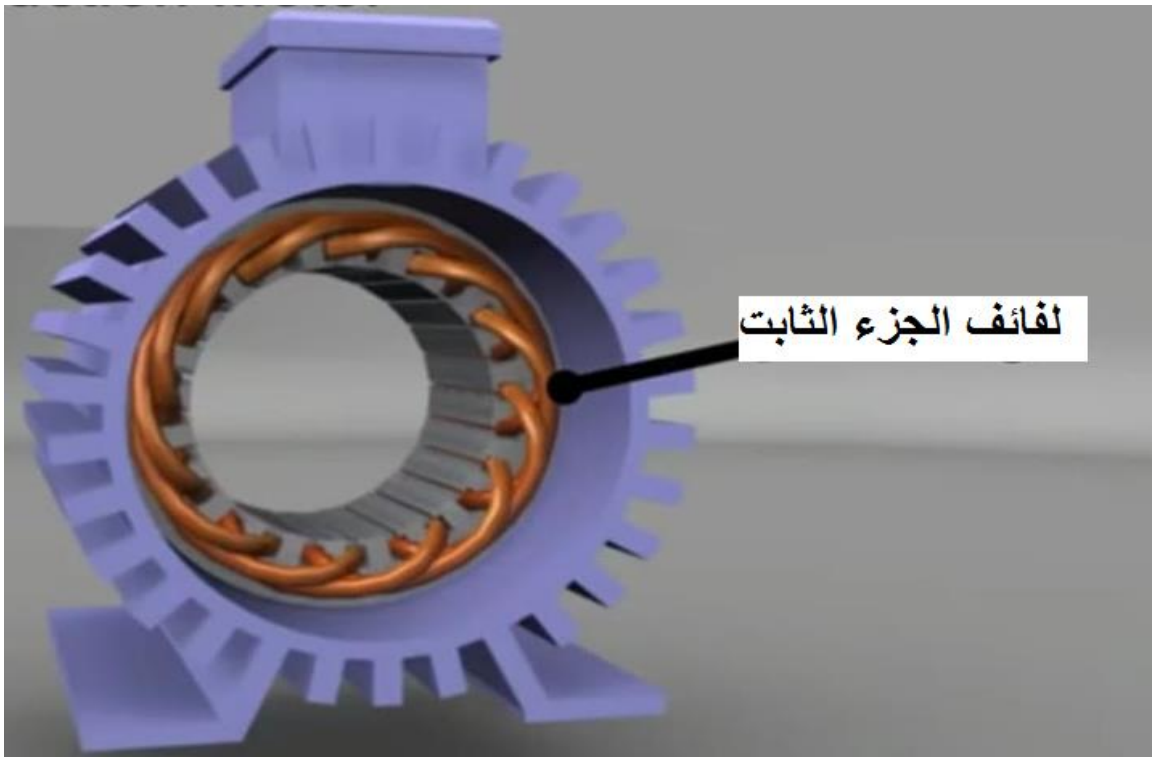
الصور التالية توضح الشرح السابق



الشكل (1.2)



الشكل (2.2)



الشكل (3.2)

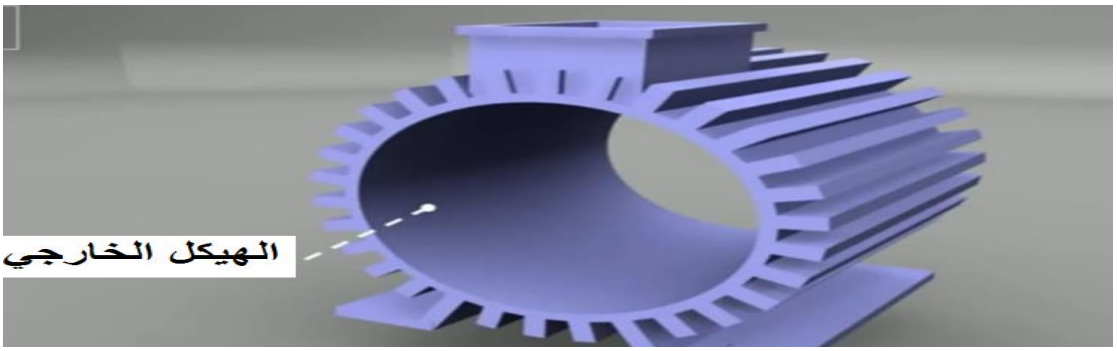
الشكل (4.2): **لب ولفائف الجزء الثابت عمليا في الواقع**

الشكل (5.2):

❖ **مكونات الجزء الثابت (Stator):**

3) مواد عازلة (Insulator): تستخدم مختلف المواد العازلة المعروفة من اجل عزل اللفائف عن بعضها البعض وعن اللب ويتم اختيار نوع العازل اعتمادا على بيئة عمل المحرك من (فولتية -- حرارة –رطوبة-- نوع التشغيل)

4) الهيكل الخارجي (Frame): يتكون من الحديد المصبوب او الاهين اوسبيكة الالمنيوم ويحوي داخله اللب والفائف لحمايتهما من الظروف الخارجية المحيطة كماتنقل حرارة الاجزاء الداخلية الى الخارج كما موضح في الشكل(6.2)



الشكل (6.2)

❖ **الجزء الدوار (Rotor):**

دوار المحركات الحثية يكون على نوعين

1) دوار نوع القفص السنجابي

2) دوار نوع حلقات الانزلاق

اولا: الدوار لنوع القفص السنجابي يتكون من:

1) لب الجزء الدوار (Rotor Cors)

كما في الجزء الثابت هنا ايضا تتشكل اسطوانة مجوفة يمر محور الاسناد في مركزها امامحيطها الخارجي فيحوي ثقوب طولية تحمل لفائف الدوار وتشكل الدائرة المغناطيسية للدوار كماانها تشكل جزء من الدائرة المغناطيسية للمحرك والمتكونة من لب الثابت والدوار والفجوة الهوائية.كما موضح في الشكل (7.2)(10.2).

3. **لفائف الدوار (Rotor Windings):** يمكن بناء القفص السنجابي من قضبان النحاس ملحومة على حلقات طرفية من نفس المعدن وقد تصنع من الالمنيوم المصبوب في قوالب خاصة لتكون القفص والحلقات الطرفية في هيكل واحد كماموضح في الشكل (8.2)(9.2)(10.2). يمتازالقفص السنجابي ببساطة التركيب ورخص الثمن والتكييف لتقبُل اي عدد من الاقطاب ومن عيوبها خواصها الثابتة حيث لا يمكن اضافة مقاومة خارجية لتقليل من تيار البدء. تكون قضبان التوصيل للقفص السنجابي عادةً مائلة بالنسبة لمحور الاسناد المركزي جزئياً وذلك للاسباب الآتية:

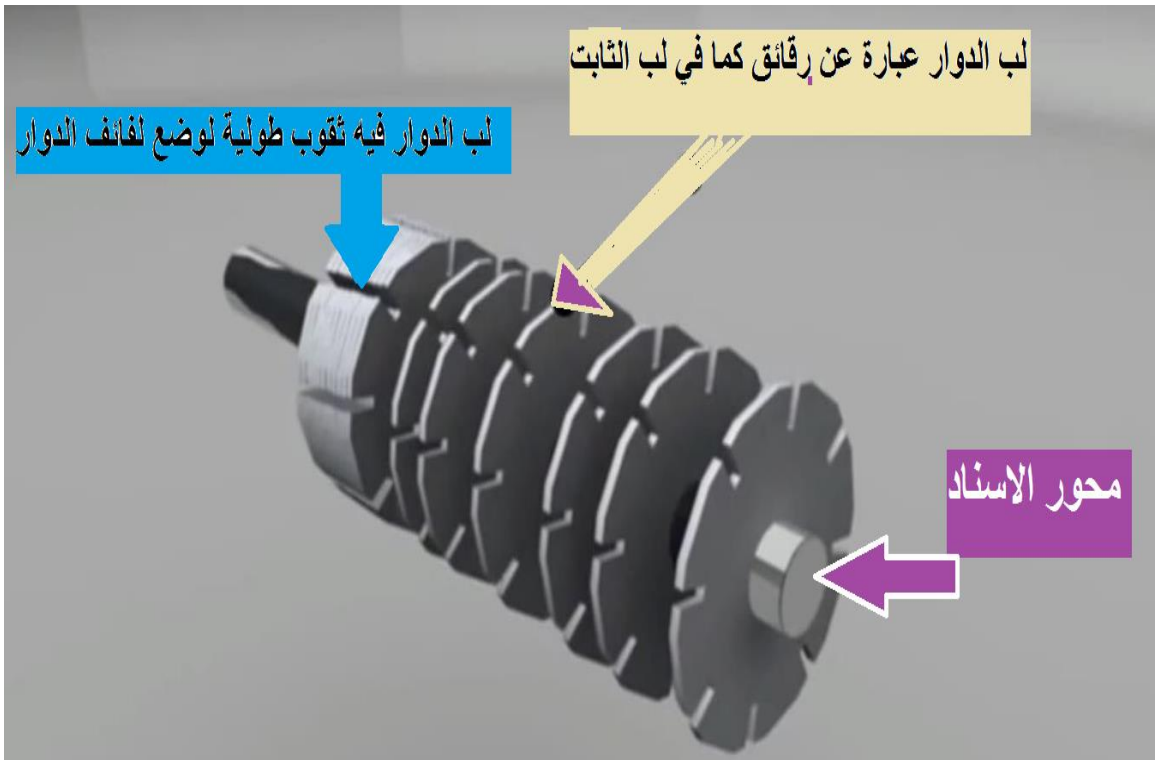
1- للتقليل من ازيز المجالات المغناطيسية وبالتالي تخفيض صوت المحرك.

2- لزيادة نسبة المحاثة بين ملفات الجزء الدوار وملفات الجزء الثابت.

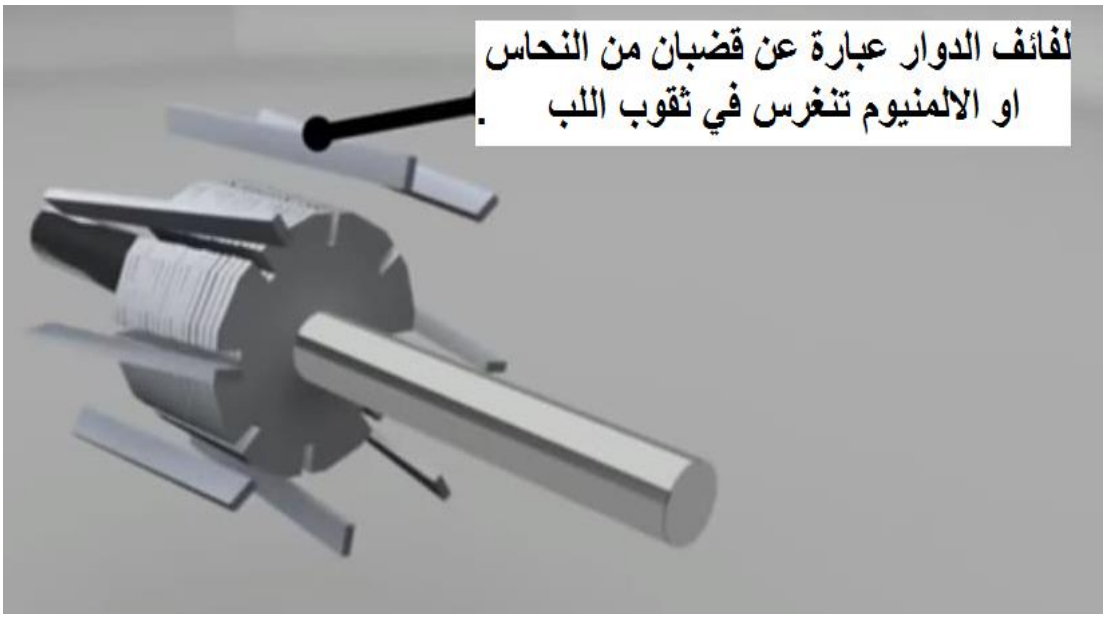
3- لاعطاء سن اللب للجزء الدوار القابلية للبقاء تحت سن اللب للجزء الثابت فترة اطول وذلك لزيادة قابلية السحب من المحرك.

4. **الاغطية الجانبية ومحور الاسناد المركزي :** التي تنقل القدرة الميكانيكية من المحرك للخارج كما موضح في الشكل (11.2).

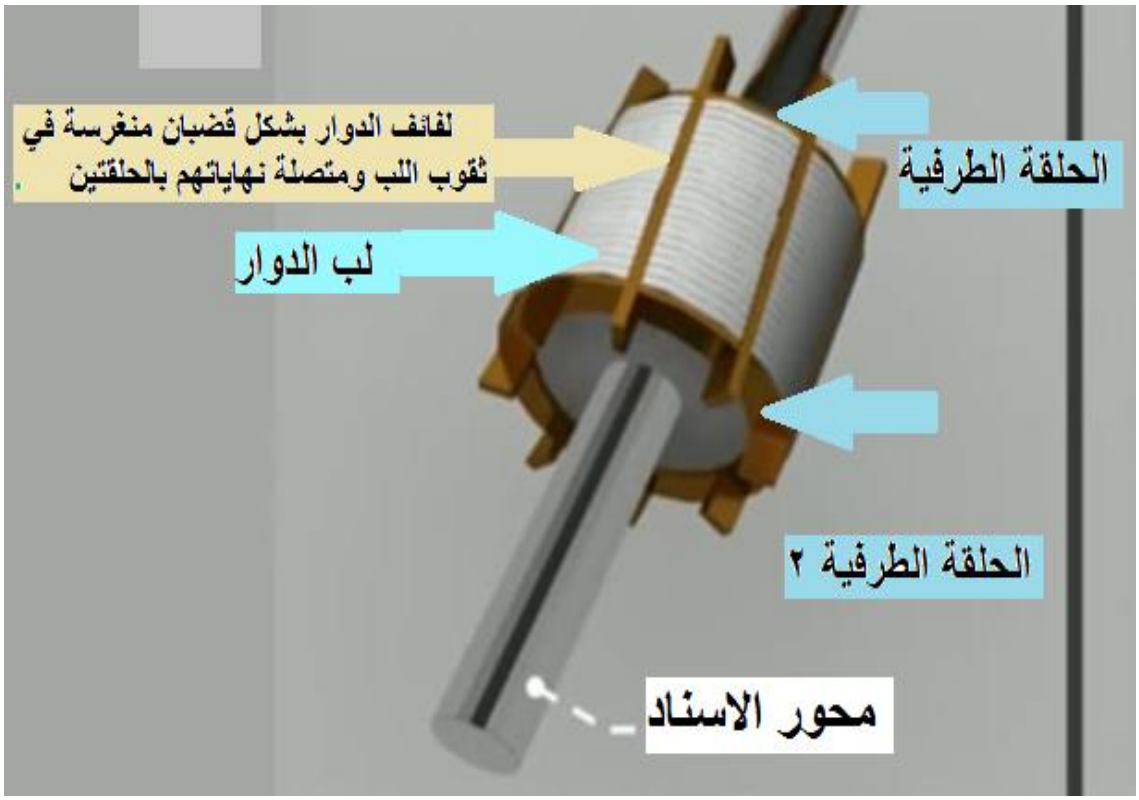
5. المروحة: يتصل بالمحور المركزي للجزء الدوار مروحة من معدن خفيف الوزن (المنيوم او بلاستيك)لدفع الهواء حول هيكل المحرك لزيادة التبادل الحراري بين المحرك والمحيط الخارجي كما موضح في الشكل (12.2)



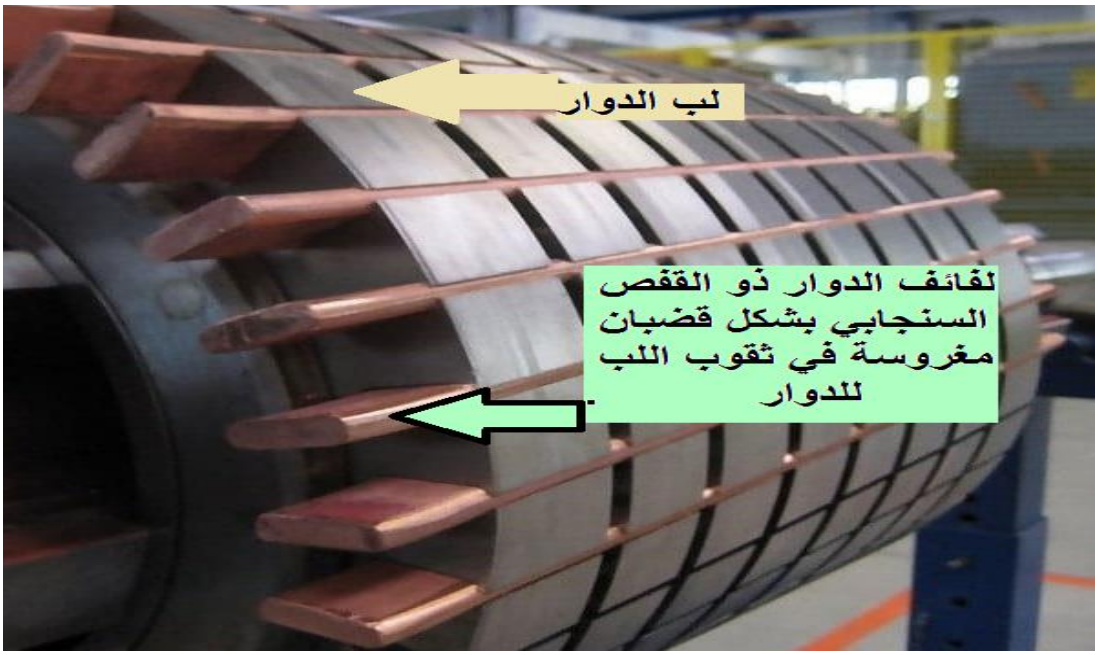
الشكل (7.2): **يوضح لب دوارالقفص السنجابي من ناحية اللب ومحور الاسناد**



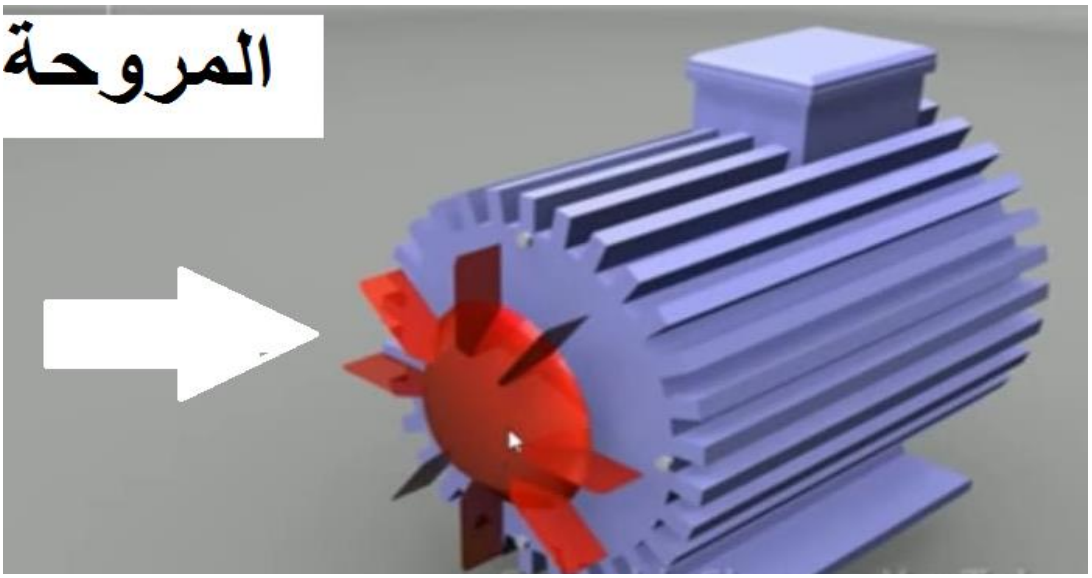
الشكل (8.2):لفائف الدوار ذو القفص السنجابي



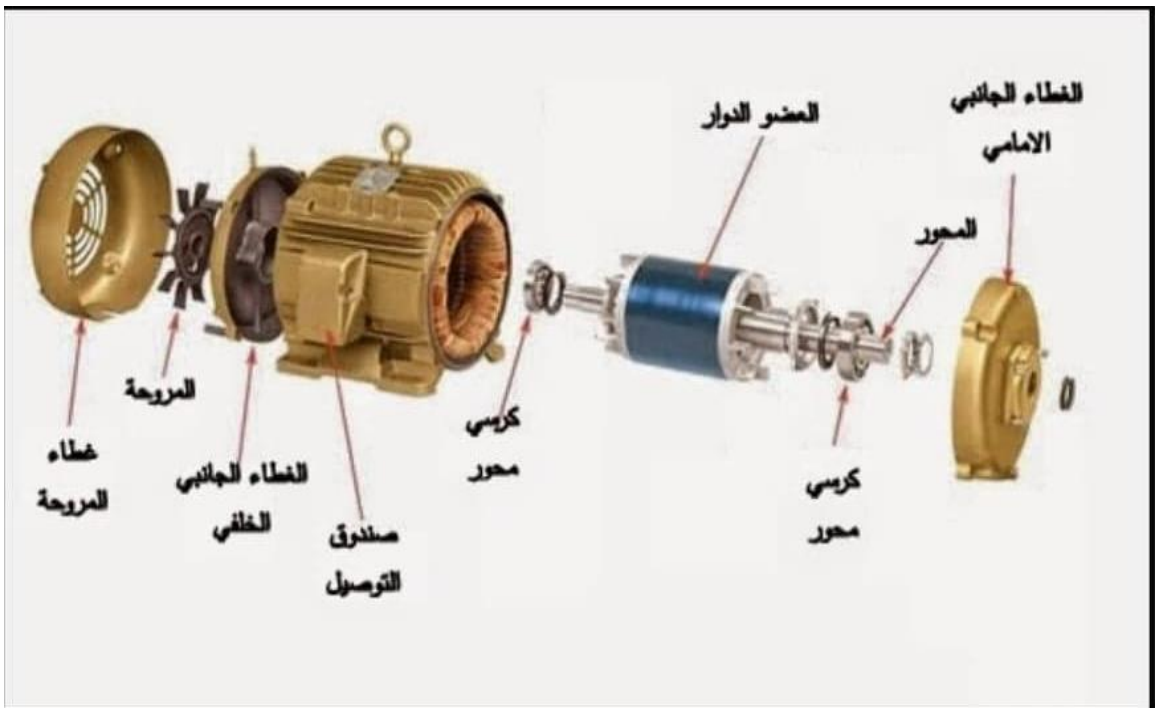
الشكل (9.2): لفائف الدوار ذو القفص السنجابي



الشكل (10.2):اللب والدوار ذو القفص السنجابي عمليا في ارض الواقع



الشكل (11.2): المروحة



الشكل (12.2): الاغطية الجانبية مع باقي اجزاء المحرك

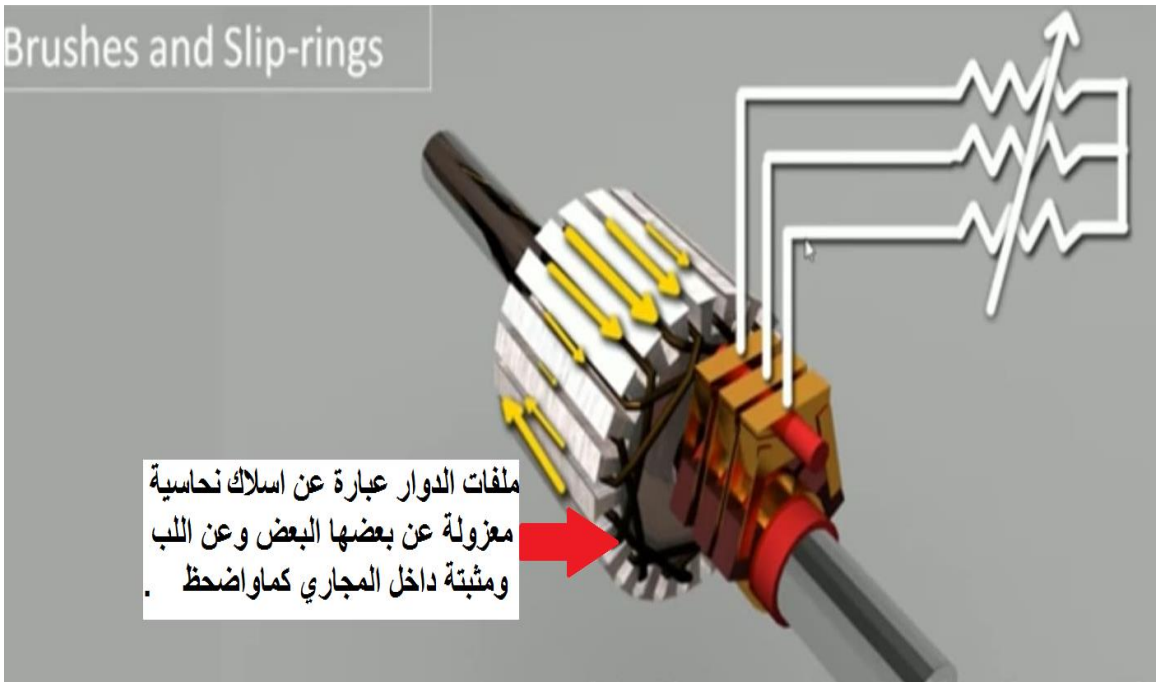
الدوار ذو اللفائف Wound Rotor:

لب الدوار وبقية الملحقات هي نفسها كما في محرك نوع القفص السنجابي عدا ملفات الدوار فهي تختلف هنا في المحرك الحثي الذي دواره بحلقات انزلاق او الدوار ذو اللفائف

2) ملفات الدوار:

- تتألف من اسلاك نحاسية بشكل ملفات مرتبة وفق حسابات خاصة معزولة عن بعضها البعض ومعزولة ايضا عن اللب ومثبتة داخل المجاري بشكل جيد لتقاوم تيارات القصر والقوة اللامركزية اثناء الدوران كماموضح في الشكل (13.2)
- تتصل نهايات ملفات الدوار بحلقات الانزلاق المصنوعة من سبيكة النحاس والمثبتة على محور الدوران (Shaft) ومعزولة عنه, حيث تعمل كحلقة وصل بين الدائرة الداخلية (ملفات الدوار) والدائرة الخارجية (مقاومة متغيرة او مصدر جهد عن طريق الفرش الجالسة على حلقات الانزلاق) كماموضح في الشكل (14.2), (15.2),(16.2)
- ملفات الدوار تربط نجمي او مثلثي تبعا للتصميم

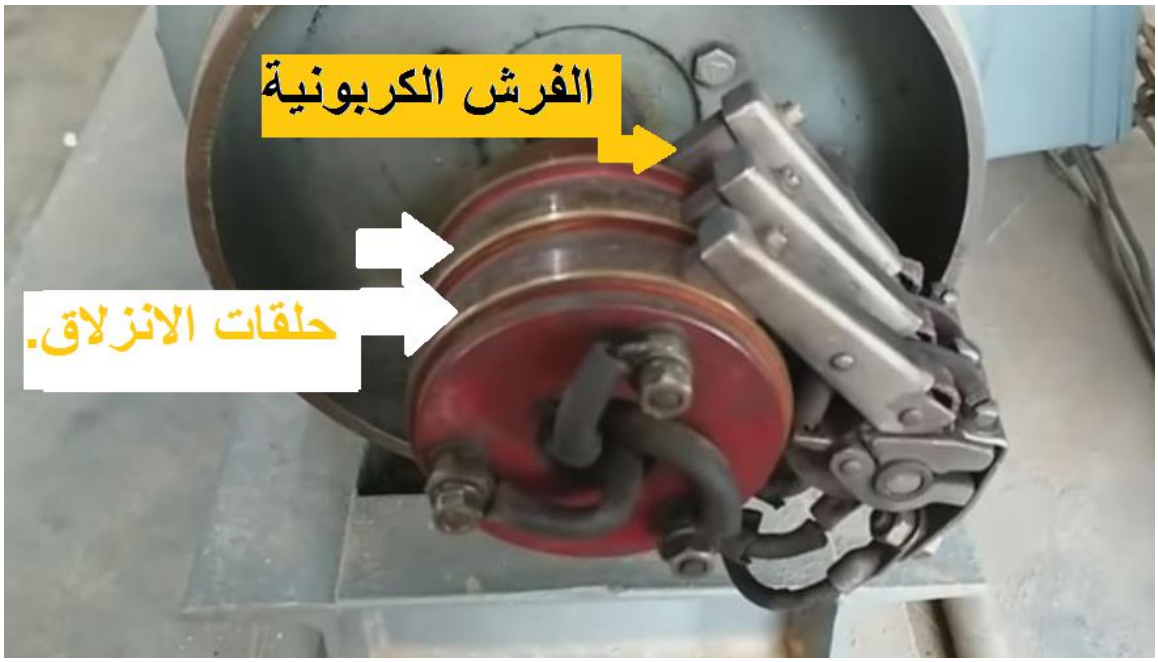
ملاحظة: النوعين يحتويان على الفجوة الهوائية (Air Gap): وهي المسافة بين لب الثابت ولب الدوار والتي يجب ان تكون متساوية لتحقيق الاقتران المتوازن بين الملفين



الشكل (13.2): دوار ذو اللفائف

الشكل (14.2):حلقات الانزلاق

الشكل (15.2): الفرش الكربونية



الشكل (16.2):**المحرك الحثي ذو اللفائف عمليا**

مثال1:

محرك حثي ذو ثلاثة اطوار من النوع الذي يحوي حلقات الانزلاق , القوة الدافعة الكهربائية (80V),احسب قيمة التيار لكل طور ومعامل القدرة عندما تكون :

1) **ملفات الانزلاق دائرة قصر**
2) **الجزء الدوار متصل بمقاومة على شكل النجمة قيمتها 3 Ω /ph**

علما ان :

$$\boldsymbol{R_2\backslash ph = 1\ \Omega} \qquad \boldsymbol{X_2\backslash ph = 4\ \Omega}$$

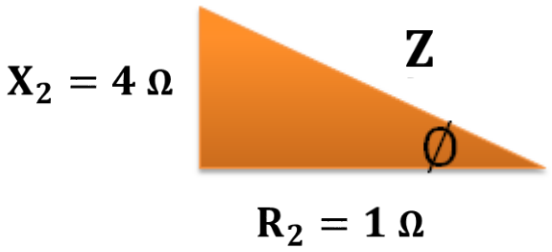
الحل:

1) عندما تكون ملفات الانزلاق دائرة قصر اذا ستبقى كل من X_2 , R_2 بنفس القيم, اذ لن تكون هناك مقاومة اضافية

وستكون القيمة الكلية هي قيمة Z كماموضح ادناه

$$Z = \sqrt{Req^2 + Xeq^2}$$

$$=\sqrt{17}Z = \sqrt{1^2+4^2}$$



وستكون قيمة التيار هي:

$$I = \frac{V_L \backslash \sqrt{3}}{\sqrt{17}} = \frac{V_{ph}}{Z} = 11.2\ \text{A}$$

$$\text{P. F} = \cos(\phi) = \frac{\text{المجاور}}{\text{الوتر}} = \frac{1}{\sqrt{17}} = 0.242, \quad \phi = 75.9\ \text{Degree}$$

2) الدوار متصل بمقاومة بمقدار 3 أوم وهنا ستكون المقاومة الكلية هي

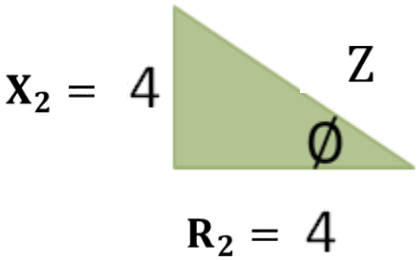
$$Req = R_2 + R = 1 + 3 = 4\ \Omega$$

وستكون الممانعة الكلية هي

$$=\sqrt{4^2 + 4^2} = \sqrt{16 + 16} = \sqrt{32}Z = \sqrt{Req^2 + Xeq^2}$$

$$I = \frac{Vph}{Z} = \frac{VL \backslash \sqrt{3}}{\sqrt{32}} = \frac{80 \backslash \sqrt{3}}{\sqrt{32}} = 8.1\ \text{A}$$

$$P.F = COS\emptyset = \frac{\text{المجاور}}{\text{الوتر}} = \frac{4}{\sqrt{32}} = 0.707, \phi = 75.9\ \text{Degree}$$



مثال 2 : **محرك حثي ثلاثي الاطوار ذو اربعة اقطاب يعمل بجهد طور مقداره 220 V و تردد 50 Hz، يسحب تيار مقداره 75 A عند معامل قدرة 0.85 متأخر. فاذا كانت سرعة المحرك 1470 rpm عند الحمل التام ومفاقيد الجزء الثابت (المفاقيد النحاسية وفقد اللب) تساوي 3 kW والمفاقيد الميكانيكية بسبب الاحتكاك هي 2 kW، احسب الاتي :**

1- **معامل الانزلاق عند الحمل اعلاه**
2- **قدرة الاخراج الحصانية B.H.P للمحرك**
3- **كفاءة المحرك**
4- **عزم الدوران المتولد عند السرعة التزامنية وعزم محور الدوران عند سرعة الجزء الدوار للمحرك**

الحل:

-1

$$n_s = \frac{120*f_s}{p} = \frac{120*50}{4} = 1500\ rpm\ =$$

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500-1470}{1500} = 0.02\ \%$$ (معامل الانزلاق عند الحمل التام)

-2

$$P_{in} = 3V_{ph}I_{ph}\cos(\theta)$$

$$P_{in} = 3 * 220 * 100 * 0.8 = 42075 = 42.075\ kW$$ (قدرة الادخال للجزء الثابت)

$$P_g = P_{in} - P_{losses} = 42075 - 3000 = 39.075\ kW$$ (القدرة المنتقلة للفجوة الهوائية)

$$P_m = P_g(1 - S) = 39075 * (1 - 0.02) = 38.294\ kW$$ (القدرة الميكانيكية المتولدة)

$$P_{out} = P_m - P_f = 38294 - 2000 = 37.294\ kW$$ (قدرة الاخراج للجزء الدوار)

$$B.H.P = \frac{P_{out}}{746} = \frac{37294}{746} = 49.99$$ (قدرة الاخراج الميكانيكية)

-3

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}\ 100\ \% = \frac{37294}{42075}\ 100\ \% = 88.64\ \%$$ (كفاءة المحرك)

-4

(عزم الدوران المتولد عند السرعة التزامنية)

$$T_g = \frac{60\ P_g}{2\ \pi\ n_s}\ \frac{60 * 39075}{2 * \pi * 1500} = 248.759\ \text{N-m}$$

(عزم محورالدوران عند سرعة الجزء الدوار للمحرك)

$$T_m = \frac{60\ P_{out}}{2\ \pi\ n_r}\ \frac{60 * 37075}{2 * \pi * 1470} = 240.84\ \text{N-m}$$

الفصل الثالث

المحركات الحثية احادية الطور

المحرك الحثي احادي الطور:

ان عدد المكائن التي تعمل بمصـــدر ذو طور واحد يفوق جميع الانواع الاخرى مجتمعة وله عدة خصائص هي:

1) **صغير الحجم لذلك يمتاز بالبساطة الا ان تحليله معقد جدا**
2) **يعمل عند معاملات قدرة منخفضة**
3) **يستخدم في مقاسات صغيرة وفي مدى كسور القدرة الحصانية**
4) **غيركفوء اذا ماقورن بالمحركات الحثية ثلاثية الطور**

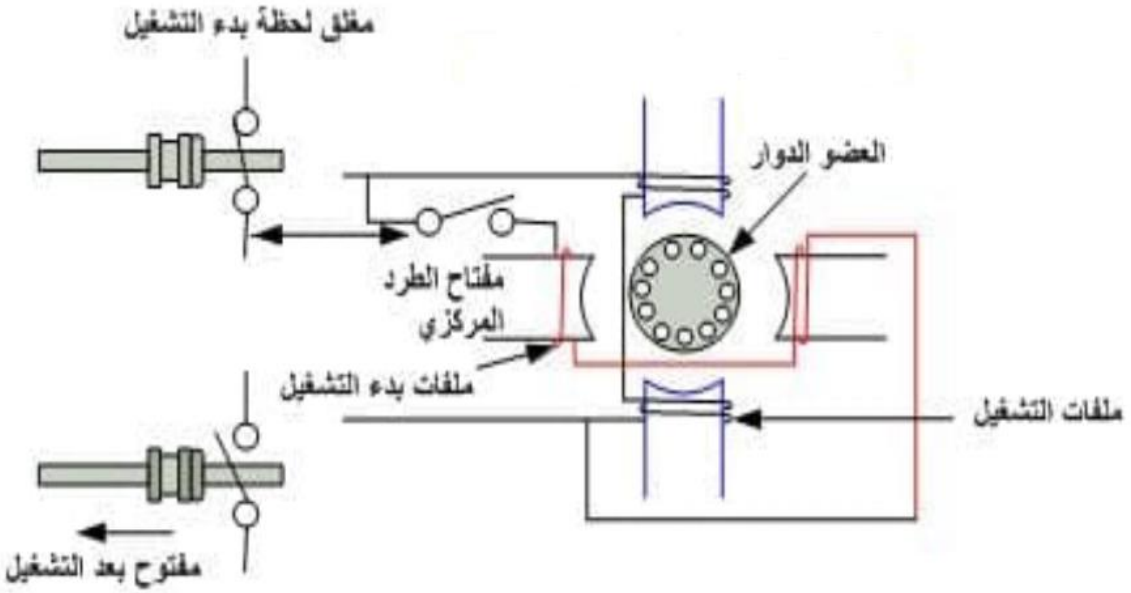
- يستخدم في الغسالات ومجففات الشعر والمراوح وشافطات الغبار وغيرها من الاجهزة البسيطة

1/ التركيب:

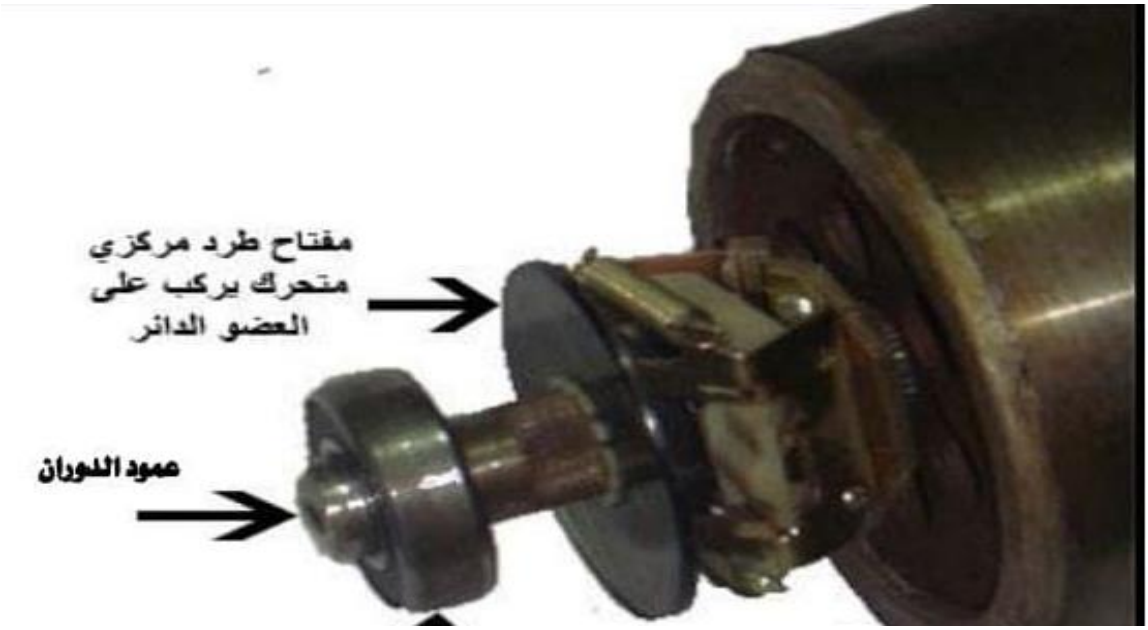
1) **الجزء الثابت:** يتكون من ملف واحد فقط يسمى بالملف الاساسي (Main Winding)
2) **الجزء الدوار:** اغلب انواع جزء دوار المحرك الحثي احادي الطور هي من نوع القفص السنجابي
3) **مفتاح الطرد المركزي:** يوضـــع داخل المحرك ويقوم بفصـــل ملفات البدء عن المصـــدر اوتوماتيكيا عندما تصل سرعة المحرك (75%) من سرعة الحمل التام

اولا: مفتاح الطرد المركزي:

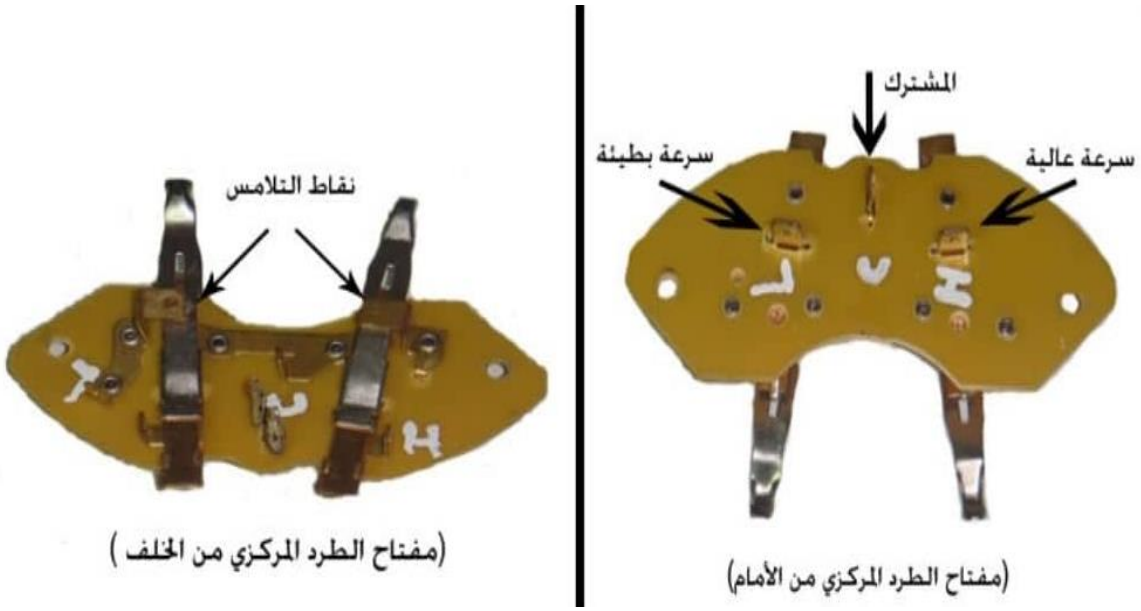
يتكون مفتاح الطرد المركزي من قطعتين احداهما متحركة تربط بالدوار والاخرى ثابتة تربط بـالغطـاء الجـانبي للمحرك وتتكون من نقـاط تلامس مع القطعـة الاولى المتحركـة . عنـدمـا يكون المحرك في حالة سـكون فان نقطتي التلامس متصـلتان مع بعضـهما البعض بفعل الضـغط الواقع عليها من القطعة الاولى الثابتة الموضـوعة على الدوار . وعندما يدور الدوار وتصـل سـرعته الى (75%) من السـرعة الكاملة يرفع الضـغط من قبل القطعة الثابتة نتيجة الحركة والطرد المركزي تاركا لهما حرية الانفصـال وبذلك تنفصـل ملفات البدء عن ملفات التشـغيل كماموضـح في الشـكل (1.3) و (2.3) و (3.3) و (4.3)



الشكل (1.3)



الشكل (2.3): الجزء الاول (المتحرك) لمفتاح الطرد الركزي



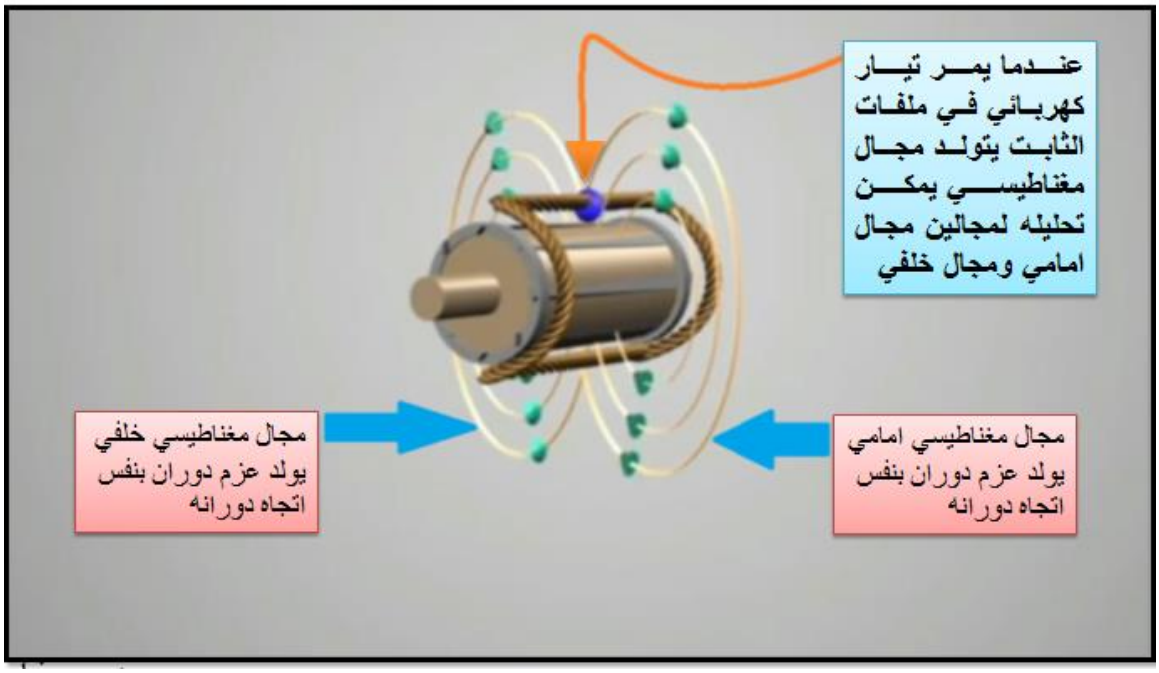
الشكل (3.3): الجزء الثاني (الثابت) من مفتاح الطرد المركزي

الشكل (4.3):الجزء الثاني (الثابت)من مفتاح الطرد المركزي مركب على احد اغطية المحرك

2/ مبدأ العمل:

عندما يمرتيارمن مصـدر التغذية في ملف الجزء الثابت سـوف يتولد مجال مغناطيسـي يمكن تحليلة الى مجالين مغناطيسيين (مجال امامي ومجال خلفي) يدوران بنفس السرعة لكن متعاكسين بالاتجاه وكل مجال سيولد عزم دوران في الاتجاه الذي يدور فيه.

وفي حالة سـكون الجزء الدوار وعند بدء الحركة يكون عزم الدوران الناتج من المجال الامامي والمجال الخلفي متسـاويان لكنهما متضـادان بالاتجاه لذلك تكون المحصـلة صـفر ولايعمل المحرك لذلك يحتاج لطريقة مساعدة للبدء, كماموضح في الشكل (5.3).



الشكل (5.3)

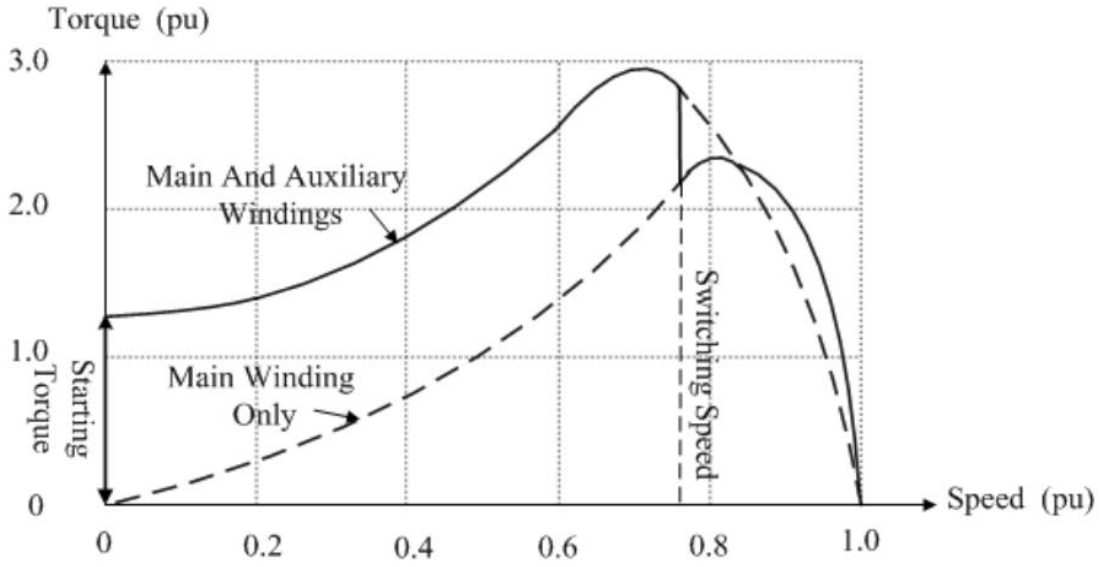
تصنف المحركات الحثية احادية الطور طبقا للطريقة المستخدمة لبدء حركتها لعدة انواع منها:

1- المحرك الحثي ذو الطور المنقسم:

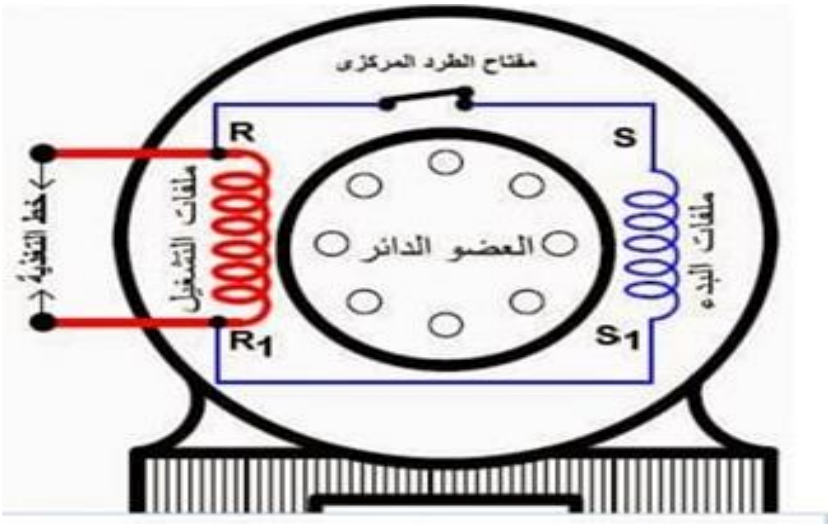
في هذا المحرك تم اضافة ملف مساعد (يسمى ايضا ملف بدء الحركة) للملف الاساسي كماموضح في الشكل (7.3) (8.3) وعلى بعد 90 درجة كهربائية ويوصلان على التوازي مع المصدر احادي الطور ويكون اختلاف الزاوية بين تياري الملفين كبيرممايجعل المحرك يعمل كمحرك ذو طورين بالتالي يعمل التياران على انتاج مجال دوار يجعل المحرك ذو حركة ذاتية ويكون الملف الاسـاسـي ذو مقاومة صـغيرة ومحاثة عالية على عكس الملف المسـاعد الذي يكون ذو مقاومة عالية ومحاثة

صـــــغيرة . يكون العزم الابتدائي 150-200% من عزم الحمل التام مايقابل تيار بدء بين (6-8) مرات من تيار الحمل التام. ولعكس اتجاه دوران هذا المحرك نعكس فقط اتجاه التيار في احد الملفين .

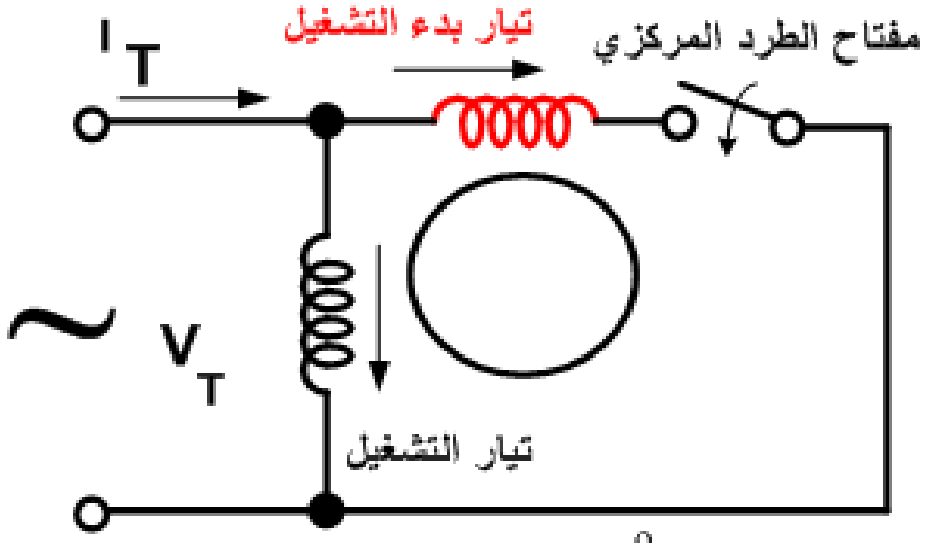
الشـــكل (6.3) يبين منحنى خواص الســـرعة مع العزم حيث يبدأ المحرك حركته بالملفين معا ثم تفصـل الملفات المسـاعدة باسـتخدام مفتاح الطرد المركزي عندما تصـل سـرعة المحرك الى حوالي (75%) من سرعة التزامن ويستمر المحرك بعدذلك في الدوران بالملف الرئيسي.



الشكل (6.3):العلاقة بين العزم والسرعة



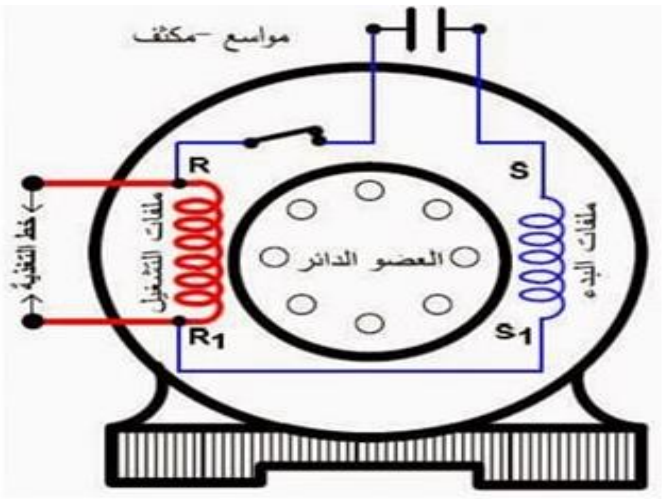
الشكل (7.3)



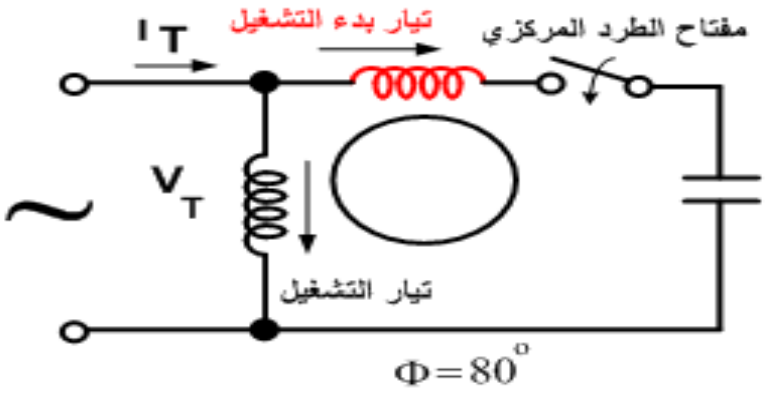
الشكل (8.3):الدائرة المكافئة

2/ المحرك الحثي ذو متسعة البدء

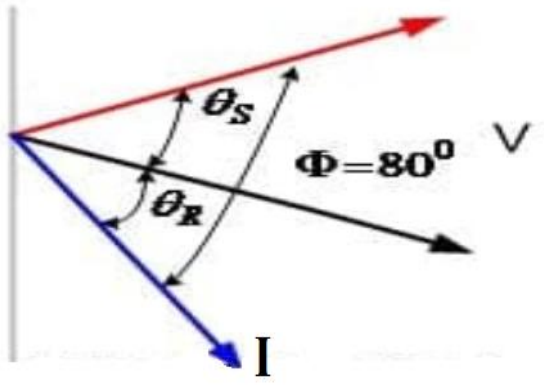
في هذا النوع يضـــاف للملف المســـاعد (ملف بدء الحركة) متســـعة للحصـــول على زاوية الطور المطلوبة وتوضـع المتسـعة خارج المحرك (المتسـعة منفصـلة عن المحرك) كما موضـح في الشـكل (9.3) و (10.3). ان مخطط المتجهات في الشـكل (11.3) يوضـح تقدم التيار على الجهد بسـبب وجود المتسعة ممايسبب ايضا زيادة في زاوية الطور بين تيار البدء والتيارالاساسي (تيار التشغيل) بالتالي العزم الابتدائي سـيزيد ايضـا اذ وصـلت قيمته (450-400%) من قيمة عزم الحمل التام. ايضـا في هذا النوع يتم فصـل الملف المسـاعد باسـتخدام مفتاح الطرد المركزي عندما تصـل سـرعة المحرك الى حوالي (75%) من ســـرعة التزامن ويســـتمر المحرك بعدذلك في الدوران بالملف الرئيسي. من اهم خصائصه العزم الكبير المتولد عند بدء الحركة. يستخدم هذا النوع في الضواغط والمضـــخات والثلاجات واجهزة التبريد والتكييف وفي الاحمال التي تتطلب عزما كبيرا لبدء حركتها.



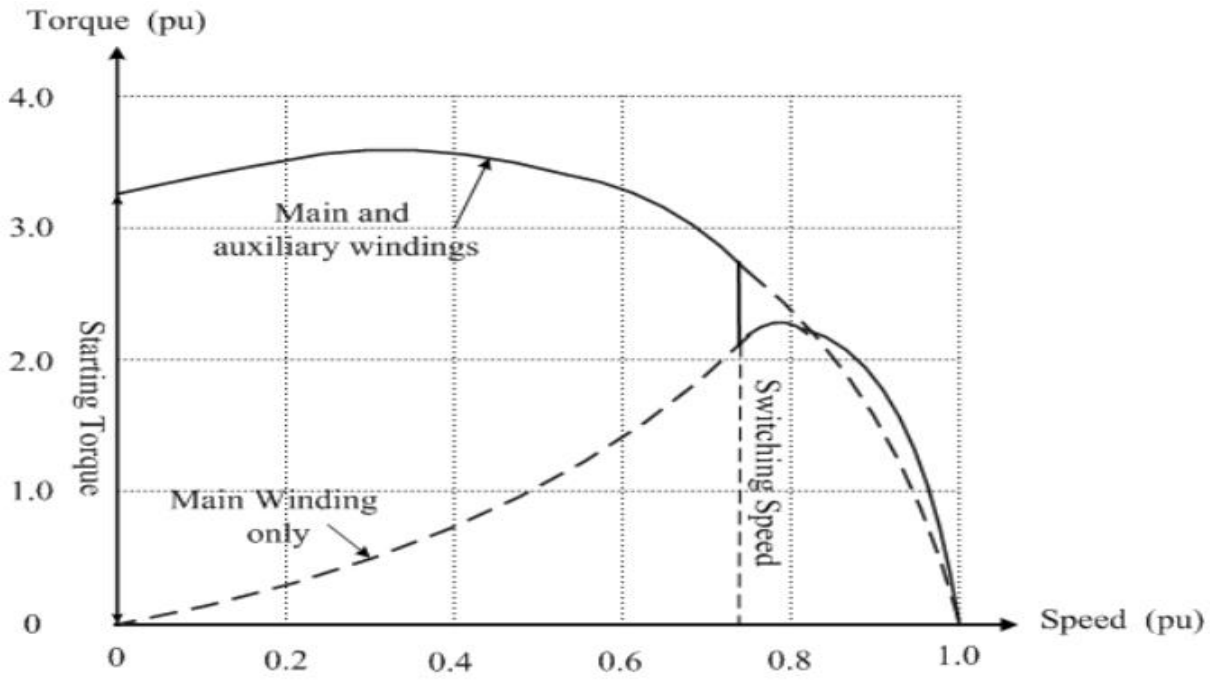
الشكل (9.3)



الشكل (10.3)



الشكل (11.3):مخطط المتجهات للمحرك الحثي ذو متسعة البدء

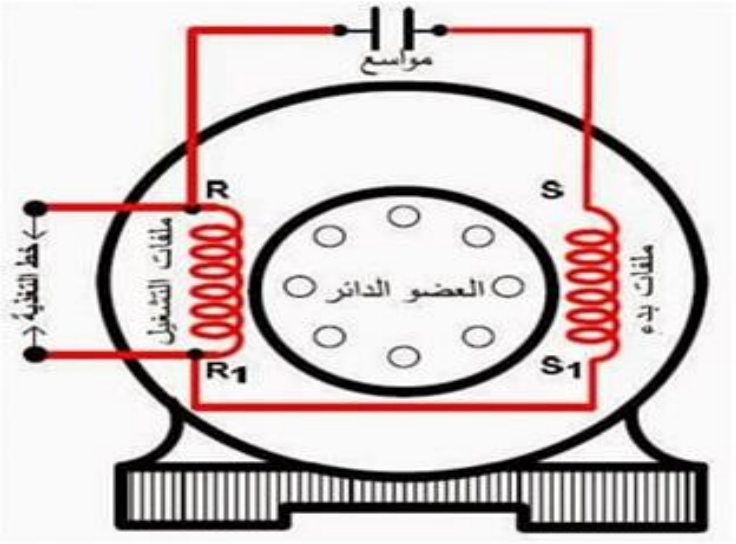


الشكل (12.3): العلاقة بين السرعة والعزم

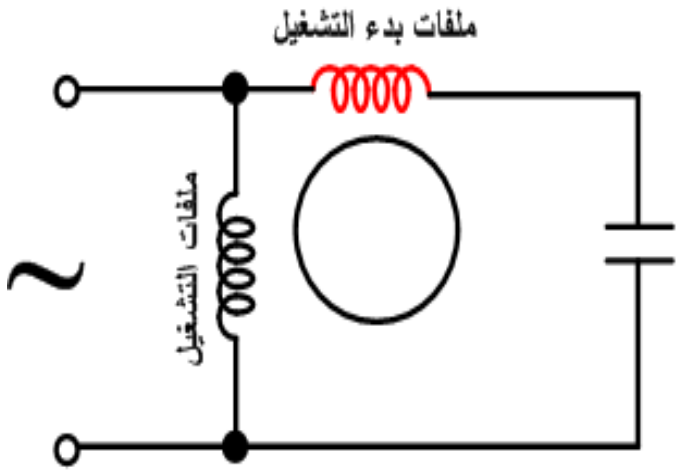
الشـــكل (12.3) يبين منحنى خواص الســـرعة مع العزم حيث يبدأ المحرك حركته بالملفين معا ويلاحظ العزم الكبير المتولد عند بدء الحركة ثم تفصـــل الملفات المســـاعدة باســـتخدام مفتاح الطرد المركزي عندما تصل سرعة المحرك الى حوالي (75%) من سرعة التزامن ويستمر المحرك بعد ذلك في الدوران بالملف الرئيسي.

3/ المحرك الحثي ذو متسعة البدء والدوران:

نفس النوع السابق تماما لكن الفرق هنا في ان المتسعة تبقى متصلة بالمحرك طوال الوقت (اي لاينفصل الملف المساعد بعد وصول سرعة المحرك الى 75% من سرعة الحمل التام وذلك لانه لايستخدم في هذا النوع مفتاح الطرد المركزي كماموضح في الشكل (13.3) و (14.3)



الشكل (13.3)



الشكل (14.3)

اما مميزات هذا النوع فهي:

1. يحسن سعة المحرك لاعظم حمل
2. يحسن عامل القدرة
3. يحسن قيمة الكفاءة.
4. يحسن قيمة العزم الابتدائي

الفصل الرابع

المولدات التزامنية ثلاثية الطور

Synchronous Generator

مقدمة:

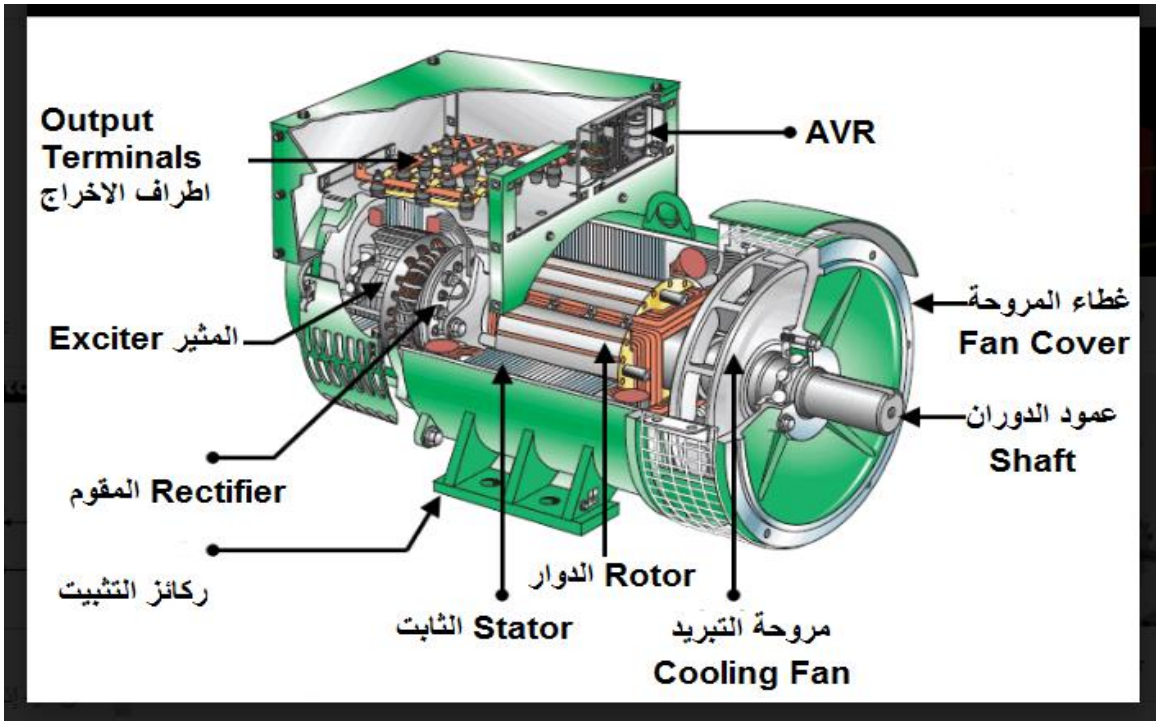
ان اكثر من 98% من الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم يتم توليدها باستخدام الالة التزامنية فهي الاكثر استخداما لغرض تحويل الطاقة الميكانيكية الى كهربائية. والالة التزامنية كما انها تستخدم كمولد تزامني تستخدم كمحرك تزامني ايضا. سميت هذه الالة بالالة التزامنية بسبب التزامن التام بين سرعة دوران المجال المغناطيسي الناشئ في الجزء الدوار وسرعة الدوران الميكانيكية للجزء الدوار.

1.4 تركيب الالة التزامنية ثلاثية الاطوار:

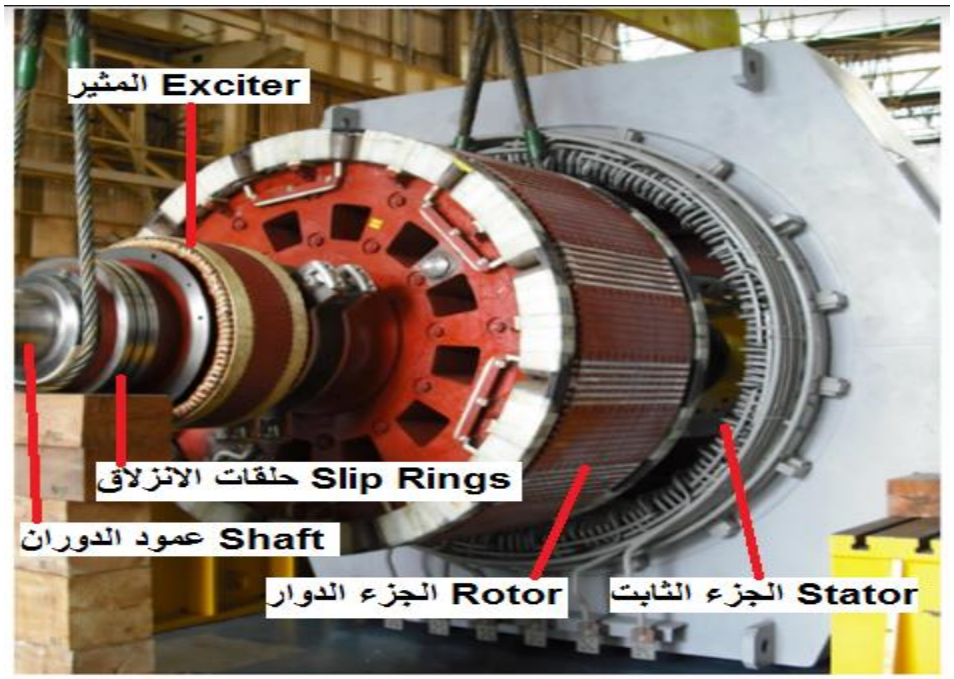
كأي الة كهربائية تتركب الالة التزامنية (Synchronous Machine) من جزئين أساسيين هما الجزء الثابت والجزء الدوار, احدهما يحمل ملفات انتاج الطاقة الكهربائية ولذلك يسمى بالمنتج (Armature) والاخر يحمل ملفات المجال المغناطيسي, ويفضل ان تكون ملفات انتاج الطاقة الكهربائية مركبة على الجزء الثابت بينما ملفات المجال المغناطيسي مركبة على الجزء الدوار وذلك لعدة اسباب:

1. التيار المسحوب من المصدر كبير لذا يفضل ان يؤخذ مباشرة وليس عن طريق حلقات الانزلاق.
2. التخلص من حلقات الانزلاق اوتقليلها الى (2) بدلا عن (6) حلقات.
3. سهولة تبريد ملفات انتاج الطاقة الكهربائية اذا كانت ثابتة.
4. حماية ملفات انتاج الطاقة الكهربائية من قوة الطرد المركزي بسبب وزنها الكبير.

بالاضافة الى اجزاء اخرى تحتويها الالة التزامنية كعمود الدوران, حلقات الانزلاق, (AVR) (يغذي المولد المساعد), مولد مساعد (يغذي الجزء الدوار بالتيار الكهربائي), (Rectifier) المقوم (يحول التيارالمتردد الناتج من المولد المساعد الى تيار مستمرليحقن الى الجزء الدوار), الهيكل الخارجي ,الاغطية الجانبية, مروحة التبريد, ركائز التثبيت وغيرها, كما موضح في الشكل (1.4), (2.4)



الشكل (1.4):تركيب المولد التزامني

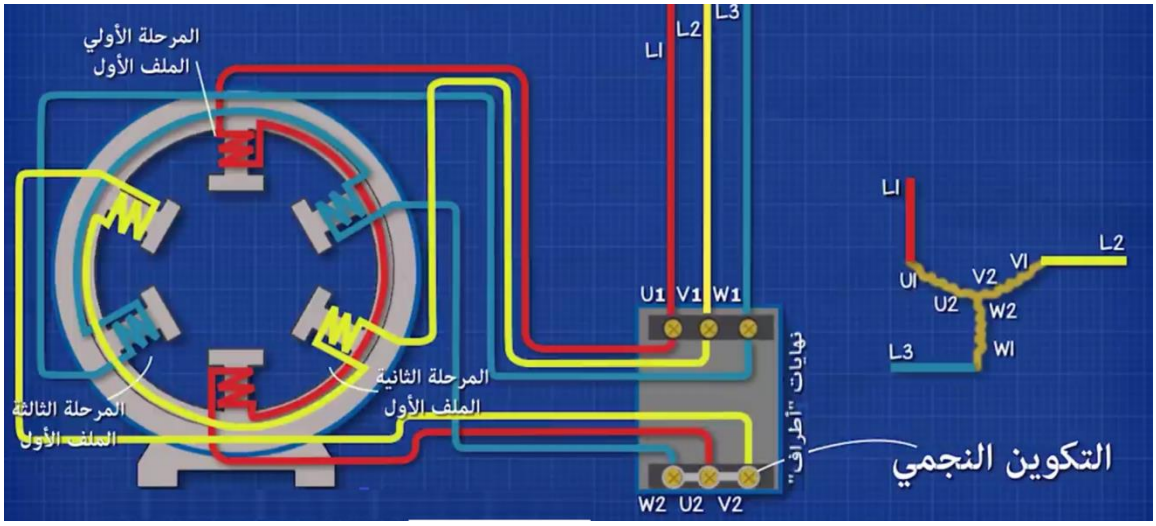


الشكل (2.4): المولد التزامني في الواقع

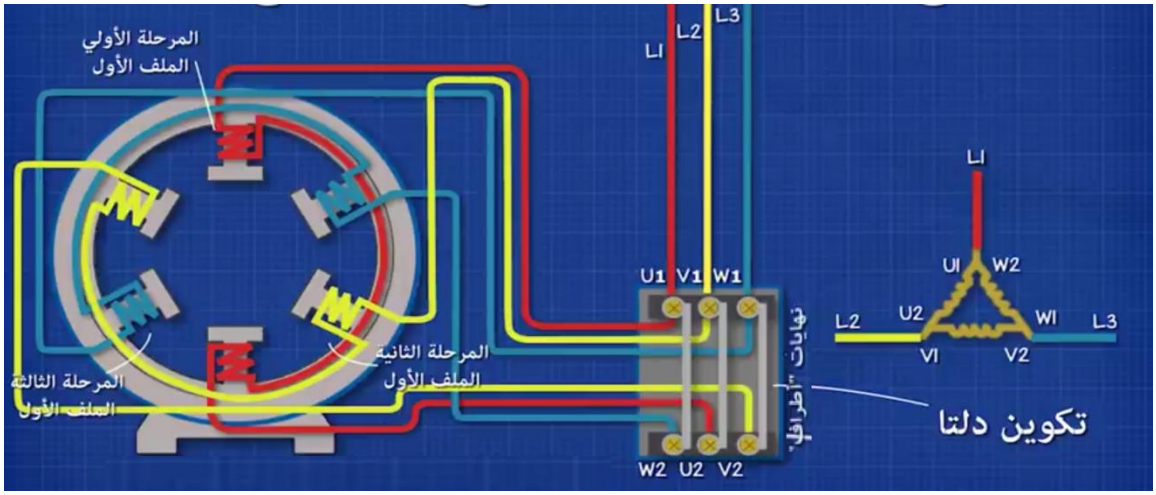
2.4 الجزء الثابت:

الجزء الثابت في الالة التزامنية مشابه تماما للجزء الثابت في المحرك الحثي ثلاثي الطور حيث يتكون ايضا من رقائق الفولاذ المطروق او سبيكة الفولاذ والسليكون والمرصوصة لبعضها البعض والمعزولة بطبقة من مادة عازلة بحيث تشكل اسطوانة مجوفة حافاتها مجاري توضع بداخلها ملفات الاطوار الثلاثة وفق حسابات دقيقة بحيث يخرج في النهاية ستة اطراف يمكن توصيلها على شكل نجمة او دلتا كما موضح في الشكل (3.4),(4.4),(5.4).

الشكل (3.4):الجزء الثابت في الواقع



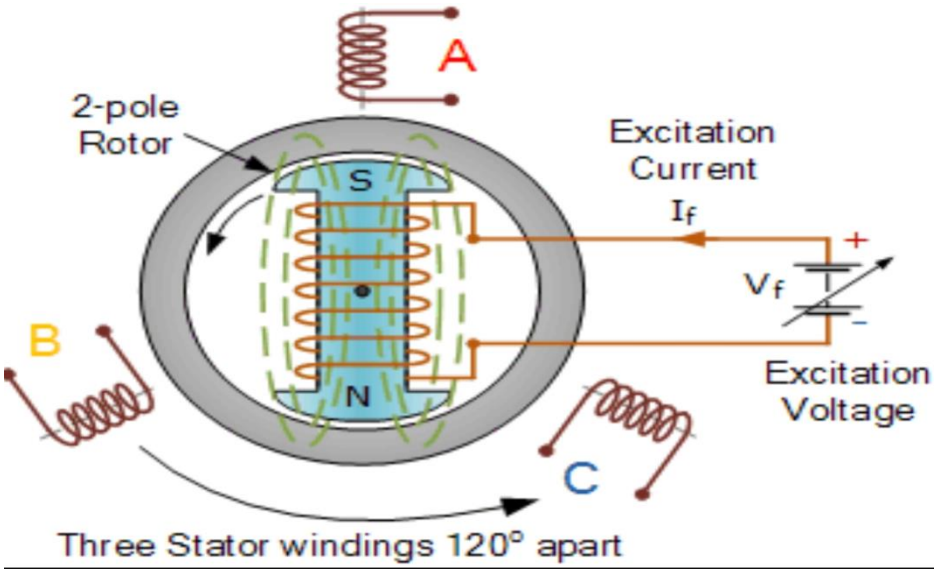
الشكل (4.4): الربط النجمي



الشكل (5.4): ربط الدلتا

3.4 الجزء الدوار:

يحمل الجزء الدوار ملفات المجال المغناطيسي ويغذى بتيار مستمر عن طريق مولد مساعد بواسطة حلقات الانزلاق احيانا كماموضح في الشكل (6.4), اما طريقة اللف فهي مشابهة لطريقة لف اقطاب الجزء الثابت في مكائن التيار المستمر بحيث يحمل كل قطب ملف واحد ثم توصل ملفات الاقطاب على التوالي وفي النهاية يخرج طرفان فقط الى حلقتي الانزلاق لتغذية الملفات بالتيار المستمر كماموضح في الشكل (11.4).

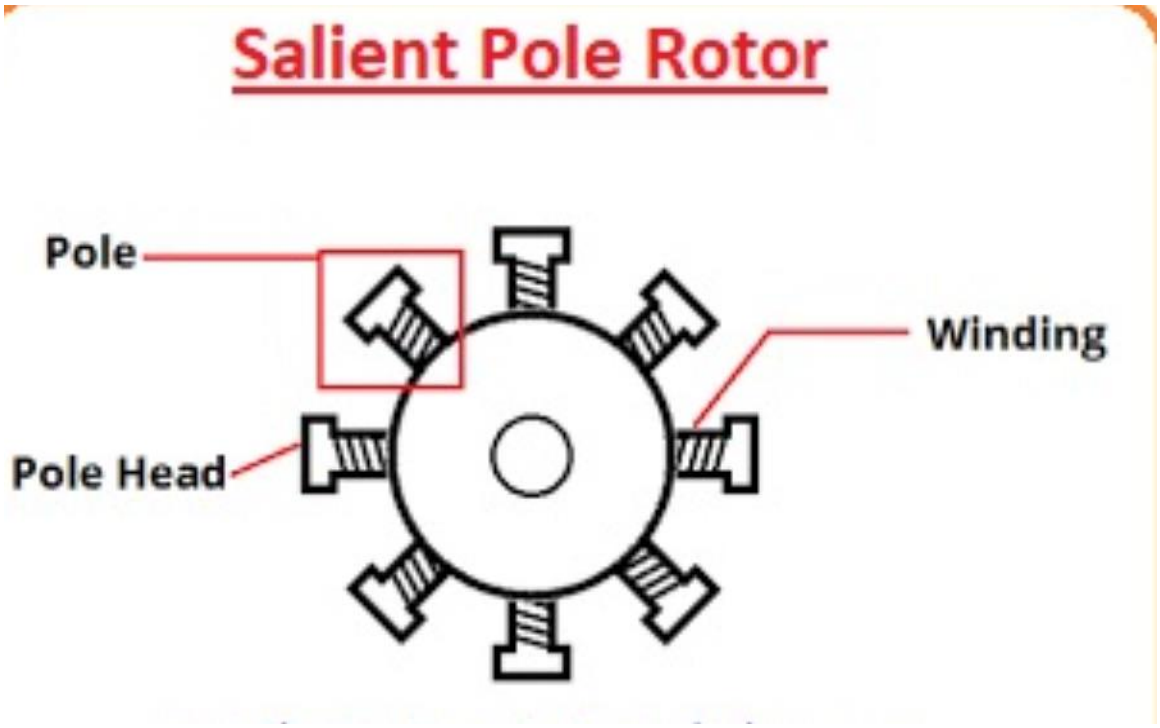


الشكل (6.4):المجال المغناطيسي في الجزء الدوار

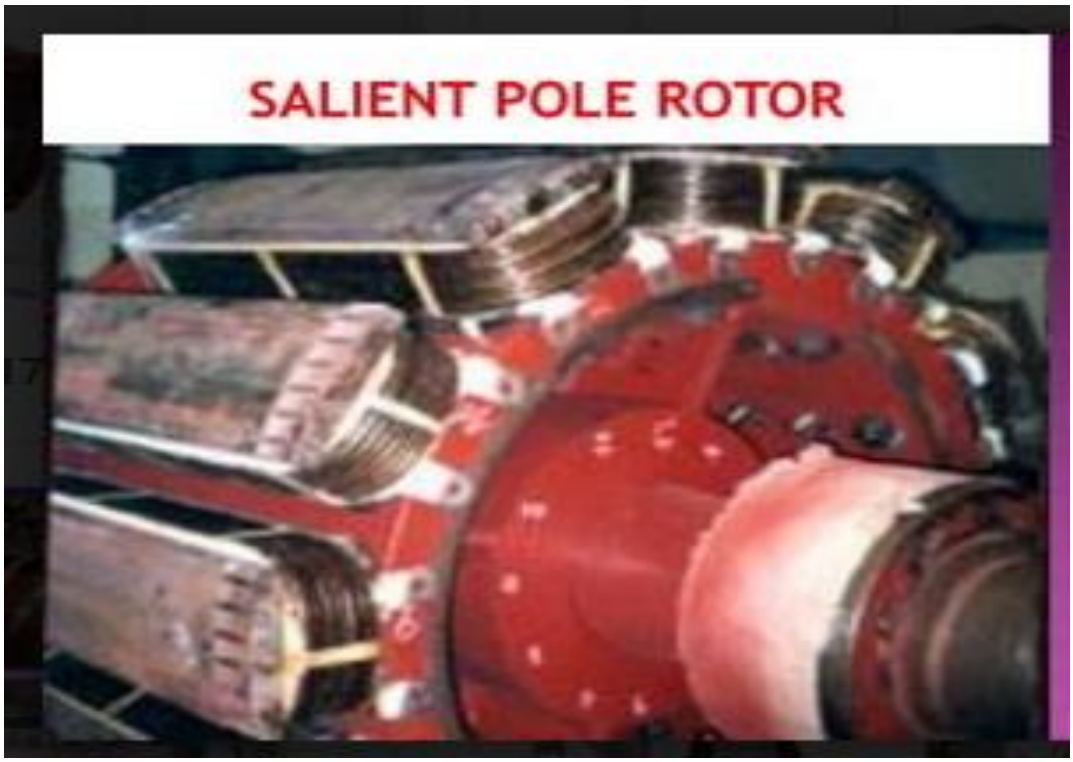
وهناك نوعان من الجزء الدوار هما:

1) **دوار ذو اقطاب بارزة (Salient Pole Rotor):**

يستخدم مع الالات التزامنية ذات السرعات المنخفضة كالالات المركبة على مساقط المياه لان سرعتها تقل عن (1000 دورة\ دقيقة) ولاتستعمل الاقطاب البارزة مع السرعات العالية لان الاقطاب البارزة تسبب تيارات هوائية داخل الالة وينتج عنها صوت عال وتسبب مقاومة للحركة بالاضافة الى القوة الطاردة التي تجعل من اللازم عمل احتياط كافي لحفظ الاقطاب في مكانها عند السرعات العالية ويكون هذا النوع مزودا بقضبان من النحاس(Dampers) وتكون ذو دائرة قصر من كل من الطرفين وهذه مفيدة لتقلل من الصوت العالي وايضا تحسن مقدار العزم الابتدائي في حالة عمل الالة كمحرك كماموضح في الشكل (7.4) و (8.4).

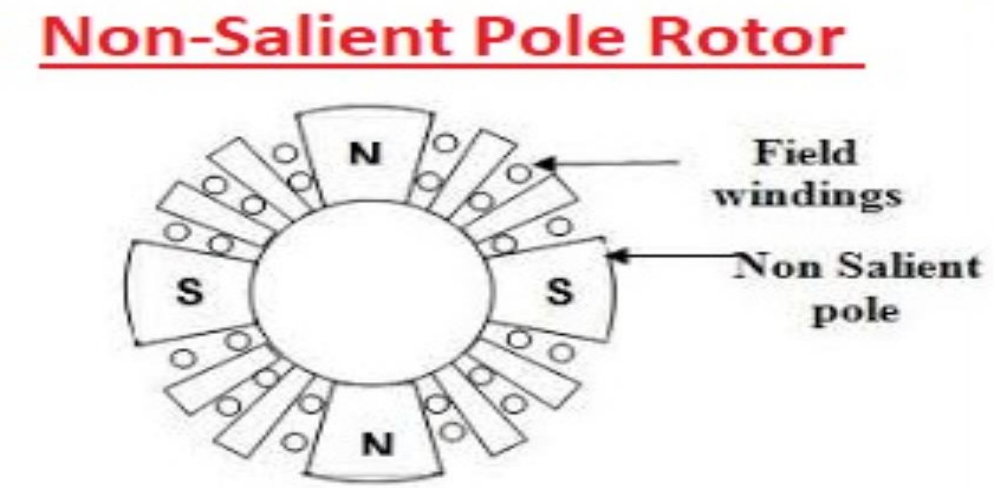


الشكل (7.4): الدوار ذو الاقطاب البارزة

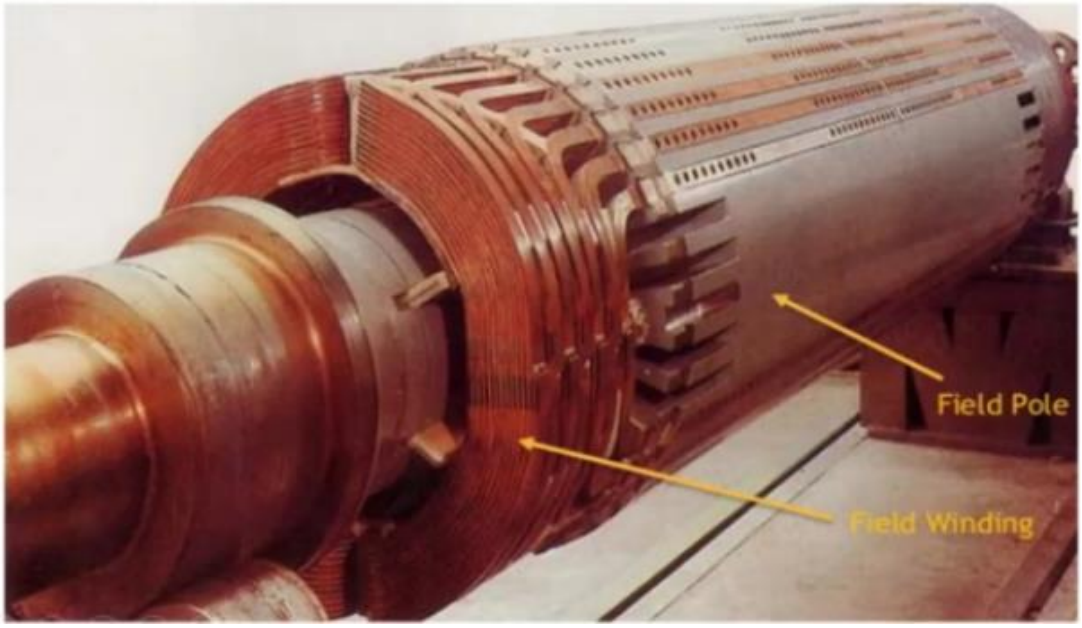


الشكل (8.4): الدوار ذو الاقطاب البارزة في الواقع

2) **<u>دوار اسطواني (Cylindrical Rotor):</u>** يستخدم مع الالات التزامنية ذات السرعات العالية التي تدار بواسطة توربينات غازية او بخارية حيث تكون السرعة (1500, 1800, 3000, 3600 دورة\ دقيقة) حسب التردد المطلوب وعدد الاقطاب, يصنع الجزء الدوار في هذا النوع من كتلة من الصلب فيها مجاري لوضع الملفات التي تحفظ في مكانها بواسطة البرونز الفسفوري كما موضح في الشكل (9.4), (10.4). ويلاحظ انه يجب ان تكون عدد اقطاب الجزء الدوار مساويا لعدد الاقطاب في الجزء الثابت. وعادة ما تكون عدد الاقطاب بين (2) و(6) .



الشكل (9.4): تركيب الدوار الاسطواني



الشكل (10.4): الدوار الاسطواني في الواقع

4.4 كيفية عمل المولد التزامني:

في البداية يدار الجزء الدوار للالة التزامنية بواسطة وسيلة تدوير مناسبة (محرك ديزل- توربينة غازية او بخارية او مائية) وعندما تصل سرعة الجزء الدوار الى السرعة التزامنية يتم تغذية ملفات الجزء الدوار بالتيار المستمر بواسطة مولد خاص مركب على نفس العمود يسمى بالمثير (Exciter) او عن طريق حلقتي انزلاق ان كان من مولد خارجي , حيث يحول التيار المتردد الناتج من المولد المساعد الى تيار مستمر بواسطة المقوم (Rectifier) ثم يحقن الى الجزء الدوار كما موضح في الشكل (11.4) و (12.4) و (13.4), بالتالي عندما يمر تيار في ملفات الدوار وحسب قانون فاراداي

سينشأ مجال مغناطيسي دوار في الثغرة الهوائية يدور بنفس السرعة الميكانيكية للجزء الدوار (السرعة التزامنية) ولذلك سميت هذه الالة بالالة التزامنية.

بعد ذلك المجال المغناطيسي الدوار سيقطع ملفات الجزء الثابت ليولد فيها قوة دافعة كهربائية متناوبة طبقا لمبدأ الحث الكهرومغناطيسي. هذه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في المنتج (الجزء الثابت) ستكون قوة دافعة كهربائية ثلاثية الاطوار بين كل طور و اخر (120) درجة وذلك لكون الجزء الثابت يحمل ثلاثة ملفات بين كل ملف واخر زاوية فراغية قدرها (120) درجة. تعتمد كمية القوة الدافعة الكهربائية على شدة المجال المغناطيسي وسرعة الجزء الدوار, وحيث ان سرعة الجزء الدوار يجب ان تكون ثابتة للحصول على تردد ثابت, لذا فان الخيار الوحيد للتحكم بمقدار القوة الدافعة الكهربائية هو التحكم بشدة المجال المغناطيسي وذلك بتغيير قيمة التيار المستمر الداخل الى ملفات الجزء الدوار. تردد القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في المنتج يعتمد على سرعة الجزء الدوار وعدد الاقطاب حيث يحسب من المعادلة التالية:

$$f = \frac{n * P}{120} \qquad (4.1)$$

اما القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات المنتج لكل طور فتعطى بالمعادلة التالية:

$$E_{ph} = \sqrt{2}\,.\pi.f.\emptyset.T_{ph}\,.k_w \qquad (4.2)$$

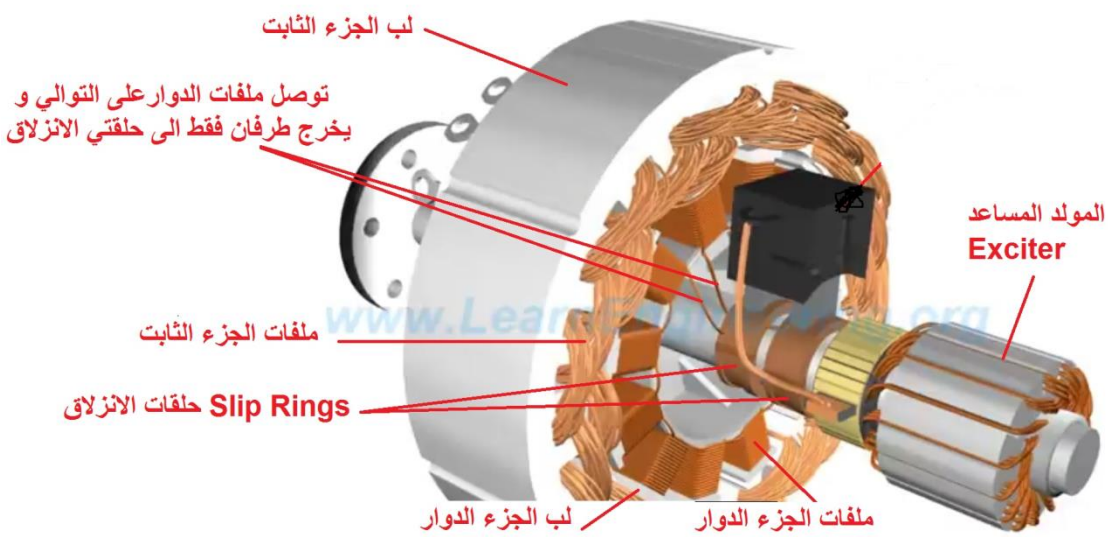
حيث:

f: التردد

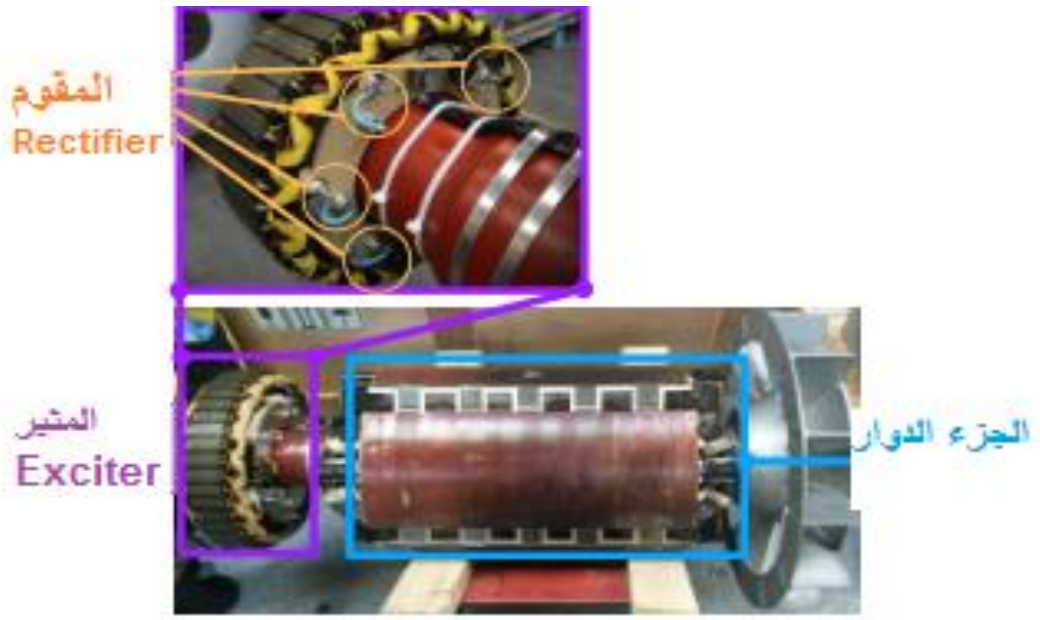
$\emptyset$: شدة المجال المغناطيسي

T_{ph}: عدد اللفات في كل طور

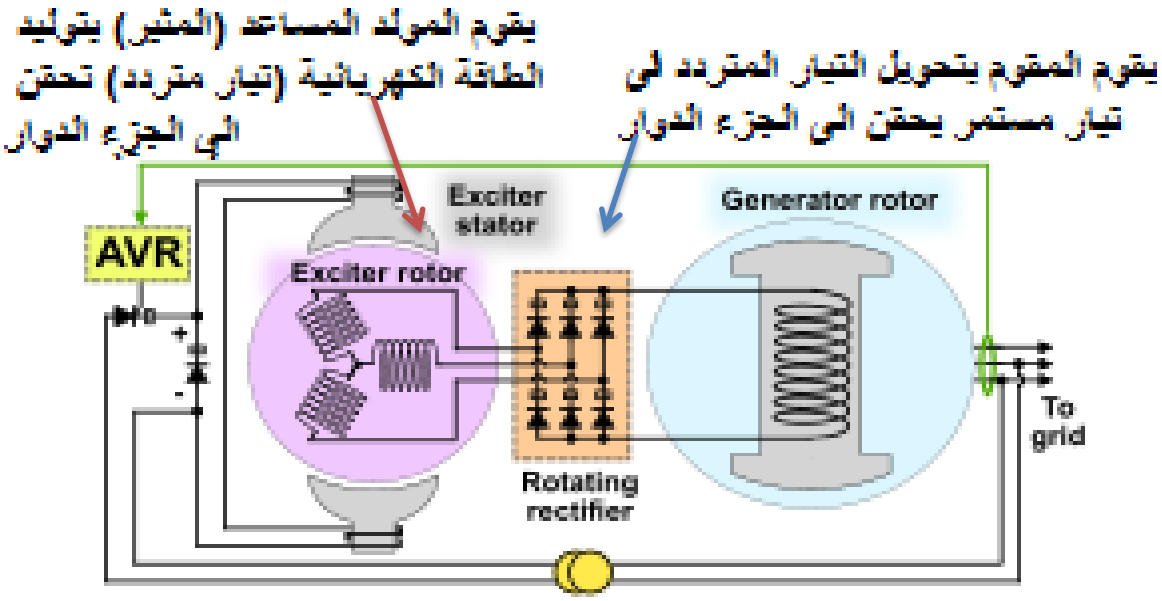
k_w: معامل اللف (<1)



الشكل (11.4): اجزاء المولد التزامني



الشكل (12.4):بعض اجزاء المولد التزامني في الواقع



الشكل (13.4): الية عمل المولد التزامني

5.4 الدائرة المكافئة للالة التزامنية:

ان وجود ثغرة هوائية غير منتظمة في الالة التزامنية ذات الاقطاب البارزة سيضفي بعض التعقيد على الدائرة المكافئة للالة التزامنية لذا فاننا سنفترض ان الثغرة الهوائية منتظمة بمعنى اننا سنستخدم نموذج الالة التزامنية ذات الجزء الدوار الاسطواني كما ان هذا الافتراض يعطي نتائج مقبولة في حالة الالة التزامنية ذات الاقطاب البارزة عندما تعمل في حالة الاستقرار (Steady State) . ان الجهد المتولد في ملفات المنتج (E_{ph}) والمعطى بالمعادلة (4.2) يعتبر هو الجهد الداخلي للمولد ولايظهر على اطراف المنتج الا في حالة عدم مرور تيار في ملفات المنتج (حالة اللاحمل), اما في حالة تحميل المولد فانه سيظهر جهد اخر مختلف على اطراف المنتج يسمى الجهد الخارجي (V_{ph}).

لماذا الجهد الخارجي لايساوي الجهد الداخلي في حالة التحميل وماهي العلاقة بينهما؟

الاجابة على هذا السؤال تقود الى استنتاج نموذج للدائرة المكافئة للمولد التزامني. يوجد عدد من العوامل التي تسبب الاختلاف بين (E_{ph}) و(V_{ph}) عند التحميل واهمها:

1. تشوه الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بسبب مرور تيارات في ملفات المنتج وهو مايسمى بظاهرة رد فعل المنتج (Armature Reaction)
2. وجود مقاومة لملفات المنتج
3. وجود ممانعة حثية ذاتية لملفات المنتج

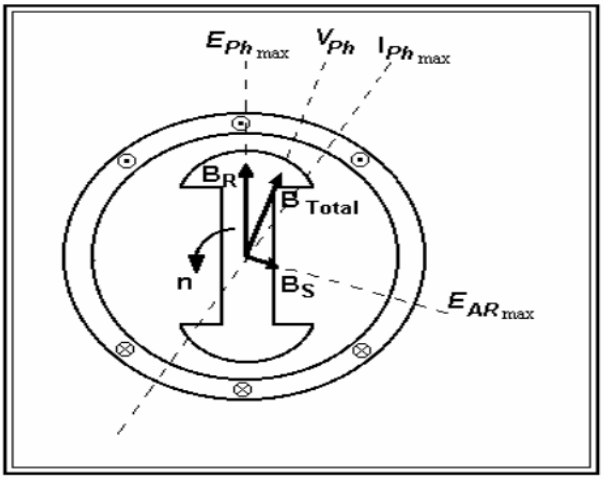
1.5.4 رد فعل المنتج في المولدات التزامنية:

عند تحميل الالة التزامنية سيمر تيار كهربائي في كل طور من الاطوار الثلاثة للجزء الثابت ولكون ملفاته رتبت بحيث تفصل بين طور واخر زاوية فراغية مقدارها (120) درجة لذلك سيكون بين كل تيار واخر زاوية طورمقدارها (120) درجة. ونتيجة لمرور هذه التيارات مجتمعة بهذه الصفة سيتولد مجال مغناطيسي دوار في الجزء الثابت يدور بنفس سرعة واتجاه المجال المغناطيسي الدوار الناتج من ملفات الجزء الدوار. هذا المجال المغناطيسي الجديد هو رد فعل المنتج الناشئ كنتيجة لمرور تيارات كهربائية في الجزء الثابت اثناء التحميل.

اذن: المجال المغناطيسي المؤثر في الثغرة الهوائية هو محصلة المجالين المتولدين من الجزء الدوار والجزء الثابت. وكما ان المجال المغناطيسي المتولد من الجزء الدوار سينتج جهدا في ملفات الثابت وهو (E_{ph}) , كذلك المجال المغناطيسي الناتج بسبب رد فعل المنتج سينتج جهدا في ملفات الثابت وهو (E_{AR}), ولذلك فان الجهد الذي سيظهر على اطراف المولد (V_{ph}) هو محصلة هذين الجهدين او لنقل انه الجهد المتولد بسبب محصلة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية (B_{Total}) كماموضح في الشكل (14.4), حيث:

$$B_{Total} = B_R + B_S \qquad (4\text{-}3)$$

$$V_{ph} = E_{ph} + E_{AR} \qquad (4\text{-}4)$$



الشكل (14.4): المجالات المغناطيسية في المولد التزامني اثناء التحميل

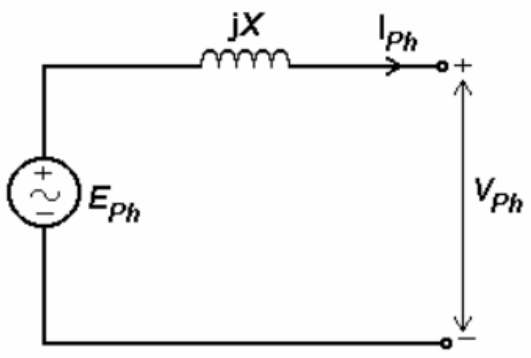
في الشـــكل (14.4) نجد ان تيار (I_{ph}) نتج بســـبب تحميل الالة بحمل حثي وذلك لانه متخلف عن الجهد (E_{ph}) بزاوية ما, هذا التيار بدوره اوجد المجال المغناطيســـي (B_S) الذي بدوره انتج جهدا في ملفات المنتج هو (E_{AR}), هذا الجهد (E_{AR}) الناتج بسبب رد فعل المنتج يتناسب طرديا مع التيار المســـبب له كما انه متخلف عنه بزاوية (90)درجة , وبناء عليه نســـتطيع ان نعبر عن هذا الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج بما يلي:

$$E_{AR} = -JXI_{ph} \qquad (4\text{-}5)$$

وبعد التعويض في المعادلة (4-4) نجد ان :

$$V_{ph} = E_{ph} - JXI_{ph} \qquad (4\text{-}6)$$

المعادلة (4-6) يمكن ان نمثلها بالدائرة التالية:



الشكل (15.4):دائرة تمثيل المعادلة (4-6)

اذن: الجهد المتولد بسبب رد فعل المنتج يمكن التعبير عنه بمحاثة موصلة على التوالي مع مصدر الجهد الداخلي.

بالاضافة الى تأثير رد فعل المنتج ايضا هناك تأثير للمقاومة والمفاعلة الحثية الذاتية لملفات المنتج , فإذا اعتبرنا ان مقاومة ملفات المنتج هي (R_A) والمفاعلة الحثية الذاتية لملفات المنتج هي (X_A), فإن جهد اطراف المولد يصبح كما يلي:

$$V_{ph} = E_{ph} - JXI_{ph} - JX_AI_{ph} - R_AI_{ph} \qquad (4\text{-}7)$$

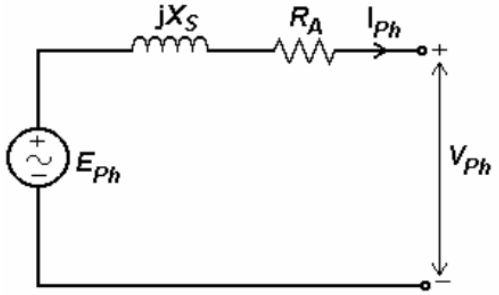
من اجل تبسيط المعادلة (4-7) يمكننا دمج المفاعلة الحثية الذاتية لملفات المنتج (X_A) مع المفاعلة الحثية التي تمثل رد فعل المنتج (X) لتصبح مفاعلة حثية واحدة تسمى المفاعلة التزامنية (X_S).

$$X_S = \mathrm{X} + X_A \qquad (4\text{-}8)$$

وبالتالي يصبح جهد اطراف المولد كما يلي:

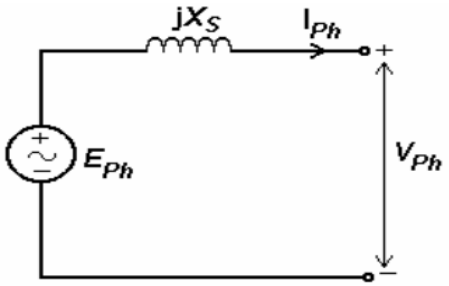
$$V_{ph} = E_{ph} - JX_S I_{ph} - R_A I_{ph} \qquad (4\text{-}9)$$

المعادلة (4-9) هي المعادلة النهائية التي يحســـب منها جهد اطراف المولد لكل طور, من هذه المعادلة يمكننا ان نرسم الدائرة المكافئة للالة التزامنية كماموضح في الشكل (4-16) مع ملاحظة انها تمثل طور واحد فقط من اطور المنتج وذلك للتشابه التام بين الاطوار الثلاثة.



الشكل (4-16):الدائرة المكافئة للالة التزامنية

الشكل (4-16) يمثل الدائرة المكافئة النهائية للالة التزامنية ذات الجزء الدوار الاسطواني, كما انه يمكن تبســـيط هذه الدائرة وذلك بإهمال مقاومة ملفات المنتج نظرا لقلتها مقارنة بالمفاعلة التزامنية خصوصا في الالات الكبيرة فتصبح الدائرة المكافئة التقريبية كما موضح في الشكل (4-17).



الشكل (4-17):الدائرة المكافئة التقريبية

وفي هذه الحالة يحسب جهد الاطراف لكل طور كما يلي:

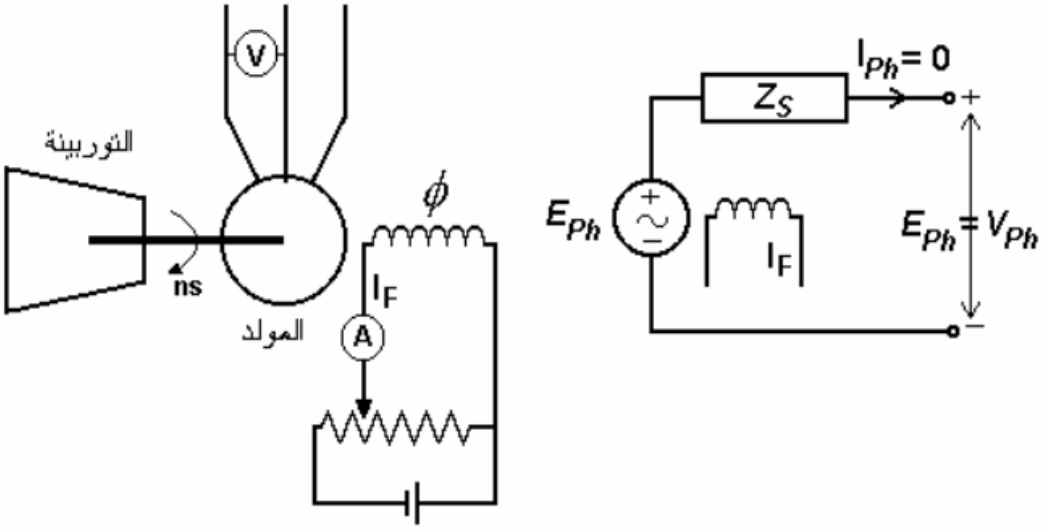
$$V_{ph} = E_{ph} - JX_S I_{ph} \qquad (4\text{-}10)$$

2.5.4اختبارات الالة التزامنية:

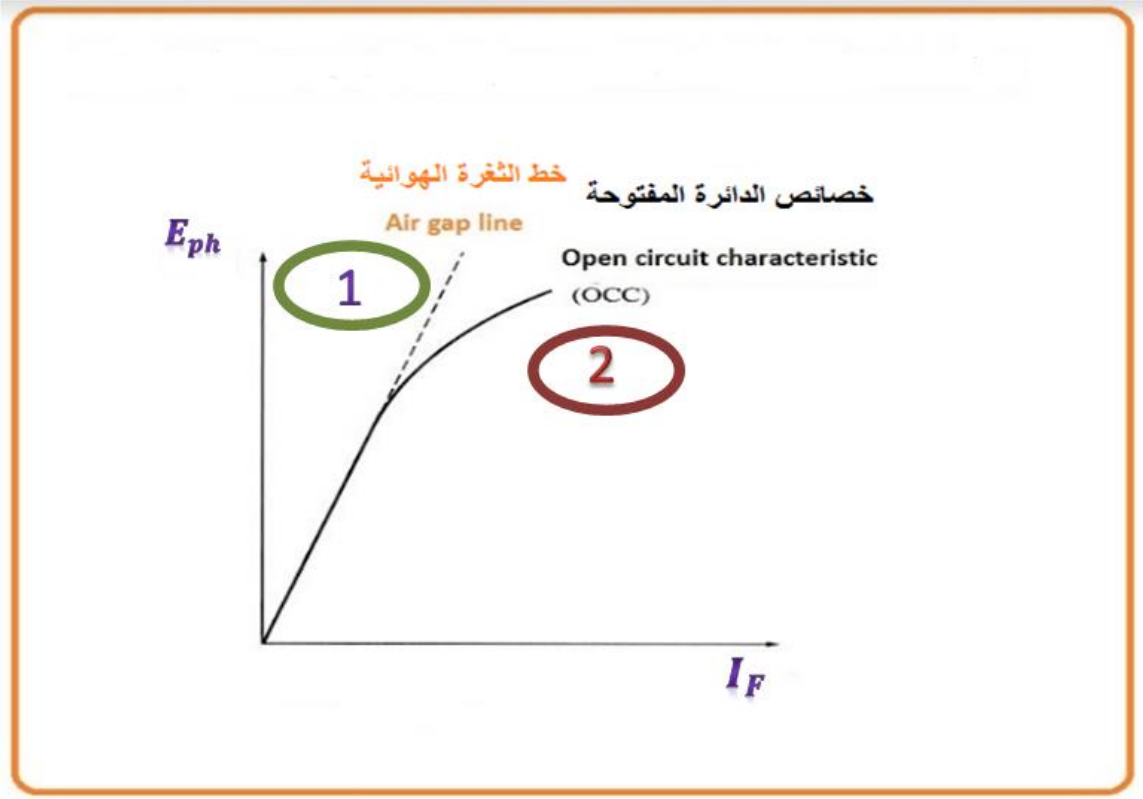
الالة التزامنية كغيرها من الالات يجري عليها الاختبارين الشـــهيرين (اختبار اللاحمل واختبار القصـــر) وذلك من اجل تحديد المنحنيات او الخصـــائص للالة التزامنية وحســـاب عناصـــر الدائرة المكافئة.

اولا: اختبار اللاحمل (الدائرة المفتوحة Open Circuit):

في هذا الاختبار تترك اطراف المنتج مفتوحة وتدار الالة حتى تصـــل الى ســـرعتها التزامنية و من ثم يزداد تيار المجال تدريجيا ابتداءا من الصـــفر. هذه الزيادة في تيار المجال تؤدي الى زيادة الفيض المغناطيســـي بالتالي زيادة الجهد المتولد على اطراف المنتج المفتوحة و تســـجل قيم التيار و الجهد في جدول ثم ترسم العلاقة بينهما كما هو موضح في الشكل (4-18) , هذه العلاقة تســـمى منحنى المغنطة (Magnetization Curve) او منحنى الدائرة المفتوحة المميز (Open Circuit Characteristic (O.C.C)) كما موضح في الشكل (4-19).



الشكل (4-18): اختبار الالة التزامنية عند اللاحمل

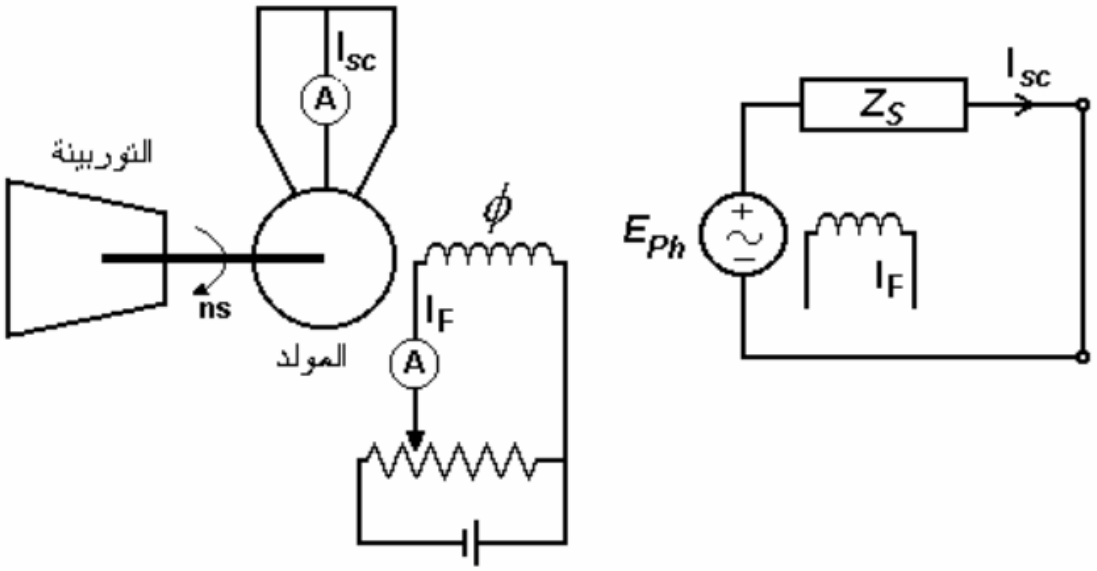


الشكل (19-4): منحنى الدائرة المفتوحة للالة التزامنية

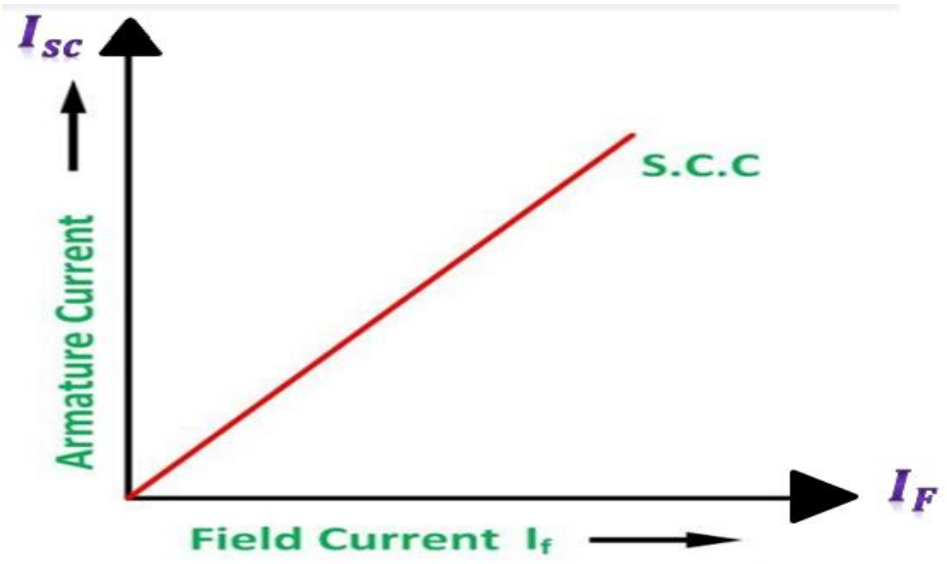
يلاحظ من المنحنى السابق انه ينقسم الى منطقتين واضحتين, في المنطقة (1) لكون الفيض المغناطيسي منخفض تكون ممانعة الحديد صغيرة جدا. وهذا يعني ان الممانعة الموجودة هي ممانعة الهواء فقط ممايؤدي الى ان يتغير الجهد تغيرا خطيا مع تيار المجال في هذه المنطقة. امتداد المنحنى في هذه المنطقة هو الخط الفاصل بين المنطقتين ويسمى خط الثغرة الهوائية, في المنطقة (2) يزداد الفيض المغناطيسي ممايؤدي الى زيادة ممانعة الحديد, اي ان الحديد بدأ يصل الى حالة التشبع مما يؤدي الى تناقص معدل الارتفاع في جهد اطراف المنتج مقابل تيار المجال كما هو ملاحظ من المنحنى.

ثانيا: اختبار القصر (Short Circuit Test):

في هذا الاختبار تقصر اطراف المنتج الثلاثة مع بعضها البعض وتدار الالة حتى تصل الى السرعة التزامنية ثم يزداد تيار المجال تدريجيا وتسجل قيمة تيار المنتج وقيمة تيار المجال المقابلة في جدول ثم ترسم العلاقة بينهما كما موضح في الشكل (4-20),(4-21) هذه العلاقة تسمى منحنى القصر المميز ((S.C.C)Short Circuit Characteristics). ويجب ان لايترك تيار القصر يزداد عن القيمة المقننة لتيار الحمل الكامل.



الشكل (20-4):الالة التزامنية اثناء اختبار الدائرة المقصورة



الشكل (21-4): منحنى الدائرة المقصورة للالة التزامنية

3.5.4 حساب المفاعلة التزامنية باستخدام منحنيي الدائرة المفتوحة (O.C.C) والقصر (S.C.C):

يمكن حساب المفاعلة التزامنية (X_S) للالة التزامنية باستخدام منحنى الدائرة المفتوحة (O.C.C) ومنحنى الدائرة المقصورة (S.C.C) كمايلي:

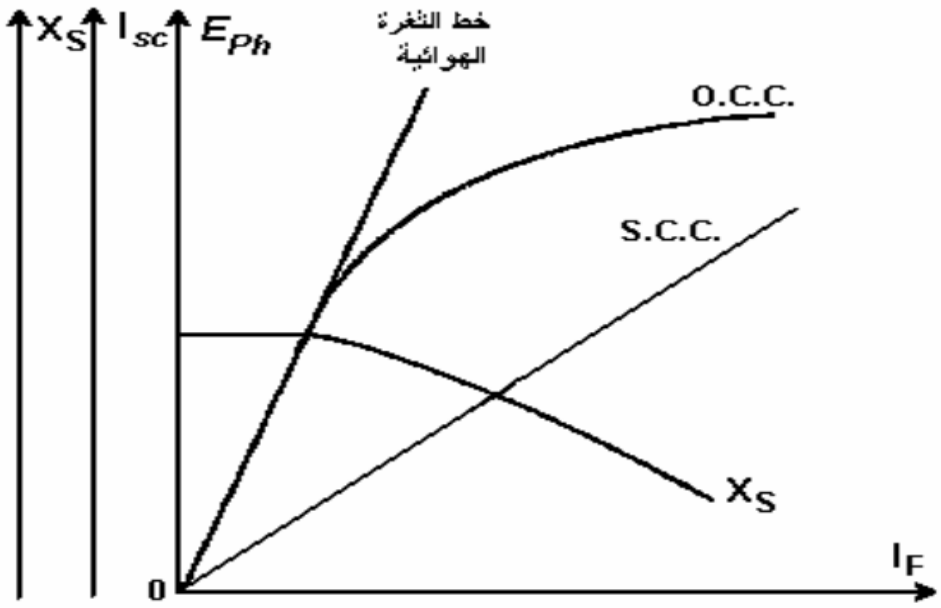
1) عند كل قيمة من قيم تيار المجال (I_F) تحسب (Z_S) من المعادلة التالية:

$$Z_S = \frac{E_{ph}}{I_{SC}} \qquad I_F \ \ is\ Constant \qquad (4-11)$$

2) تحسب (X_S) من المعادلة التالية:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} \qquad (4-12)$$

حيث (R_A) هي مقاومة ملفات المنتج ويمكن قياسها مباشرة باستخدام الاوميتر.
يمكن ايضا ان ترسم العلاقة بين (I_F) و(X_S) كما هو موضح في الشكل (4-22). ويلاحظ ان قيمة (X_S) تكون ثابتة في منطقة التغير الخطي لمنحنى الدائرة المفتوحة (O.C.C) وتقل كلما زادت الممانعة المغناطيسية للحديد.



الشكل (4-22): المفاعلة التزامنية للالة التزامنية بدلالة تيار المجال

6.4 معامل تنظيم الجهد (Voltage Regulation):

يعتبر معامل تنظيم الجهد من المعاملات الهامة في الالة التزامنية وذلك لانه يعطي فكرة واضـــحة عن مدى التغير الذي يحدث في قيمة الجهد على اطراف الالة عند تحميل الالة او عندما تتغير الاحمال بشـكل كبير, كماانه يعتبر مؤشــر جيد للدلالة على المولد الافضــل عند المقارنة بين المولدات, كما يعرف بأنه التغير في جهد الاطراف من حالة اللاحمل الى حالة الحمل الكامل منسوبا الى قيمة الجهد في حالة الحمل الكامل.ويعبر عنه رياضيا كمايلي:

$$VR = \frac{E_{ph} - V_{ph}}{V_{ph}} \qquad (4\text{-}13)$$

وهناك عدة طرق تســتخدم لتعيين معامل تنظيم الجهد تعتمد على نوعية البيانات المتوفرة عن الالة والتي تكون عادة اما نتائج اختبارات اجريت على الالة او بيانات التصميم.

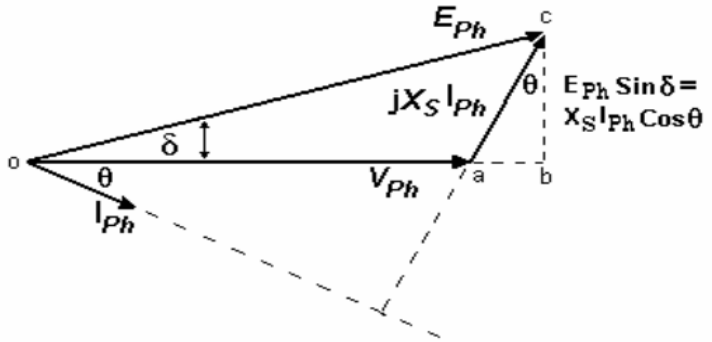
7.4القدرة والعزم في الالة التزامنية:

القدرة الفعالة الخارجة من المولد التزامني تعطى من المعادلة التالية:

$$P = 3V_{ph}I_{ph}Cos\theta \qquad (4-14)$$

حيث:θ هي الزاوية بين الجهد والتيار وجيب تمامها هو معامل القدرة

اذ اهملنا مقاومة ملفات المنتج (R_A) وذلك لصـــغر قيمتها عندما تقارن بالمفاعلة التزامنية (X_S) كمافي الشـــكل (4-18) فأننا نســـتطيع ايجاد معادلة مهمة جدا لحســـاب القدرة الخارجة من الالة التزامنية. لكي نوجد هذه المعادلة نسـتعين بالمخطط الاتجاهي المعبر عن هذه الحالة والموضـح في الشكل (4-23).



الشكل (4-23):المخطط الاتجاهي للمولد التزامني في حالة اهمال (R_A)

نلاحظ في المخطط الاتجاهي اعلاه ان المستقيم (bc) يمكن ان يعبر عنه بـ($\sin\delta\, E_{ph}$) او ($X_S I_{ph}\cos\theta$) وذلك لكونه ضلع مشترك في المثلثين (abc), (obc) وبالتالي فإن:

$$I_{ph}\cos\theta = \frac{E_{ph}\sin\delta}{X_S} \qquad (4-15)$$

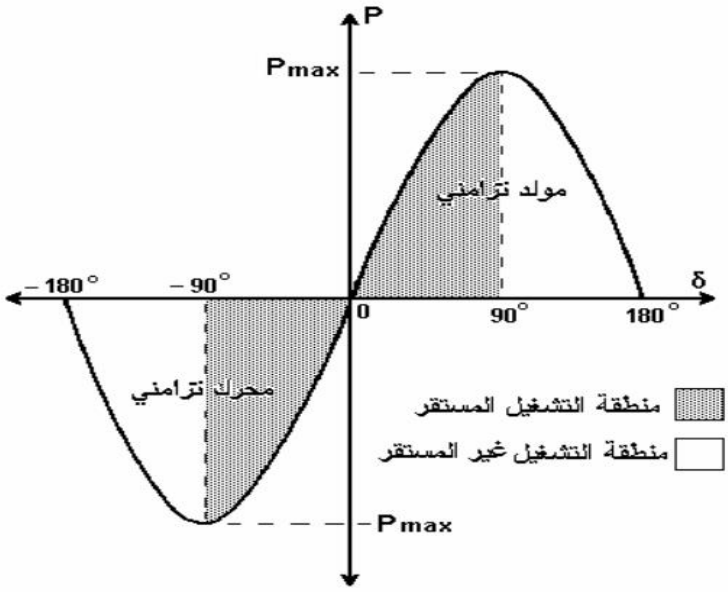
وبعد التعويض في المعادلة (4-14) تصبح معادلة القدرة كمايلي:

$$P = \frac{3V_{ph}E_{ph}\ Cos\theta}{X_S} \qquad (4-16)$$

معادلة القدرة (4-16) يمكن ان نرسم منها العلاقة بين (P) و (δ) كماهو موضح في الشكل (4-24), العلاقة (4-16) توضح ان القدرة الخارجة من المولد التزامني تعتمد على الزاوية (δ) بين (E_{ph}) و (V_{ph}), هذه الزاوية (δ) تسمى زاوية الحمل (Load Angle) او زاوية العزم (Torque Angle), كما يلاحظ ايضا ان اكبر قدرة ممكن ان تؤخذ من المولد نظريا هي عندما تكون قيمة (δ) تسعون درجة, اي ان ($\sin\delta = 1$) وبالتالي:

$$P_{max} = \frac{3V_{ph}E_{ph}}{X_S} \qquad (4-17)$$

منطقة التشغيل الامن او المستقر للآلة التزامنية هي عندما تكون ($\delta > 90$) في حالة التشغيل كمولد او عندما تكون ($\delta > -90$) في حالة التشغيل كمحرك كما هو موضح في الشكل (4-24).



الشكل (4-24):القدرة في الالة التزامنية بدلالة زاوية الحمل (δ)

العزم المتولد داخل الآلة التزامنية يمكن ايجاده من المعادلة (4-16) بعد قســـمتها على الســـرعة الزاوية للجزء الدوار كما يلي:

$$T = \frac{3V_{ph}E_{ph}\sin\delta}{X_S w_m} \qquad (4-18)$$

8.4 تشغيل المولدات التزامنية على التوازي:

من النادر جدا ان توجد مولدة وحيدة تغذي حمل مســـتقل ماعدا في حالات خاصـــة كالمولدات المعدة لأعمال الطوارئ. عادة يوجد في كثير من التطبيقات اكثر من مولدة مربوطة على التوازي مع بعضها لإمداد الاحمال بالقدرة المطلوبة. واقرب مثال على ذلك نجده في اي محطة من المحطات الموجودة في الموصـــل او خارجها حيث يوجد العشـــرات من المولدات التزامنية في اماكن مختلفة مربوطة مع بعضها على التوازي لتغذية تلك المنطقة بما تحتاجه من القدرة الكهربائية.

إذن: لماذا يفضل ربط المولدات التزامنية مع بعضها على التوازي؟

هناك مميزات عديدة لتشغيل المولدات على التوازي اهمها ما يلي:

1-المولدات المربوطة على التوازي تستطيع ان تغذي احمال اكبر من الحمل الذي يغذيه مولد واحد.

2-وجود عدة مولدات مربوطة على التوازي يسـمح بإجراء اعمال الصـيانة لمولد او اكثر دون قطع القدرة عن الاحمال.

3- وجود عدة مولدات مربوطة على التوازي يسمح بإجراء اعمال الصيانة لمولد او اكثر دون قطع القدرة عن الاحمال.

4-وجود عدة مولدات صغيرة مربوطة على التوازي اكبر كفاءة من مولد وحيد مكافئ لها خصوصا عندما تكون الاحمال صغيرة.

ومن اجل ربط المولدات على التوازي يجب ان يتحقق عدد من الشروط هي كما يلي:

1- القيمة الفعالة (rms Value) لجهد الاطراف في كلا المولدين يجب ان يتساوى.
2- التردد يجب ان يكون متساوي في كلا المولدين.
3- تتابع الاطوار لكلا المولدين يجب ان يكون هو نفسه اما (ABC) او (ACB)
4- يجب ان تكون الجهود في نفس الطور(زاوية الطور للوجه (a) متساوية في كلا المولدين)

وعند تحقق هذه الشروط يمكن توصيل المولدين على التوازي بأمان, اما عند توصيل المولدين عند عدم تحقق واحد او اكثر من هذه الشروط فإن ذلك يؤدي الى حدوث اضرار كبيرة قد تؤدي الى تلف ملفات المولد بسبب مرور تيار كبير فيها او يؤدي الى كسر العمود بسبب تحوله الى محرك يدور بإتجاه معاكس لدوران التوربينة.

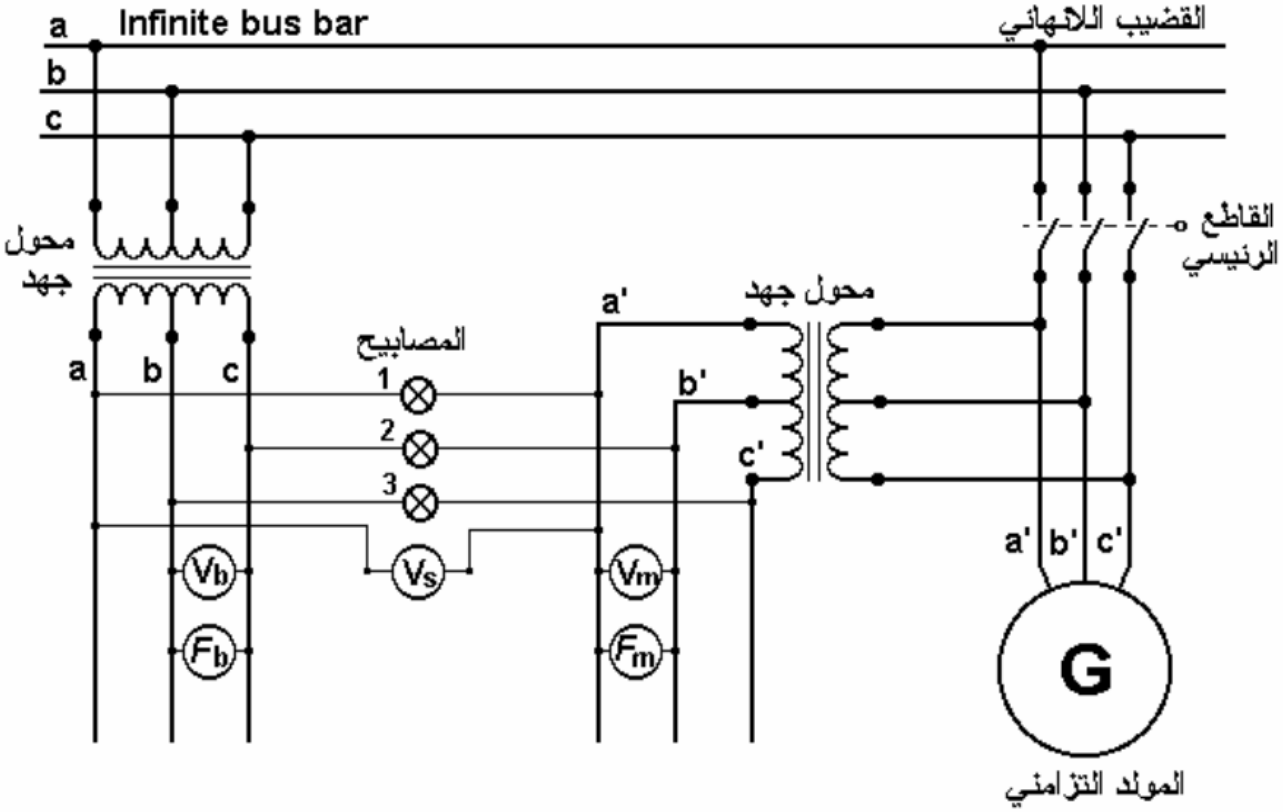
9.4توصيل المولدات التزامنية الى قضبان لا نهائية:

ان عملية توصيل المولد التزامني الى قضبان لا نهائية (Infinite Bus Bars) تعتبر عملية مشابهة لتوصيل المولد التزامني على التوازي مع مولد آخر كبير جدا وذلك لأن القضبان اللانهائية تعتبر كأنها مولد ذو قدرة غير محدودة, ولأتمام هذه العملية يجب ان تتحقق الشروط السابقة قبل عملية التوصيل, وللتأكد من تحقق تلك الشروط تجرى عملية التزامن. وعملية التزامن هذه تجرى بعدة طرق نذكر منها طريقتين:

1- طريقة المصابيح المضيئة:

في هذه الطريقة توصل ثلاث لمبات بين الآلة و القضبان اللانهائية كما موضح في الشكل (25-4) بحيث توصل الاولى بين الخطين (a, a') والثانية بين الخطين (b, c') والثالثة بين الخطين (c, b') كما يوصل ثلاثة اجهزة فولتميتر: (Vs) بين الوجهين (a, a') و (Vm) لقياس جهد المولد و (Vb) لقياس جهد القضبان اللانهائية, كذلك يتم توصيل جهازين لقياس تردد المولد والقضبان اللانهائية كما هو موضح في الشكل (24-4) وبهذه الطريقة يمكن التأكد من تحقق شروط التزامن الاربعة كما يلي:

1- لكي يتحقق الشرط الاول يجب ان تتساوى قراءة اجهزة قياس الجهد (Vm=Vb)
2- لكي يتحقق الشرط الثاني يجب ان تتساوى قراءة اجهزة قياس التردد (Fm=Fb)
3- الشرط الثالث يتحقق عندما يكون انطفاء واشتعال المصابيح بشكل منتظم
4- الشرط الرابع يتحقق عندما يكون فرق الجهد بين وجهين متماثلين في الآلة والقضيب مساوي للصفر (Vs=0).



الشكل (4-25):عملية التزامن بطريقة المصابيح المضيئة

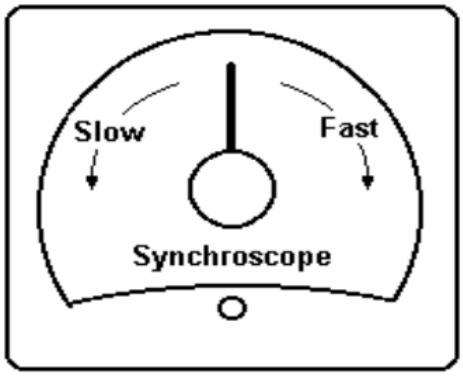
اماعملية التزامن فيتم اجراؤها كمايلى:

1- يرفع جهد اطراف المولد حتى يكون مساويا لجهد القضيب (Vm=Vb) وذلك بزيادة تيار المجال تدريجيا.
2- يضبط تردد المولد بحيث يكون قريبا من تردد القضيب وذلك بزيادة سرعة الدوران
3- عند محاولة ضبط سرعة الدوران يحدث احدى حالتين بالنسبة للمصابيح, الحالة الاولى: جميع المصابيح تضاء وتنطفئ بشكل عشوائي و هذا يعني ان شرط تتابع الاطوار للمولد و القضبان مختلف وعندها يجب المبادلة بين اي طرفين من اطراف المولد من اجل عكس تتابع اطوار المولد وبعدها نلاحظ ان إضاءة المصابيح اصبحت بشكل منتظم ومتتابع.
الحالة الثانية: جميع المصابيح تضاء وتنطفأ بشكل منتظم ومتتابع و هذا يعني ان تتابع الاطوار للمولد والقضيب اللانهائي متماثل.
4- إذا تحققت الحالة الثانية يتبقى ضبط التردد وذلك عن طريق التحكم بالسرعة التزامنية للآلة, ويتضح ذلك في سرعة تتابع الإضاءة فإذا زادت سرعة تتابع إضاءة المصابيح يلزم زيادة او تقليل سرعة المولد بحيث يكون تتابع إضاءة المصابيح بطيء قدر الامكان وفي اللحظة

التي يكون فيها (Vs=0) أو المصـــباح الاول منطفئ بينما الثاني والثالث مضـــاءان يكون الشـرط الرابع قد تحقق, في هذه اللحظة تكون الآلة في لحظة تزامن مع القضـيب اللانهائي وعندها يمكن إغلاق القاطع الرئيسي بأمان.

2- باستخدام جهاز التزامن:

جهاز التزامن (Synchroscope) يســـتخدم للتأكد من ان جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضـــبان اللانهائية وان لهما نفس التردد, اي انه يعتبر بديل للمصـــابيح في الشـكل (4-26) ,وهو عبارة عن محرك حثي يتعرض لمجالين مغناطيسين الاول من القضبان اللانهائية والاخر من المولد التزامني و الجزء الدوار مركب عليه مؤشـر يتحرك بأتجاه عقارب السـاعة وعكس عقارب السـاعة يعتمد على تردد المولد التزامني هل هو اعلى او اقل من تردد القضـــبان اللانهائية و عندما يقف المؤشـر بشـكل عمودي (في مكان السـاعة 12) فهذا يعني ان جهد المولد في نفس الطور مع جهد القضـــبان اللانهائية عند هذه الحالة يمكن توصـــيل المولد التزامني بالقضـــبان اللانهائية بأمان عن طريق القاطع الرئيسي.



الشكل (4-26):جهاز التزامن