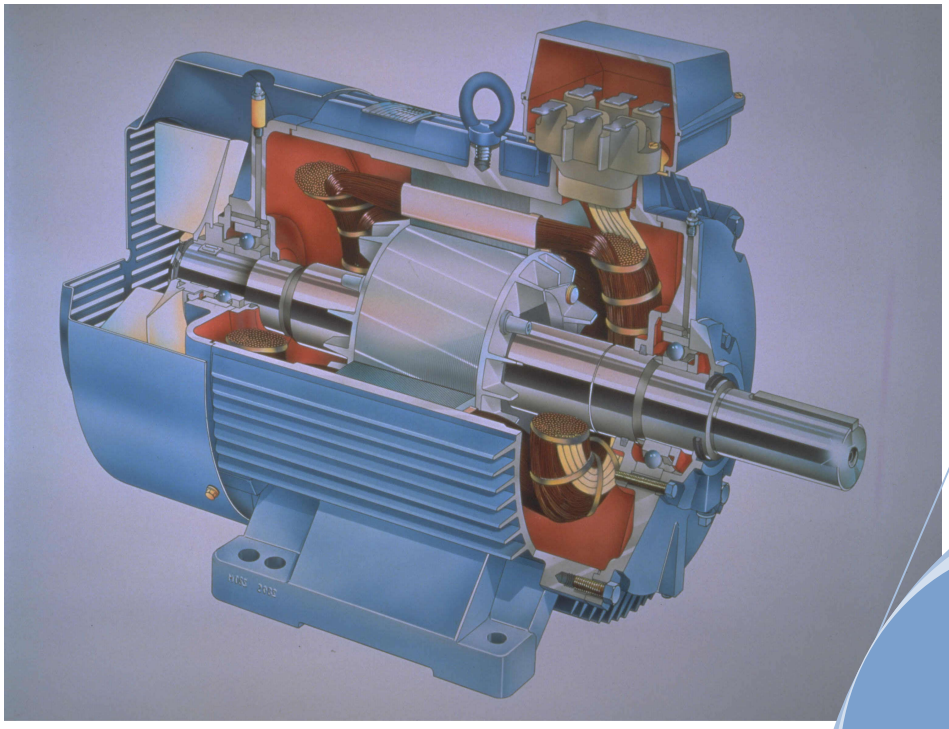
Ch1 : Induction motors

Eng / ALaa Mohammed Hammadi Ahmed



Rotating Magnetic field إشرح كيف ينشأ ؟

Rotating Magnetic field (R.M.F.)

The rotating magnetic field can be defined as the field or flux having constant amplitude but whose axis is continuously rotating in a plane with a certain speed. So if the arrangement is made to rotate a permanent magnet, then the resulting field is a rotating magnetic field. But ion this method, it is necessary to rotate a magnet physically to produce rotating magnetic field.

But in three phase induction motors such a rotating magnetic field is produced by suppl ying currents to a set of stationary windings, with the help of three phase a.c. supply. The current carrying windings produce the magnetic field or flux. And due to interaction of three phase fluxes produced due to three phase supply, resultant flux has a constant magnitude and its axis rotating in space, without physically rotating the windings. This type of field is nothing but rotating magnetic field. Let us study how it happens.

Production of R.M.F.

A three phase induction motor consists of three phase winding as its stationary part called stator. The three phase stator winding is connected in star or delta. The three phase windings are displaced from each other by 120^o. The windings are supplied by a balanced three phase a.c. supply. This is sho wn in the Fig. 1. The three phase windings are denoted as R-R' , Y-Y' and B-B'.

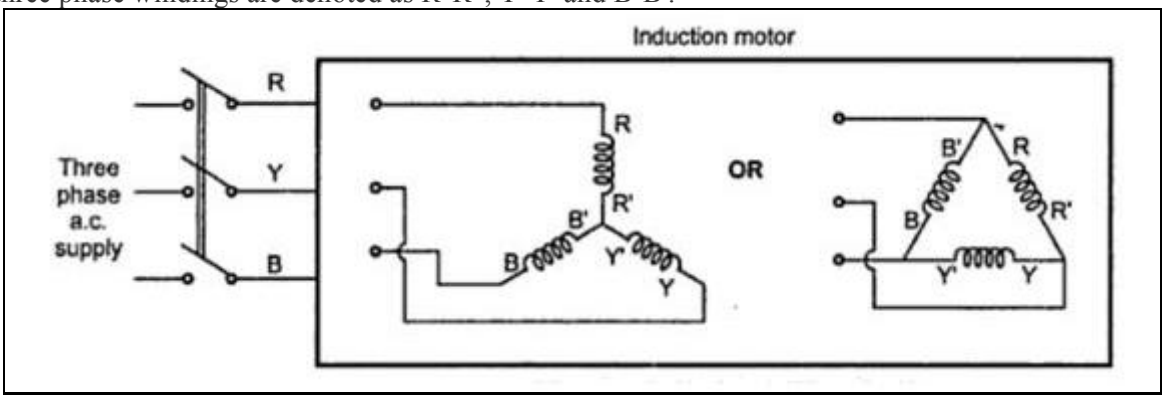


Fig. 1 Star or delta connected 3phase winding

The three phase currents flow simultaneously through the windings and are displaced from each other by 120^o electrical. Each alternating phase current produces its own flux w hich is sinusoidal. So all three fluxes are sinusoidal and are separated from each other by 120^o. If the phase sequence of the windings is R-Y-B, then mathematical equations for the instantaneous values of the three fluxes Φ_R , Φ_Y and Φ_B can be written as,

$$\Phi_R = \Phi_m \sin(\omega t) = \Phi_m \sin\theta \quad \text{.....(1)}$$

$$\Phi_Y = \sin(\omega t - 120^o) = \Phi_m \sin(\theta - 120^o) \quad \text{.....(2)}$$

$$\Phi_B = \Phi_m \sin(\omega t - 240^o) = \Phi_m \sin(\theta - 240^o) \quad \text{.....(3)}$$

As winding are identical and supply is balanced, the magnitude of each flux is Φ_m. Due to phase sequence R-Y-B, flux lags behind Φ_R by 120^o and Φ_B lags Φ_Y by 120^o. So $\Phi_B$ultimately lags Φ_R by 240^o. The flux Φ_R is taken as reference while writing the equations.

The Fig. 2(a) shows the waveforms of three fluxes in space. The Fig.2(b) shows the phasor diagram which clearly shows the assumed positive directions of each flux. Assumed positive direction means whenever the flux is positive it must be represented along the direction shown and whenever the flux is negative it must be represented along the opposite direction to the assumed positive direction.

Let Φ_R, Φ_Y and Φ_B be the instantaneous values of the three fluxes. The resultant flux $\Phi_T$is the phasor addition of Φ_R, Φ_Y and Φ_B.

$$\therefore \quad \bar{\Phi}_T = \bar{\Phi}_R + \bar{\Phi}_Y + \bar{\Phi}_B$$

Let us find Φ_T at the instants 1, 2, 3 and 4 as shown in the Fig. 2(a) which represents the values of θ as 0^o, 60^o, 120^o and 180^o respectively. The phasor addition can be performed by obtaining the values of Φ_R, Φ_Y and Φ_B by substituting values of θ in the equation (1), (2) and (3).

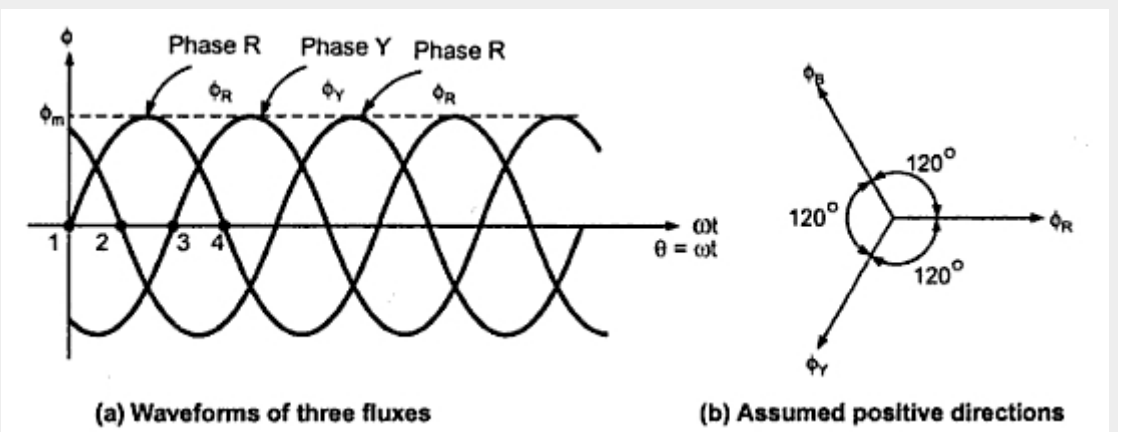


Fig. 2

Case 1 : $\theta = 0^o$

Substituting in the equations (1), (2) and (3) we get,

$\Phi_R = \Phi_m \sin 0^o = 0$

$\Phi_Y = \Phi_m \sin(-120^o) = -0.866\ \Phi_m$

$\Phi_B = \Phi_m \sin(-240^o) = +0.866\ \Phi_m$

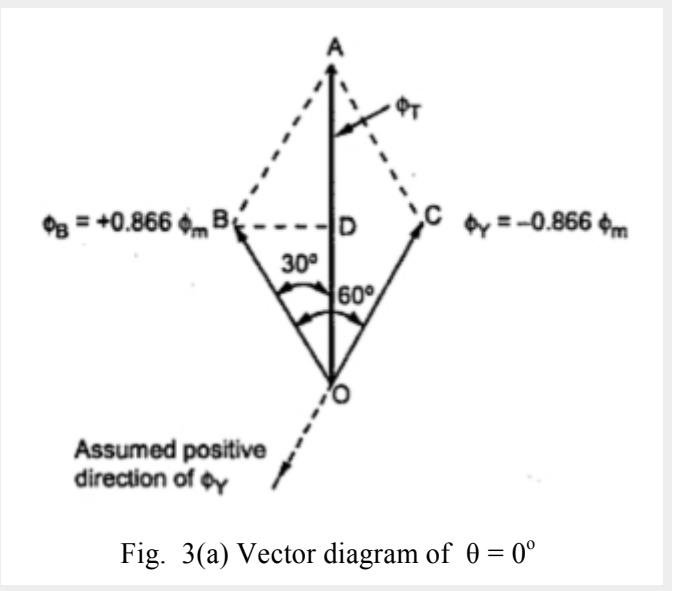


Fig. 3(a) Vector diagram of $\theta = 0^o$

The pahsor addition is shown in the Fig. 3(a). The positive values are are shown in assumed positive directions while negative values are shown in opposite direction to the assumed positive directions of the respective fluxes. Refer to assumed positive directions shown in the Fig 3(b).

BD is drawn perpendicular from B on Φ_T. It bisects Φ_T.

$\therefore$ $OD = DA = \Phi_T/2$

In triangle $\angle OBD = 30^o$

$\therefore$ $\cos 30^o = OD/OB = (\Phi_T/2)/(0.866\ \Phi_m)$

$\therefore$ $\Phi_T = 2 \times 0.866\ \Phi_m \times \cos 30^o$

$= 1.5\ \Phi_m$

So magnitude of Φ_T is $1.5\ \Phi_m$ and its position is vertically upwards at $\theta = 0^o$.

Case 2 $\theta = 60^o$

Equation (1),(2) and (3) give us,

$\Phi_R = \Phi_m \sin 60^o = +0.866\ \Phi_m$

$\Phi_Y = \Phi_m \sin(-60^o) = -0866\ \Phi_m$

$\Phi_B = \Phi_m \sin(-180^o) = 0$

So Φ_R is positive and Φ_Y is negative and hence drawing in appropriate directions we get phasor diagram as shown in the Fig. 3(b).

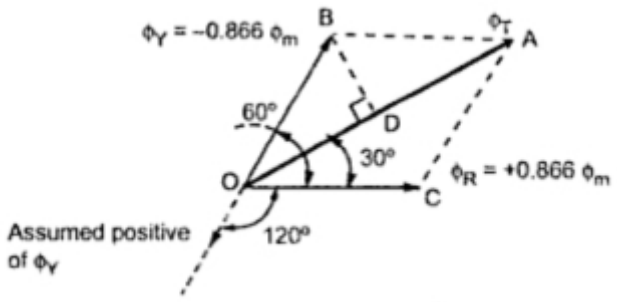


Fig 3(b) Vector diagram of $\theta = 60^o$

Doing the same construction, drawing perpendicular from B on at D we get the same result as,

$\Phi_T = 1.5\ \Phi_m$

But it can be seen that though its magnitude is 1.5 Φm it has rotated through 60^o in space, in clockwise direction, from its previous position.

Case 3 : $\theta = 120^o$

Equations (1),(2) and (3) give us,

$\Phi_R = \Phi m \sin 120^o = +0.866\ \Phi m$

$\Phi_Y = \Phi m \sin 0^o = 0$

$\Phi_B = \Phi m \sin(-120^o) = -0.866\ \Phi m$

So Φ_R is positive and Φ_B is negative. showing Φ_R and Φ_B in the appropriate directions, we get the phasor diagram as shown in the Fig . 3(c).

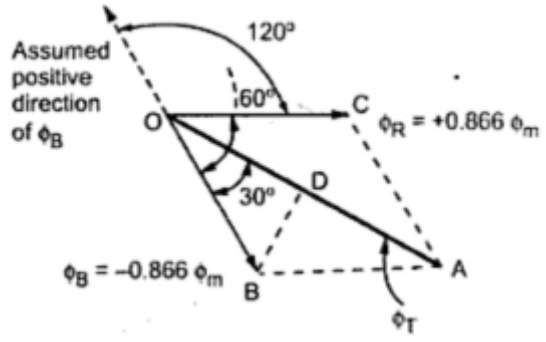


Fig. 3(c) Vector diagram of $\theta = 120^o$

After doing the construction same as before i.e. drawing perpendicular from B on Φ_T, it can be provided again that,

$\Phi_T = 1.5\ \Phi m$

But the position of Φ_T is such that it has rotated further through 60^o from its previous position, in clockwise direction. And from its position at $\theta = 0^o$, it has rotated through 120^o in space, in clockwise direction.

Case 4 : $\theta = 180^o$

From equations (1),(2) and (3),

$\Phi_R = \Phi m \sin(180^o) = 0$

$\Phi_Y = \Phi m \sin(60^o) = +0.866\ \Phi m$

$\Phi_B = \Phi m \sin(-60^o) = -0.866\ \Phi m$

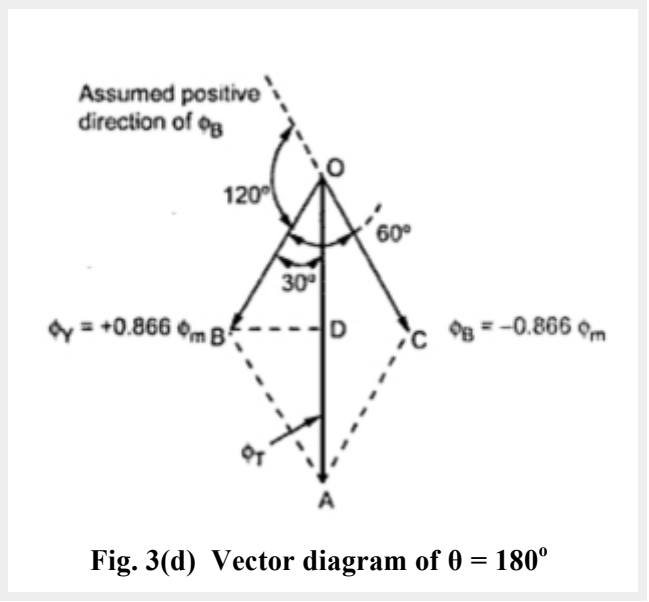


Fig. 3(d) Vector diagram of θ = 180°

So $\Phi_R = 0$, Φ_Y is positive and Φ_B is negative. Drawing Φ_Y and Φ_B in the appropriate directions, we get the phasor diagram as shown in the Fig. 3(d).

From phasor diagram, it can be easily proved that,

$$\Phi_T = 1.5\ \Phi m$$

Thus the magnitude of Φ_T once again remains same. But it can be seen that it has further rotated through 60° from its previous position in clockwise direction.

So for an electrical half cycle of 180°, the resultant Φ_T has also rotated through . This is applicable for the windings from the above discussion we have following conclusions :

a) The resultant of the three alternating fluxes, separated from each other by , has a constant amplitude of 1.5 Φm where Φm is maximum amplitude of an individual flux due to any phase.

b) The resultant always keeps on rotating with a certain speed in space.

Key point : This shows that when a three phase stationary windings are excited by balanced three phase a.c. supply then the resulting field produced is rotating magnetic field. Though nothing is physically rotating, the field produced is rotating in space having constant amplitude.

Speed of R.M.F

$$N_s = \frac{120\,f}{P} = \textbf{Speed of R.M.F.}$$

Direction of R.M.F.

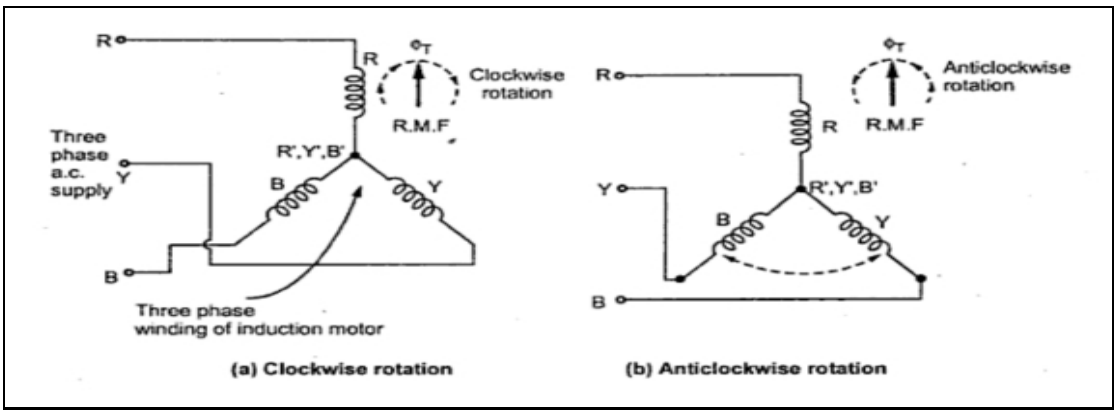


Fig. 4

The direction of the R.M.F. is always from the axis of the leading phase of the three phase winding towards the lagging phase of the winding. In a phase sequence of R-Y-B, phase R leads Y by 120° and Y

leads B by120°. So R.M.F. rotates from axis of R to axis of Y and then to axis of B and so on. So its direction is clockwise as shown in the Fig. 4(a). This direction can be reversed by interchanging any two terminals of the three phase windings while connecting to the three phase supply. The terminals Y and B are shown interchanged in the Fig. 4(b). In such case the direction of R.M.F. will be anticlockwise.

As Y and B of windings are connected to B and Y from winding point of view the phase sequence becomes R-Y-B. Thus R.M.F. axis follows the direction from R to B to Y which is anticlockwise.

****

تكلم عن تركيب المحرك الحثى ؟

ومما يعيب هذا المحرك أنه ليس من السهل التحكم في سرعته كما أن تيار البدء لهذا المحرك عالي (٦ -٨ أضعاف تيار الحمل الكامل) وكذلك معامل القدرة منخفض عند الأحمال الخفيفة.

تركيب المحرك الحثي

المحرك الحثي ثلاثي الأوجه Three Phase Induction Motor يتركب من عضوين رئيسيين كأي محرك آخر: هما العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor ، انظر الشكل رقم (١ -١).

العضو الثابت:

العضو الثابت يتكون من شرائح متراصة من الحديد المغناطيسي تتراوح سماكتها من ٠.٣ مم إلى ٠.٦مم . حسب حجم المحرك .(شكل رقم ٢ -١) ، ومعزولة عن بعضها بعازل كهربائي بحيث تكون مع بعضها جسماً أسطوانياً مجفور بداخله عدد من المجاري وذلك لتركيب الملفات ، انظر شكل رقم (٣ -١).

الهدف من تصنيع العضو الثابت بهذه الطريقة هو تقليل حرارة الحديد الناتجة من التيارات الدوامية التي تكونت بسبب تعرض الحديد للمجال المغناطيسي المتغير داخل المحرك ، كما أنه يوجد في المحركات الكبيرة عادةً فتحات تهوية بين الشرائح في العضو الثابت. بعد اكتمال تصنيع العضو الثابت بهذه الطريقة يتم تقسيمه إلى العدد المطلوب من الأقطاب وتقسم المجاري في كل قطب على الأوجه الثلاثة ثم بعد ذلك يتم تركيب ملفات كل وجه في المجاري الخاصة به تحت كل قطب بحيث يفصل بين كل وجه وأخر ١٢٠ درجة كهربائية وفي نهاية عملية اللف يكون قد تم تركيب ثلاثة ملفات في العضو الثابت لكل ملف طرفان هذه الأطرف الستة يتم تغذية العضو الثابت من خلالها بعد توصيلها إما على شكل نجمة أو دلتا ، انظر الأشكال (٤ -١، ٥ -١).

شكل رقم ٢ -١ : شريحة عضو ثابت

العضو الدوار:

يوجد منه نوعان مختلفان في التركيب ومتقاربان في الخواص الكهربائية ، ويسمى المحرك عادةً باسم عضوه الدوار للتميز بين نوعيه وهما: العضو الدوار الملفوف أو ذو حلقات الانزلاق والعضو الدوار ذو القفص السنجابي.

العضو الدوار الملفوف (ذو حلقات الانزلاق):

العضو الدوار الملفوف Wound Rotor يتركب من شرائح متراصة من الحديد المغناطيسي المعزولة عن بعضها مركبة على عمود المحرك ومحفور عليها عدد من المجاري لتركيب الملفات ،شكل رقم (٦ - ١).

يقسم العضو الدوار إلى عدد من الأقطاب مساوي لأقطاب العضو الثابت الذي سيركب فيه وتقسم المجاري في كل قطب إلى ثلاثة أقسام كل قسم يركب فيه ملفات أحد الأوجه الثلاثة بحيث يكون بين كل وجه وأخر ١٢٠ درجه كهربائية ، عادةً هذه الملفات الثلاثة توصل على شكل نجمة حيث تقصر ثلاثة أطراف مع بعضها داخل العضو الدوار بينما الثلاثة الأخرى يتم توصيلها إلى ثلاث حلقات انزلاق Slip Rings مركبة على نفس العمود.

من خلال حلقات الانزلاق وعن طريق فرش كربونية مماسة لحلقات الانزلاق أثناء الدوران يتم توصيل ملفات العضو الدوار إلى خارج المحرك وذلك من أجل التحكم في بدء دوران المحرك أو في تنظيم سرعته وذلك بتوصيل مقاومات خارجية بهذه الأطراف الثلاثة، لذلك فإن هذا النوع من المحركات يتميز بإمكانية تغيير خواص تشغيله على نطاق واسع عن طريق توصيل ملفات العضو الدوار بدائرة خارجية ، انظر شكل رقم (٧ - ١).

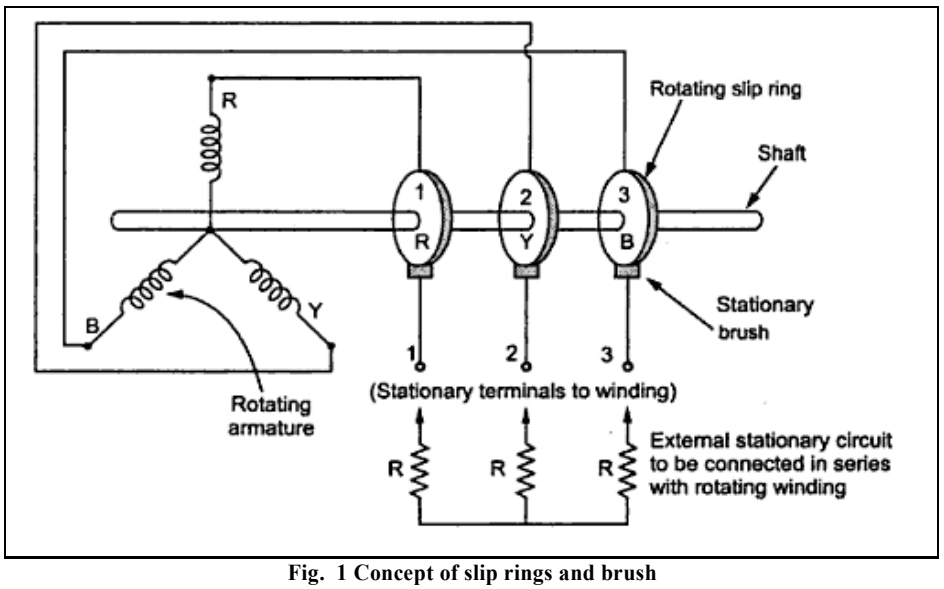


Fig. 1 Concept of slip rings and brush

العضو الدوار ذو القفص السنجابي:

العضو الدوار ذو القفص السنجابي Squirrel cage مشابة تماماً للعضو الدوار ذي حلقات الانزلاق من حيث التركيب الميكانيكي ولكن بدلاً من وضع ملفات في المجاري فإنه يوضع قضبان من النحاس أو الألمنيوم وهذه القضبان مقصورة أطرافها مع بعض من الجهتين بحلقتين من نفس مادة القضبان . هذا النوع لا يقسم إلى عدد معين من الأقطاب وإنما يستطيع التكيف تلقائياً مع عدد الأقطاب والأوجه للعضو الثابت الذي سيركب فيه. وحيث أنه لا يوجد به حلقات انزلاق فإنه لا يمكن ربطه بدائرة خارجية وبالتالي لا يمكن تغيير خواص تشغيل هذا المحرك أو التحكم بسرعته ، انظر

ما هى ظاهرة Skewing فى المحرك الحثى ؟

فى المحرك الحثى ذو القفص السنجابى squirrel cage يتم تصميم مجارى (slots) العضو الدوار (rotor) بحيث تكون غير موازيه لمحور عمود الدوران (shaft axis) ومن فوائد ذلك :

١- منع أسنان (teeth) الـStator والـ rotor من أن تتكلبش مغناطيسيا (magnetically locked)

The advantages of skewing are,

1. A magnetic hum i.e. noise gets reduced due to skewing hence skewing makes the motor operation quiter.
2. It makes the rotor operation smooth.
3. The stator and rotor teeth may get magnetically locked. Such a tendency of magnetic locking gets reduced due to skewing.
4. It increases the effective transformation ratio between stator and roto

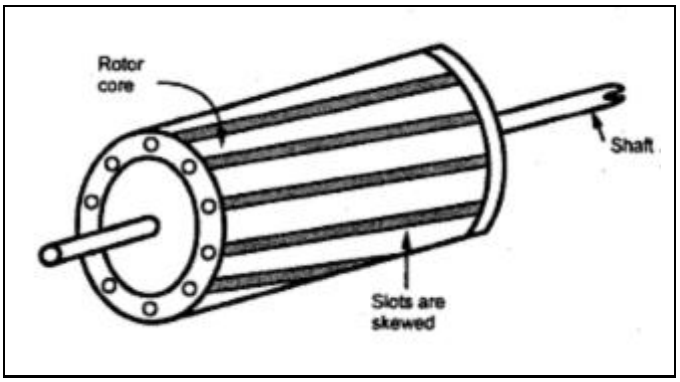


Fig. 2 Skewing in rotor construction

Comparison of Squirrel Cage and Wound Rotor

Sr. No.	Wound or slip ring rotor	Squirrel cage rotor
1	Rotor consists of a three phase winding similar to the stator winding.	Rotor consists of bars which are shorted at the ends with the help of end rings.
2	Construction is complicated.	Construction is very simple.
3	Resistance can be added externally.	As permanently shorted, external resistance cannot be added.
4	Slip rings and brushes are present to add external resistance.	Slip rings and brushes are absent.
5	The construction is delicate and due to brushes, frequent maintenance is necessary.	The construction is robust and maintenance free.
6	The rotors are very costly.	Due to simple construction, the rotors are cheap.
7	Only 5% of induction motors in industry use slip ring rotor.	Very common and almost 95% induction motors use this type of rotor.
8	High starting torque can be obtained.	Moderate starting torque which cannot be controlled.
9	Rotor resistance starter can be used.	Rotor resistance starter cannot be used.
10	Rotor must be wound for the same number of poles as that of stator.	The rotor automatically adjusts itself for the same number of poles as that of stator.
11	Speed control by rotor resistance is possible.	Speed control by rotor resistance is not possible.
12	Rotor copper losses are high hence efficiency is less.	Rotor copper losses are less hence have higher efficiency.
13	Used for lifts, hoists, cranes, elevators, compressors etc.	Used for lathes, drilling machines, fans, blowers, water pumps, grinders, printing machines etc.

ما فكرة عمل المحركات الحثيه (induction motors) ؟

عند توصيل أطراف العضو الثابت (stator) بمصدر الجهد ينشأ مجال مغناطيسى دوار (magnetic rotating field) هذا المجال يقطع ملفات ال rotor فيولد فيها قوه دافعه كهربيه مستحثه e.m.f وبما أن ملفات ال rotor مقصوره من الطرفين فإنه سيمر فيها تيارات ثلاثية الأوجه بين كل وجه وآخر 120 درجه وبالتالى سيتولد مجال مغناطيسى دوار آخر فى الثغره الهوائيه air gap نتيجه لمرور تيات ثلاثية الأوجه فى ال rotor . فى هذه الحاله أصبح هناك مجالان مغناطيسيان دواران الأول ناتج من ال stator ويدور بالسرعه التزامنيه Ns والثانى ناتج من ال rotor ويدور بسرعه (Ns – N) بالنسبه للعضو الدوار حيث N هى سرعة العضو الدوار ويدور بالسرعه التزامنيه بالنسبه لل stator .

وحيث أن هذين المجالين المغناطيسين يدوران بنفس السرعه والإتجاه فإنه سيتولد عزم فعال على ال rotor يؤدى إلى دورانه بنفس سرعة وإتجاه دوران المجالين ، هذا العزم يتناسب طرديا مع شدة المجالين وجيب الزاويه بينهما طبقا للمعادله الآتيه :

$$T \propto F_s \cdot F_r \cdot Sin(\delta_{sr}) \qquad (3-1)$$

حيث:

T: العزم

F_s: شدة المجال المغناطيسي في العضو الثابت

F_r: شدة المجال المغناطيسي في العضو الدوار

δ_{sr}: الزاوية بين المجالين

عندما تزداد سرعة ال rotor فإن سرعة تعرض ملفاته لقطع خطوط المجال المغناطيسى الدوار ستقل طبقا للمعادله الآتيه :

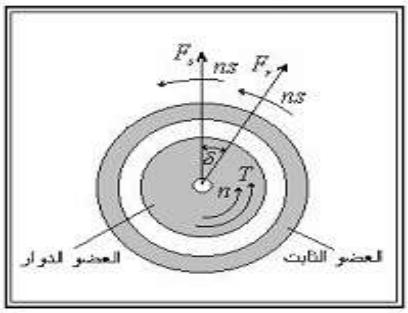
$$n_f = ns - n \qquad (4-1)$$

حيث:

n_f: سرعة قطع خطوط المجال المغناطيسي لموصلات العضو الدوار

وبالتالى تقل القوه الدافعه الكهربيه المستحثه e.m.f المتولده فى ملفات العضو الدوار وبالتالى فإن قيمة التيارات الماره فى ملفات ال rotor ستقل وبالتالى شدة المجال المغناطيسى المتولد منها ستقل ومن ثم يقل العزم المؤثر على ال rotor وهكذا حتى تصل سرعة ال rotor إلى قرب السرعه التزامنيه وعندما تصل سرعة ال rotor إلى قرب السرعه التزامنيه تكون التيارات المتولده فى ملفات ال rotor صغيره وبالتالى يضعف المجال المغناطيسى الناشئ عنها مما يؤدى إلى إنخفاض العزم المؤثر على ال rotor . وعندما تستقر سرعة ال rotor فإن العزم المؤثر على العضو الدوار يكون مساوى لقوة الإحتكاك التى يتعرض لها العضو الدوار .

عند تحميل المحرك تقل سرعة ال rotor وبالتالى تزداد سرعة قطع المجال المغناطيسي الدوار لملفات ال rotor مما يؤدى إلى زيادة قيم التيارات الماره فى ملفاته وبالتالى تزداد شدة المجال المغناطيسي الناشئ عنها ومن ثم زيادة العزم المؤثر على ال rotor ثم تستقر سرعة ال rotor عند سرعه جديده وعندها يكون العزم المؤثر عليه مساويا لعزم الحمل المسلط عليه



شكل رقم ١١ -١: محاور المجالات المغناطيسية في المحرك الحثي

ويمكن توضيح فكرة العمل كالتالى :

Induction motor works on the principle of electromagnetic induction.

When a three phase supply is given to the three phase stator winding, a rotating magnetic field of constant magnitude is produced as discussed earlier. The speed of this rotation magnetic field is synchronous speed N_s r.p.m.

$$N_s = \frac{120\,f}{P} = \text{speed of rotating magnetic field}$$

Where f = supply frequency.

p = Number of poles for which stator winding is wound.

This rotating field produces an effect of rotating poles around a rotor. Let direction of rotation of this rotating magnetic field is clockwise as shown in the Fig. 1(a).

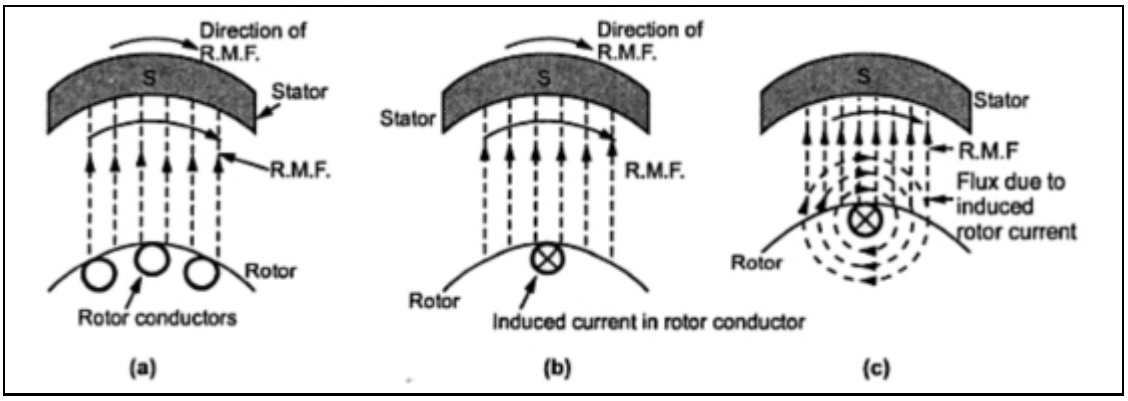


Fig. 1

Now at this instant rotor is stationary and stator flux R.M.F. is rotating. So its obvious that there exists a relative motion between the R.M.F. and rotor conductors. Now the R.M.F. gets cut by rotor conductors as R.M.F. sweeps over rotor conductors. Whenever conductors cuts the flux, e.m.f. gets induced in it. So e.m.f. gets induced in the rotor conductors called rotor induced e.m.f. This is electro-magnetic induction. As rotor forms closed circuit, induced e.m.f. circulates current through rotor called rotor current as shown in the Fig.1(b). Let direction of this current is going into the paper denoted by a cross as shown in the Fig. 1(b).

Any current carrying conductor produces its own flux. So rotor produces its flux called rotor flux. For assumed direction of rotor current, the direction of rotor flux is clockwise as shown in the Fig. 1(c). This direction can be easily determined using right hand thumb rule. Now there are two fluxes, one R.M.F. and other rotor flux. Both the fluxes interact with each as shown in the Fig. 1(d). On left of rotor conductor, two fluxes cancel each other to produce low flux area. As flux lines act as stretched rubber band, high flux density area exerts a push on rotor conductor towards low flux density area. So rotor conductor experience a force from left to right in this case, as shown in the Fig. 1(d), due to interaction of the two fluxes.

As all the rotor conductors experience a force, the overall rotor experiences a torque and starts rotating. So interaction of the two fluxes is very essential for a motoring action. As seen from the Fig. 1(d), the direction of force experienced is same as that of rotating magnetic field. Hence rotor starts rotating in the same direction as that of rotating magnetic field.

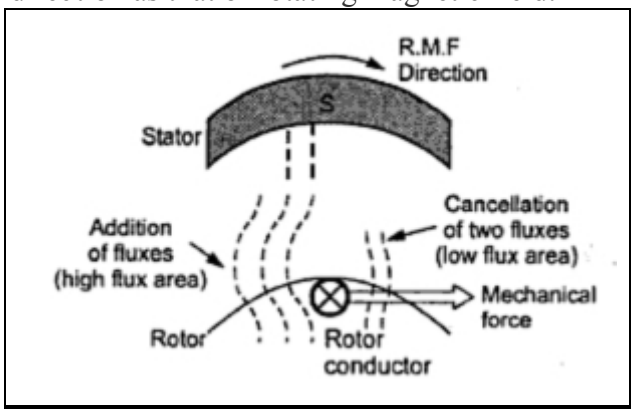


Fig 1 (d

Alternatively this can be explained as : according to Lenz's law the direction of induced current in the rotor is so as to oppose the cause producing it. The cause of rotor current is the induced e.m.f. which is induced because of relative motion present between the rotating magnetic field and the

rotor conductors. Hence to oppose the relative motion i.e. to reduce the relative speed, the rotor experiences a torque in the same direction as that of R.M.F. and tries to catch up the speed of the rotating magnetic field.

So, Ns = Speed of rotating magnetic field in r.p.m.

N = Speed of rotor i.e. motor in r.p.m.

Ns - N = Relative speed between the two, rotating magnetic field and the rotor conductors.

Thus rotor always rotates in same direction as that of R.M.F.

****

ما هو Slip ؟

$$s = \frac{ns - n}{ns}$$

S هى معامل الإنزلاق وتتراوح ما بين ١ % إلى ٢ % فى المحركات الصغيره وما بين ٣ % إلى ٣ % فى المحركات الكبيره

S=1 فى بداية الحركه starting ، S=0 عند السرعه التزامنيه

يسمى أحيانا المحرك الحثى بمحول دوار rotating transformer لأنه يعمل طبقا لنظرية الحث الكهرومغناطيسي حيث الإبتدائى هو ال stator والثانوى هو ال rotor ولكن لا يشبه المحول من حيث تردد الجهود والتيارات فى ال rotor فعندما يكون ال rotor ثابت فإن تردد التيار ات المتولده فيه هو نفسه تردد التيارات فى ال stator (كالمحول تماما) ولكن عند زيادة سرعة ال rotor يقل تردد التيا ات والجهود فى ال rotor تدريجيا حتى تصل إلى الصفر عند السرعه التزامنيه .

$$f_r = S \cdot f_s$$

****

ما هى العوامل التى تؤثر على قيمة العزم Torque المتولد فى المحرك احثى ؟

The torque produced in the induction motor depends on the following factors :

1. The part of rotating magnetic field which reacts with rotor and is responsible to produce induced e.m.f. in rotor.
2. The magnitude of rotor current in running condition.
3. The power factor of the rotor circuit in running condition.

Mathematically the relationship cab be expressed as,

$T \propto \Phi I_{2r} \cos \Phi_{2r}$

$$T \propto \frac{s E_2^2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} \text{ N-m}$$

$$T_{st} = \frac{3}{2\pi n_s} \cdot \frac{E_2^2 R_2}{(R_2^2 + X_2^2)}$$

****

إستنتج معادلة الـ maximum torque ومتى يحدث ؟

$$T \propto \frac{s E_2^2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2} \text{ N-m}$$

$$\therefore \frac{dT}{ds} = \frac{(k s E_2^2 R_2)\frac{d}{ds}(R_2^2 + s^2 X_2^2) - (R_2^2 + s^2 X_2^2)\frac{d}{ds}(k s E_2^2 R_2)}{(R_2^2 + s^2 X_2^2)^2} = 0$$

$s = R_2/X_2$ Neglecting negative slip

This is the slip at which the torque is maximum and is denoted as s_m.

$$\therefore \quad \boxed{s_m = R_2/X_2}$$

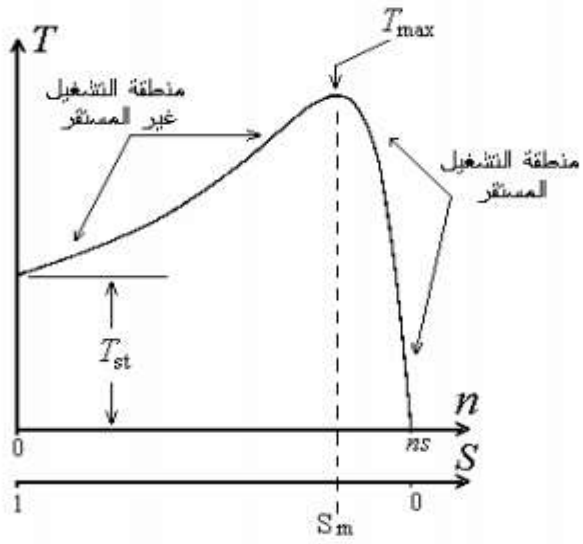
by substituting $s_m = R_2/X_2$ in the torque equation.

$$T_m = \frac{k E_2^2}{2X_2} \text{ N-m.}$$

from the expression of T_m, it can be observed that

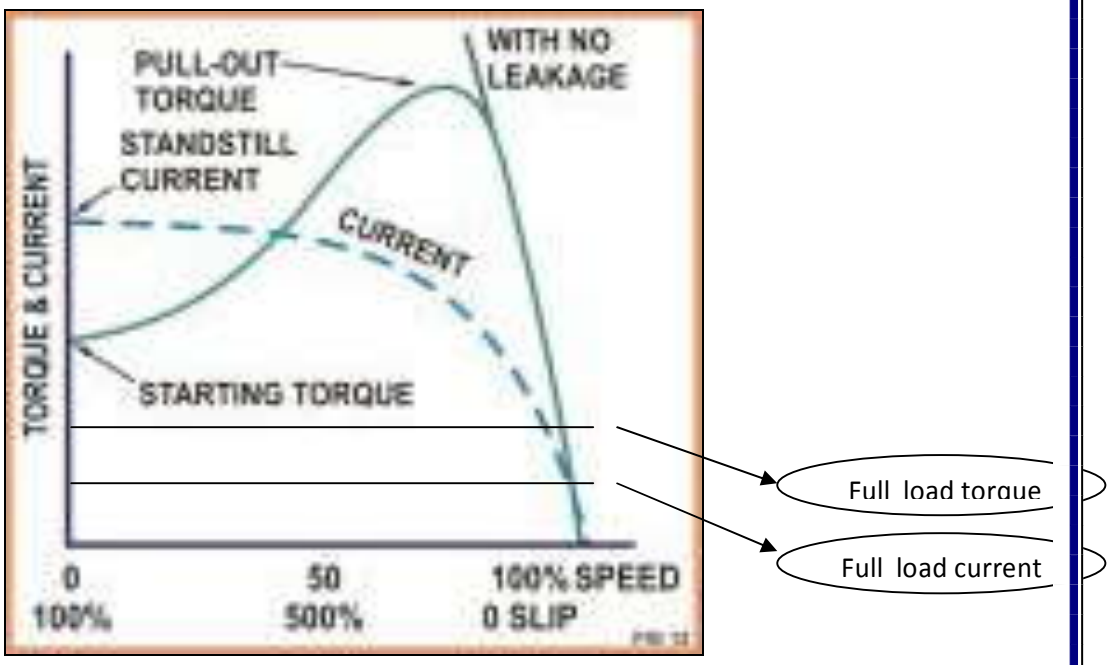
وبذلك نجد أن Maximum Torque ثابت القيمه ولايعتمد على الـ Slip ولكن يمكن تغيير قيمة الـ Slip التى يحث عندها العزم الأقصى وذلك بإضافة مقاومات على التوالى مع الـ rotor

إشرح منحنى العزم / السرعه للمحرك الحثى ؟



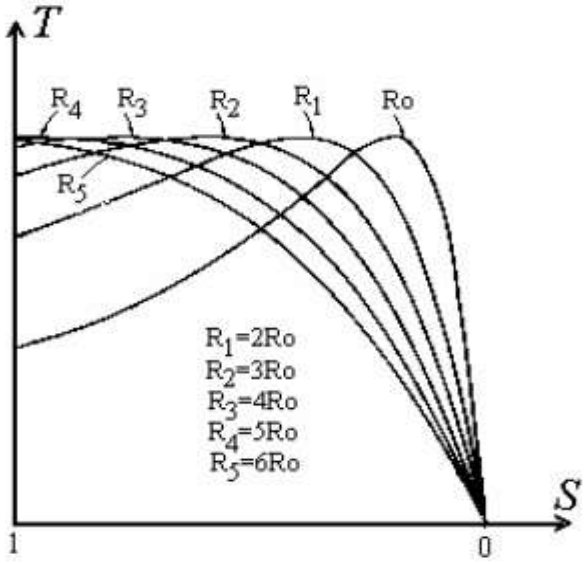
شكل رقم ٢٣ -١: العلاقة بين (العزم/الانزلاق) أو (العزم /السرعة)

منحنى (السرعة/العزم) الموضح في الشكل رقم (٢٣ -١) ينقسم إلى منطقتين: الأولى منطقة التشغيل غير المستقر وهي المنطقة التي تسبق موضع العزم الأقصى ، في هذه المنطقة لا يستطيع المحرك إدارة أي حمل مهما كان وإذا حدث أن حمل المحرك في هذه المنطقة فإنه سوف يتباطئ حتى يتوقف عن الدوران.
المنطقة الأخرى هي منطقة التشغيل المستقر وهي المنطقة التي بعد موضع العزم الأقصى ، في هذه المنطقة يستطيع المحرك إدارة الحمل المقنن له ، وعادةً يكون عزم الحمل الكامل مساوياً تقريباً لنصف العزم الأقصى للمحرك بشرط أن لا يزيد عن عزم البدء ، وفي حالة كون عزم الحمل أكبر من عزم البدء فإن المحرك لا يستطيع بدء الدوران ، لذلك ينصح في هذه الحالة بدء تشغيل المحرك بحمل خفيف وبعد أن يصل إلى منطقة التشغيل المستقر تضاف بقية الأحمال.



كيف يمكن تغيير موضع العزم الأقصى maximum torque للمحرك الحثى ؟

يمكن ذلك بإضافة مقاومه موصله على التوالى مع ملفات العضو الدوار الملفوف wound rotor



شكل رقم ٢٤ -١: تأثير تغير مقاومة العضو الدوار على موضع العزم الأقصى

بإضافة مقاومات فى دائرة الـ rotor يزداد الـ starting torque وتقل قيمة الـ slip التى يحدث عندها العزم الأقصى بينما يظل الـ maximum torque كما هو بدون تغيير أى لا تتغير قيمته

لماذا تيار البدء عالى فى المحرك الحثى ؟

لأن المعاوقه المغناطيسيه للفجوه الهوائيه - air gap - (الوسط المغناطسي) كبيرة جداااا فتحتاج الى تيار مغنطة كبير لامكانية مغنتطها

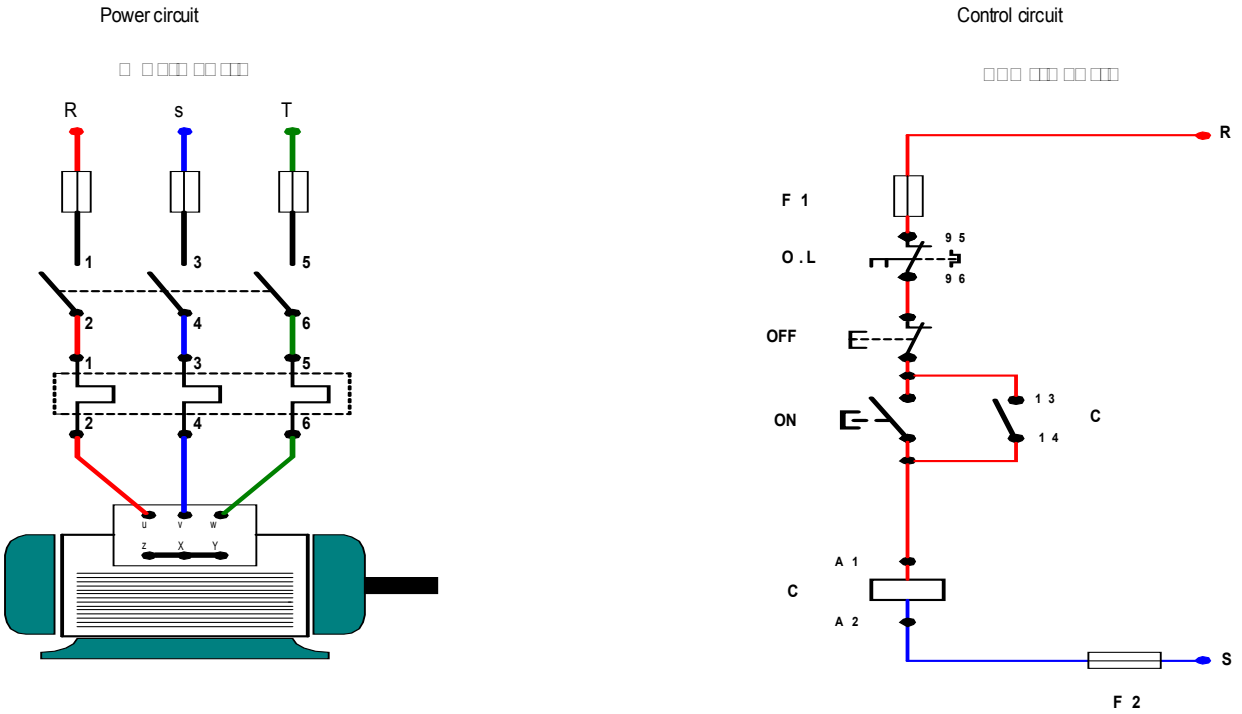
إشرح طرق التحكم فى تيار البدء فى المحرك الحثى ؟

حينما يبدأ تشغيل المحرك فيجب أن يتحمل مرور تيار عالي للتغلب على القصور الذاتي للكتلة الميكانيكية للمحرك مما يستلزم عزم كبير فى البداية ، ويبلغ التيار فى بداية التشغيل حوالي ٦ مرات قدر تيار التحميل المقنن للمحرك ، وقد يسبب التيار العالي هبوطا حادا فى الجهد الكهربي المغذي للشبكة مما يؤدي إلى فصل بعض الأحمال ، لذلك يجب ألا يزيد الهبوط فى جهد المصدر

أثناء بدء تشغيل المحرك عن ٤ % ويتطلب ذلك أن يكون جهاز بدء التشغيل قادرًا على تحميل المحرك عدة مرات خلال الساعة الواحدة دون مشاكل للشبكة . ونستعرض فيما يلي أهم طرق بدء تشغيل المرحك الحثي.

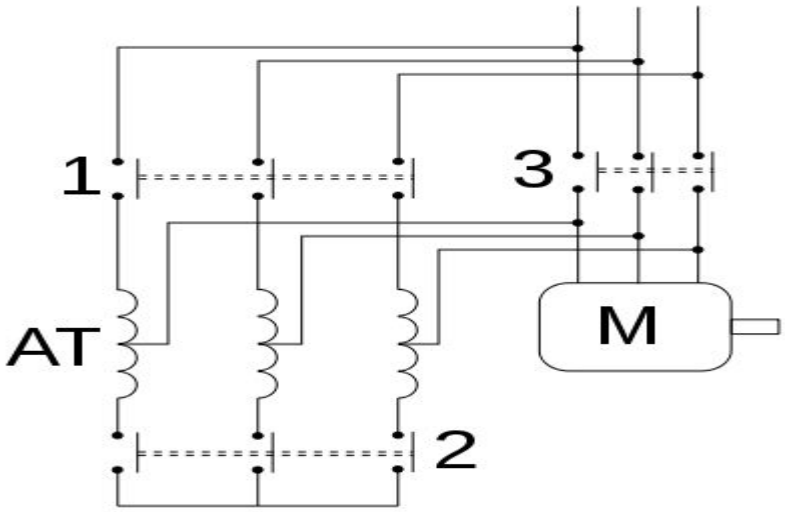
١- Direct on line method

تستخدم هذه الطريقة للمحركات ذات القدرة المنخفضة مما يضمن ألا ينخفض جهد المنبع بأقل من ٤% عن القيمة المقننة ويكون ذلك بتوصيل أطراف ال stator مباشرة لمصدر الجهد ويستخدم للقدرات حتى 37 kw



٢- إستخدام Autotransformer

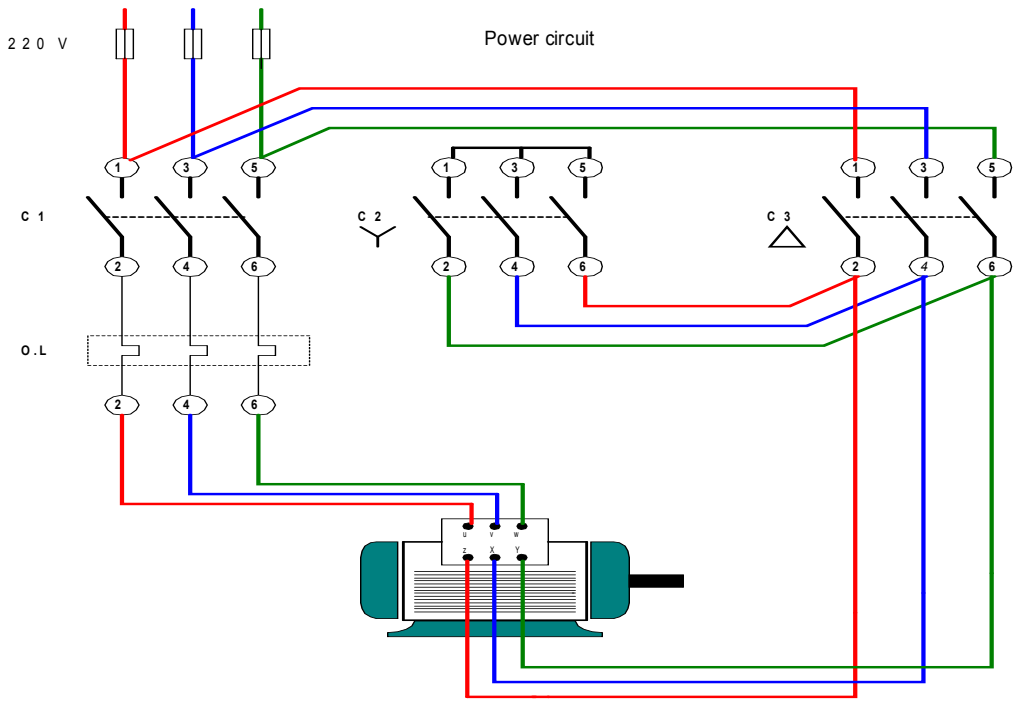
فى هذه الطريقه يتم توصيل أطراف ال stator بمحول ذاتى ثلاثى الأوجه بحيث يخفض الجهد المسلط على ملفات ال stator إلى قيمه تتناسب مع تيار البدء المسموح به وبعد إجتياز المحرك فترة البدء يتم تسليط جهد المصدر كاملا على ملفات ال stator وذلك بفصل المحول . هذه الطريقه مثاليه جدا حيثلا يوجد فيها أى قدره مفقوده كما أنها تعتبر الخيار الأفضل للمحركات التى تم توصيل ملفاتها داخليا من قبل المصنع على شكل نجمه .



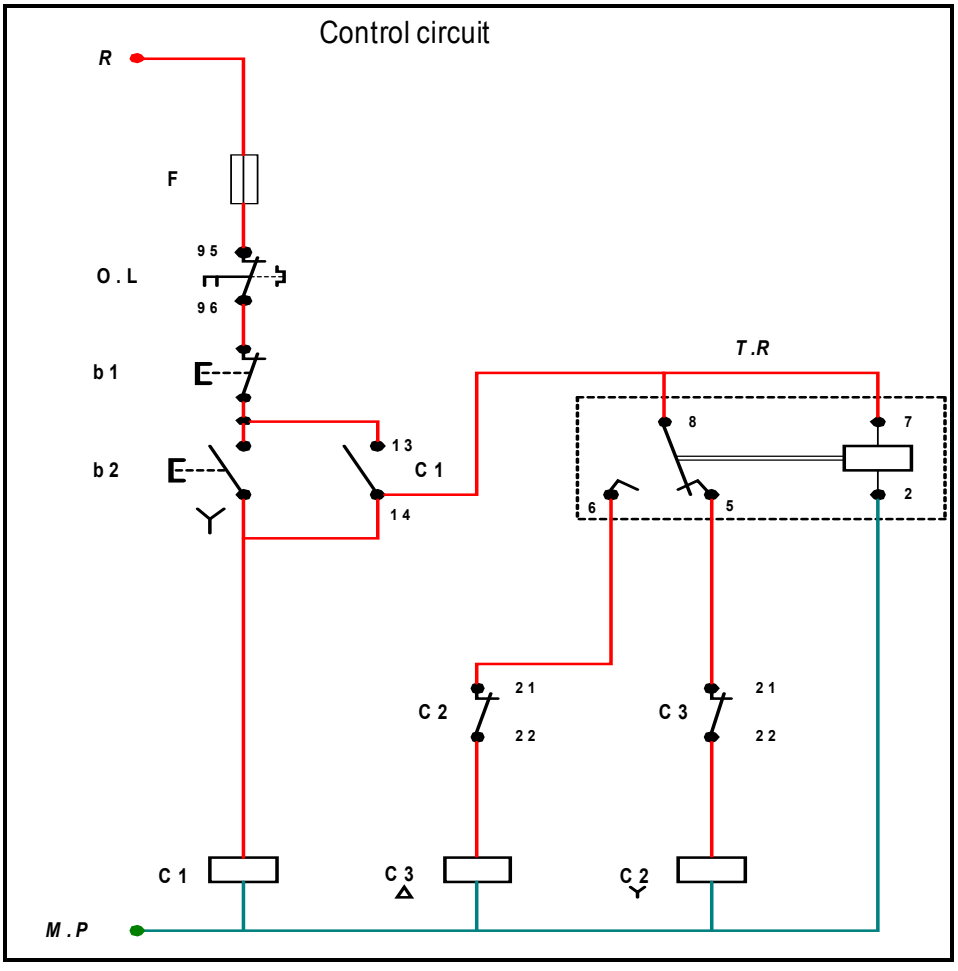
٣- Y / Δ method

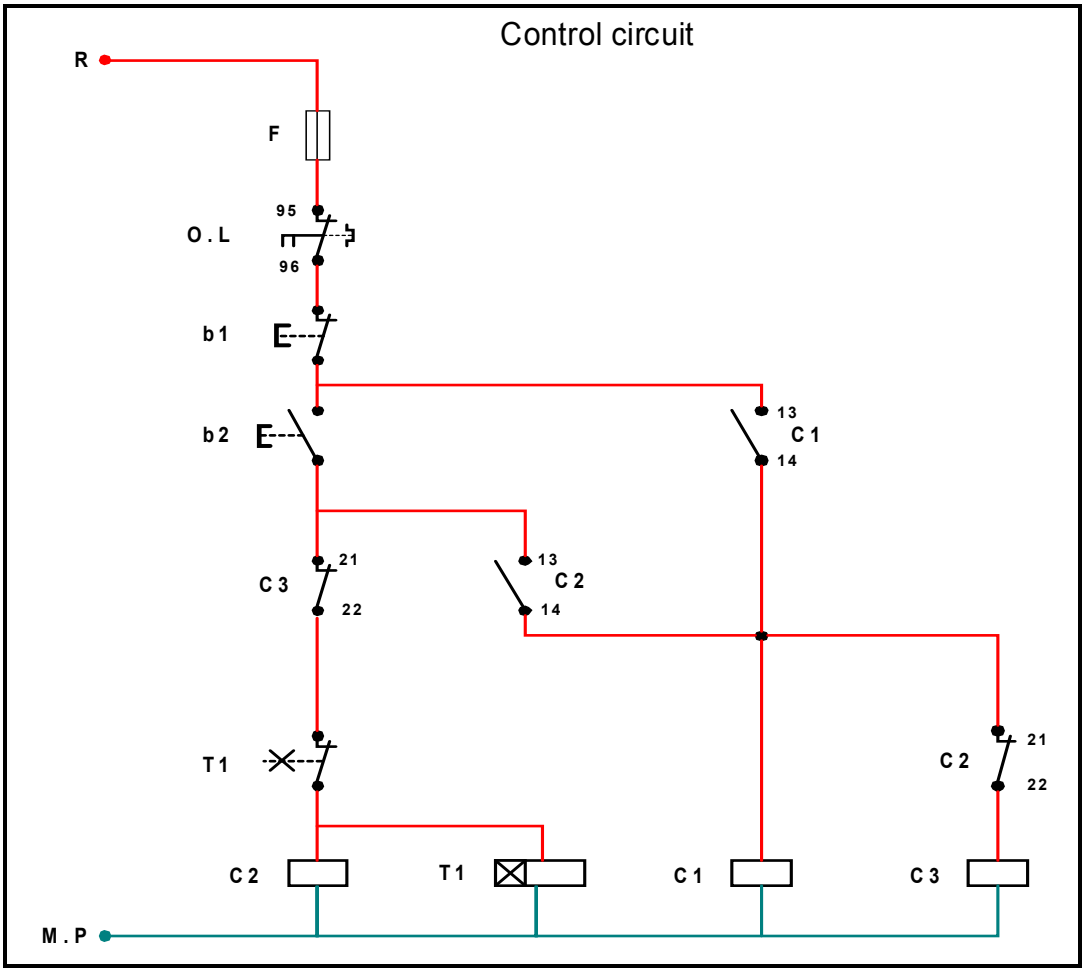
هذه الطريقه مناسبه لمحركات ذات الست أطراف والتى توصل ملفاتها على شكل دلتا أثناء التشغيل العادى حيث توصل ملفات ال stator عند البدء على شكل نجمه ونتيجه لذلك يقل جهد الوجه إلى $(1/\sqrt{3})$ من جهد المصدر وينخفض تيار الخط إلى (1/3) من التيار المار فى حالة التوصيل على شكل دلتا وبالتالي فإن العزم ينخفض إلى ٣/١ قيمته المقننة يتم توصيل الأطراف فى صورة نجمة حتى تصل السرعة إلى 75% أو 80% من السرعة المقننة حينئذ يتم أتوماتيكيًا تغيير التوصيل إلي دلتا

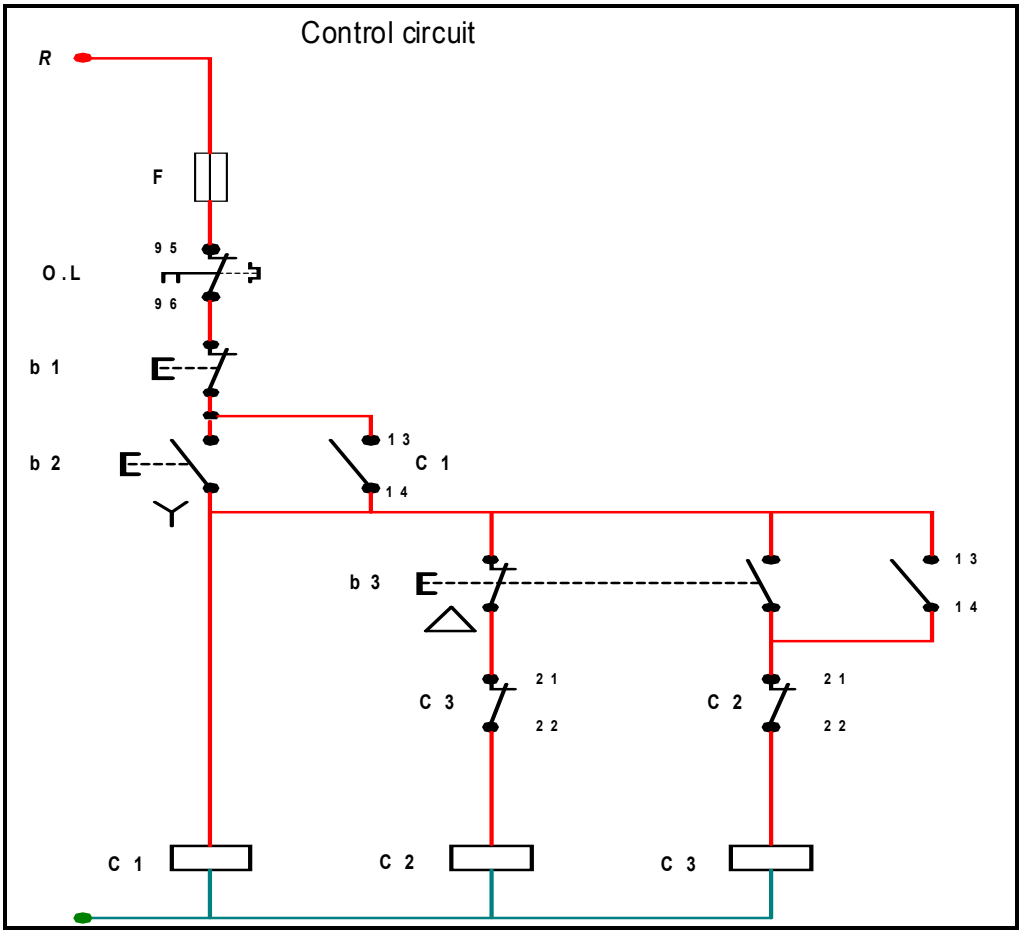
ملحوظه : أن هذا الأسلوب لا يسمح بعكس إتجاه الدوران باستخدام طريقة عكس تتابع الثلاث أطوار ، وإذا حاولنا ذلك فسوف يؤدي إلي إنفجار منصهرات خطوط التوزيع.



Power circuit

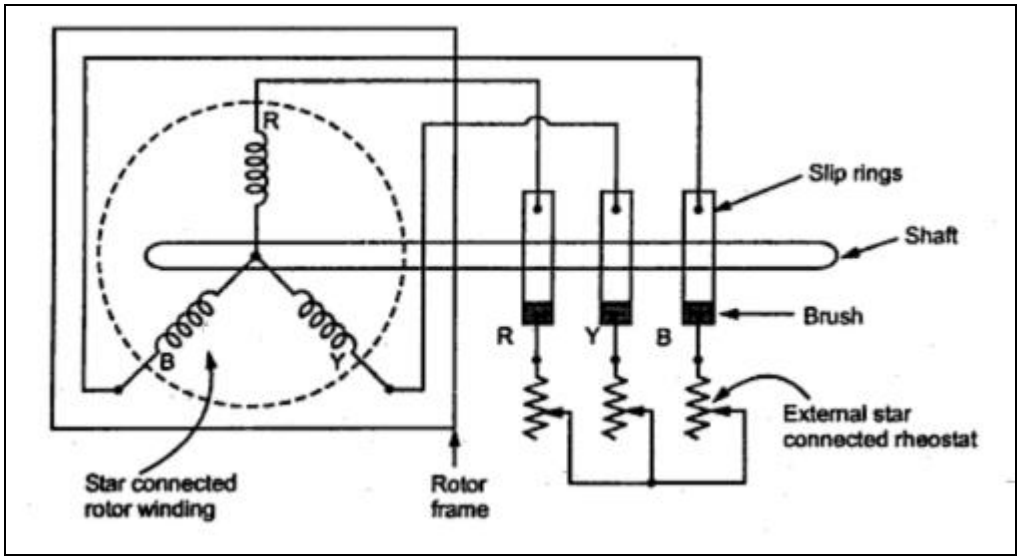



Control circuit
R
F
95
O.L
96
b1
b2
13
C1
14
21
C3
22
13
C2
14
T1
21
C2
22
C2
T1
C1
C3
M.P


Control circuit
R
F
95
O.L
96
b1
b2
13
C1
14
b3
13
14
21
C3
22
21
C2
22
C1
C2
C3

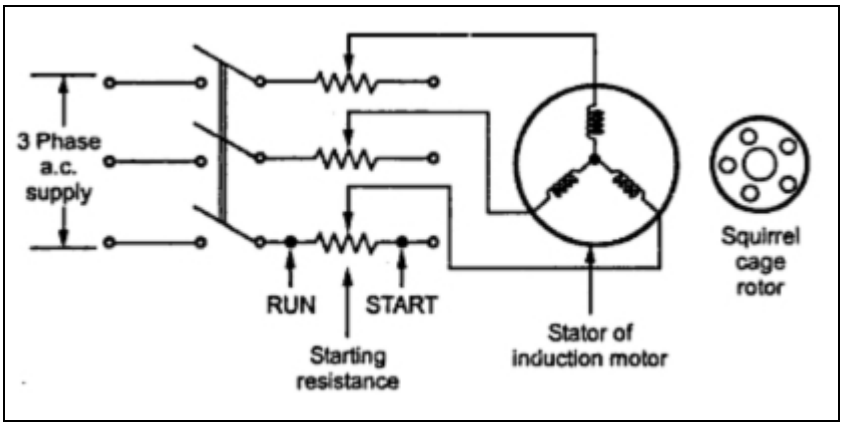
توصيل مقاومات على التوالى مع العضو الدوار series resistance

هذه الطريقة خاصة فقط بالمحرك ذي حلقات الانزلاق حيث يمكن توصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدوار وبالتالي فإن تيار البدء يقل نتيجة لزيادة المقام في المعادلة (٣٩ -١) ، وبعد أن يجتاز المحرك فترة البدء يتم إزالة هذه المقاومات تدريجياً وذلك لتجنب زيادة المفاقيد في دائرة العضو الدوار. هذه الطريقة تعتبر الأفضل للمحركات ذات حلقات الانزلاق ، كما أنها تزيد من عزم البدء للمحرك وذلك لأن مقاومة البدء تضاف إلى R'_2 وبالتالي فإن الانزلاق الذي يحدث عنده أعلى عزم يزداد وبالتالي ينتقل موضع العزم الأقصى إلى الأمام مما يعني الزيادة في عزم البدء للمحرك ، انظر الأشكال



توصيل مقاومات على التوالى مع ال stator

عند توصيل مقاومات على التوالى مع ملفات ال stator يؤدى إلى تقليل الجهد المسلط على العضو الثابت وبالتالى يقل تيار البدء ثم بعد إجتياز فترة البدء يمكن إلقاء هذه المقاومات تدريجيا . عيب هذه الطريقه هو زيادة المفاقيد النحاسيه مما يجعلها غير مناسبه للإستخدام خصوصا مع المحركات الكبيره .

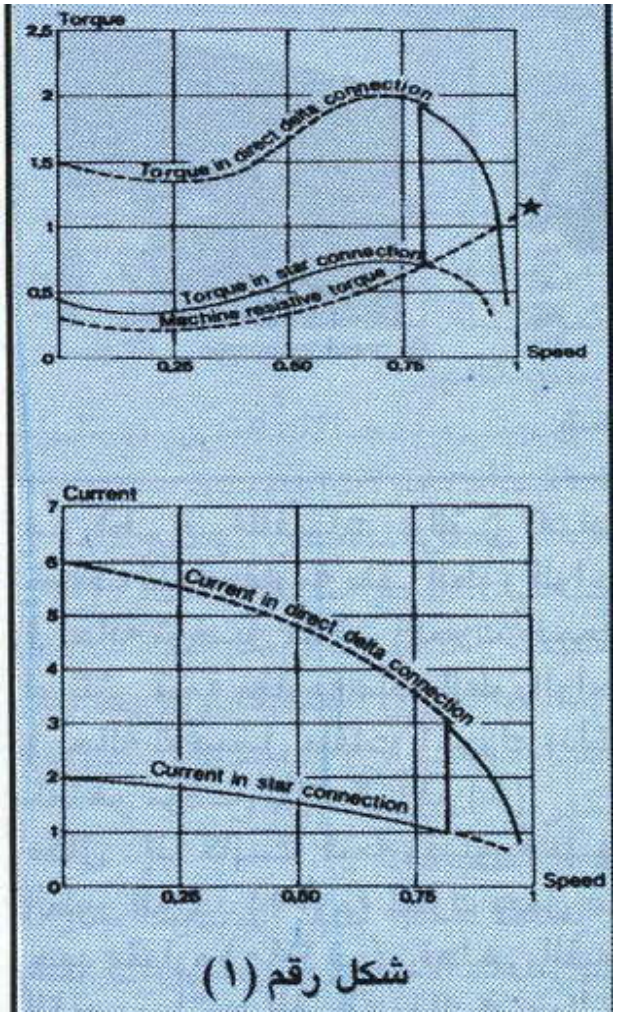


٤- Soft starter method

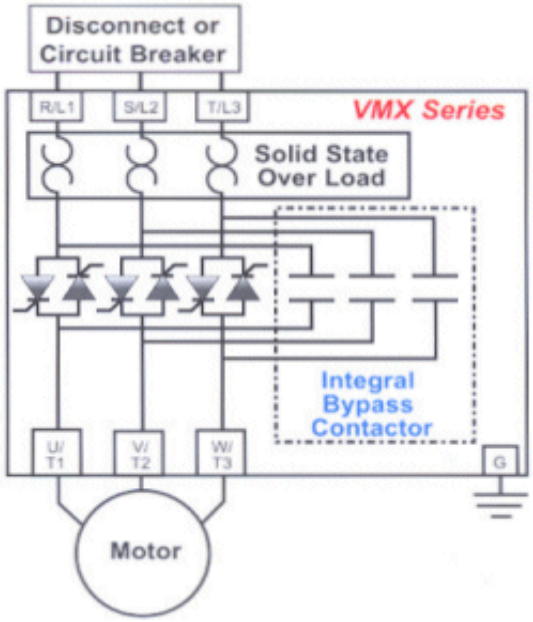
يتضح من الشكل رقم (١) أنه بالنسبه لطريقة Direct on line starting تكون قيمة تيار البدء فى المدى من 4 – 8 التيار المقنن (rated current) مما يمثل عبئا على كل من شبكة التغذيه والمحرك وكذلك فإن قيمة عزم البدء starting torque تقدر بحوالى مره ونصف القيمه المقننه لعزم المحرك (full load torque) مما يشكل أيضا عبئا ميكانيكيا على جميع لأجزاء الميكانيكيه للمحركات والمعدات .

أما بالنسبه لطريقة Star / Delta starter فتكون قيمة تيار البدء من 2 – 3 مرات التيار المقنن وقيمة عزم البدء أقل من العزم المقنن للمحرك . وعلى الرغم من ذلك .. فمن المعروف أنه فى اللحظه التى يتم فيها تغيير طريقة توصيل ملفات المحرك من star إلى Delta

فإن لك يكون مصحوبا بمرور تيارات عابره Transient Currents ذات قيم قصوى عاليه جدا .
مما سبق يتضح مدى الحاجه لإتخدام وسائل جديده لبدء حركة المحركات مع تفادى الأثار الجانبيه للطرق التقليديه . ومن هنا نشأت فكرة إستخدام أشباه الموصلات لعمل بادئات التشغيل الهادئه .

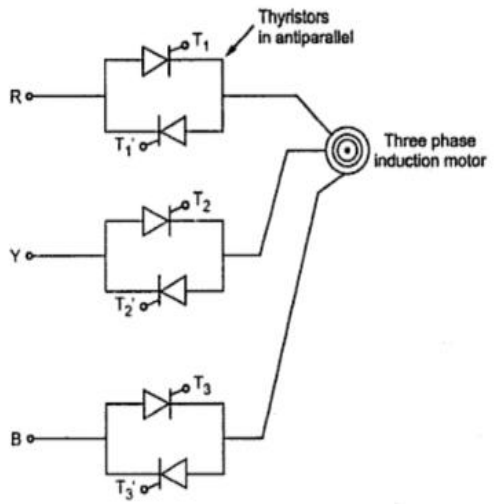


شكل رقم (١)



فكرة لعمل :

يتم التحكم فى عمليتى فصل وتوصيل المحركت عن طريق ثايروسترات (thyristors) بحيث يتم تسليط جهد المصدر بالتدريج على فتره زمنيه محدده حتى يصل إلى كامل قيمته مع نهاية فترة التشغيل . وبالمثل يمكن التحكم فة فترة توقف المحرك عن طريق تقليل جهد المصدر تدريجيا من كامل قيمته حتى الصفر خلال فتره زمنيه محدده . وبذلك يمكن عمل الإيقاف والتشغيل بدون حدوث تغيرات فجائيه وحاده فى أى من التيار والعزم مما يؤدى إلى تجنب صعوبات كثيره كهربيه وميكانيكيه



To control the voltage applied to the stator, the firing angle of the triac is controlled. For the scheme shown, the firing sequence is T_1, T_3', T_2, T_1', T_3 and T_2'. The interval between the successive firing is 60^o while the firing frequency is six times the input frequency. When T_3' is fired, T_1 and T_3' conduct for. Then T_2 is fired and $T_3'$and T_2 conduct for next 60^o. The cycle is repeated. Each triac conducts for 120^o, once fired. As long as thyristors is fired, it conducts and correspondingly voltage is variable to the stator. Thus by controlling the firing angle, the voltage applied to the motor can be controlled steplessly. The rotor induced e.m.f. E_2 depends on the stator voltage while torque depends on E_2^2. Thus by controlling stator voltage smoothly, the torque can be controlled smoothly while speed also gets controlled smoothly from zero to the synchronous speed. Due to reduced voltage applied the starting

current is small and need of the starter is eliminated. Hence the arrangement is called soft starter.

ماهى طرق التحكم فى سرعة المحرك الحثى ؟

Adding External Resistance in Rotor Circuit

هذه الطريقة تستخدم فقط مع المحركات ذات حلقات الانزلاق وذلك بتوصيل مقاومات على التوالي مع ملفات العضو الدوار ، انظر الشكل رقم (٣٢ -١). إن أي تغيير في مقاومة ملفات العضو الدوار سيؤدي إلى تغيير موضع العزم الأقصى طبقاً للمعادلة رقم (٣٦ -١) وبالتالي تتغير السرعة مع تغير الانزلاق طبقاً للمعادلة رقم (٧ -١).

هذه الطريقة تعطي تحكم محدود في السرعة و يجبذ أن لا يزيد عن ١٥٪ من السرعة التزامنية وذلك لأن زيادة هذه المقاومة يؤدي إلى زيادة المفاقيد النحاسية في العضو الدوار وبالتالي قلة كفاءة المحرك.

Controlling number of poles

يمكن تغيير عدد أقطاب العضو الثابت في المحرك الحثي ذي القفص السنجابي وذلك بإعادة توصيلها بطريقة مختلفة بحيث نحصل على نصف عدد الأقطاب أو الضعف ، بهذه الطريقة يصبح لدينا سرعتان تزامنيتان الواحدة نصف الأخرى . فإذا كانت الأقطاب الأساسية أربعة كما هو موضح في الشكل رقم (٣٦ -١) يمكن إعادة التوصيل بحيث تصبح ثمانية أقطاب كما هو موضح في الشكل رقم (٣٧ -١).

إذا كانت هذه الطريقة لا تعطي السرعة المطلوبة فإنه بالإمكان وضع طبقتان منفصلتان من الملفات في العضو الثابت كل طبقة ذات عدد من الأقطاب مختلف عن الآخر ، مثلاً يمكن أن تكون الطبقة الأولى ذات ثمانية أقطاب بينما الثانية تكون ذات ستة أقطاب، كما أنه بالإمكان دمج الطريقتين معاً لنحصل على محرك ذو أربع سرعات.

هذه الطريقة غير مناسبة للمحرك ذي العضو الدوار الملفوف لأن ذلك يستدعي إعادة توصيل ملفات العضو الدوار لكي تصبح مساوية لملفات العضو الثابت كلما أردنا تغيير السرعة وهذا غير مناسب. بينما العضو الدوار ذي القفص السنجابي يتلاءم تلقائياً مع أي عدد موجود من الأقطاب في العضو الثابت.

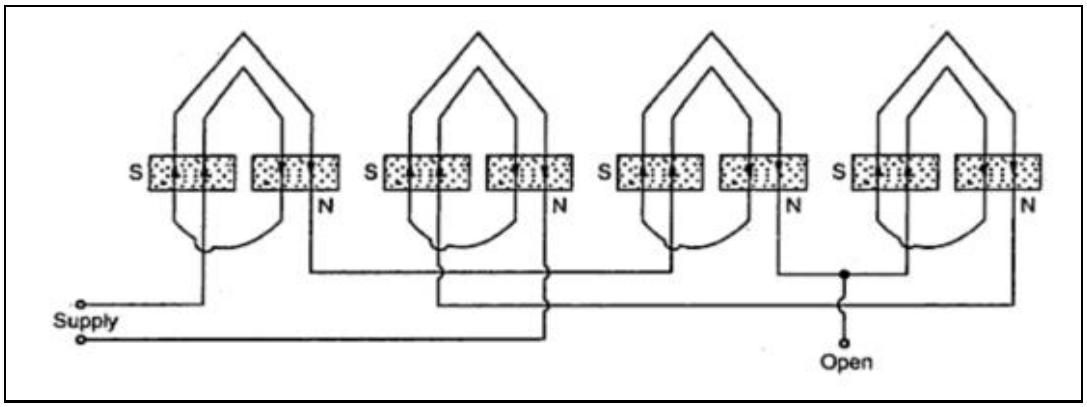
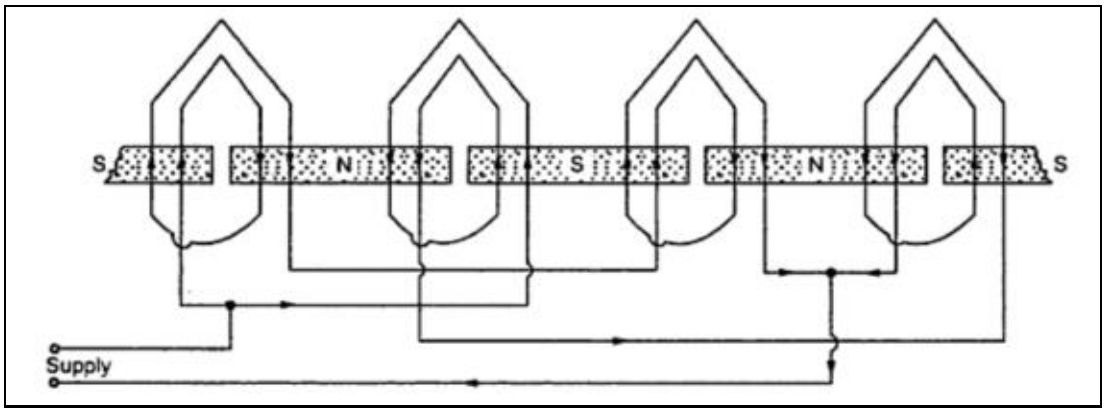


Fig.1 Pole winding



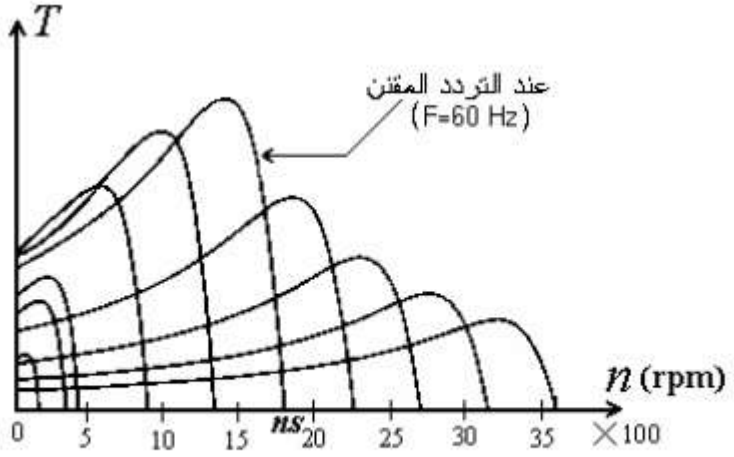
4 pole winding

٣-تغيير تردد المصدر (بإستخدام مغير التردد Frequency converter)

السرعة التزامنية للمحرك الحثي ثلاثي الأوجه يمكن التحكم بها عن طريق التحكم في تردد مصدر الجهد المغذي لملفات العضو الثابت. و هذا يتطلب وجود مصدر جهد ثلاثي الأوجه ذو تردد قابل للتغيير. هذا النوع من المصادر هي عبارة عن أجهزة تحكم إلكترونية ذات قدرات عالية تقوم بتحويل القدرة الداخلة ذات التردد الثابت إلى تيار مستمر ومن ثم تحويل هذا التيار المستمر إلى تيار متردد ثلاثي الأوجه عند التردد المطلوب.

كما أن الجهد الخارج يضبط بحيث يكون متناسب مع التردد المطلوب وذلك للحفاظ على قيمة ثابتة للفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية. مثل هذه الأجهزة تكون عادةً مكلفة ولا يلجأ إليها إلا في التطبيقات التي تحتاج تحكم دقيق في السرعة.

الشكل رقم (٣٨ -١) يوضح منحنيات (العزم/السرعة) لمحرك ذي أربعة أقطاب عند ترددات مختلفة، ويلاحظ أن العزم يزداد عند انخفاض التردد وذلك بسبب زيادة الجهد والعكس يحدث عند زيادة التردد وذلك للمحافظة على كمية ثابتة للفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية.



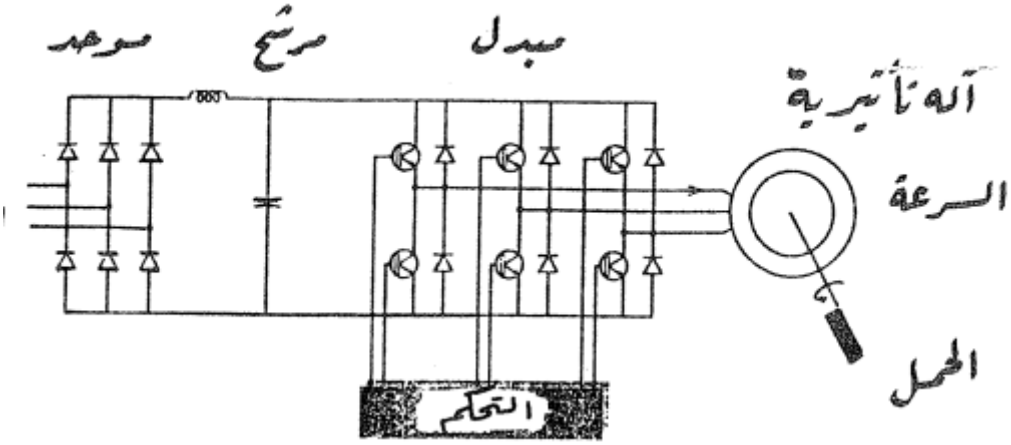
شكل رقم ٣٨ -١ : منحنيات (العزم/السرعة) لمحرك ذي أربعة أقطاب عند ترددات مختلفة

يتكون مغير التردد من :

1- **rectifier** للحصول على تيار مستمر

2- **Inverter** للحصول على جهد ذو تردد متغير.

ويتكون موحد التيار من دائرة قنطرة ثايرستور بعدد (٦) تقوم بتحويل الجهد المتردد ٣ فاز إلى جهد مستمر يتم تنعيمه بواسطة ملف ومكثف حتى يمكن الحصول على جهد مستمر شبه نقى. ويمكن تغير قيمه الجهد عن طريق التحكم في زاوية إشعال (firing angle) الثايرستور

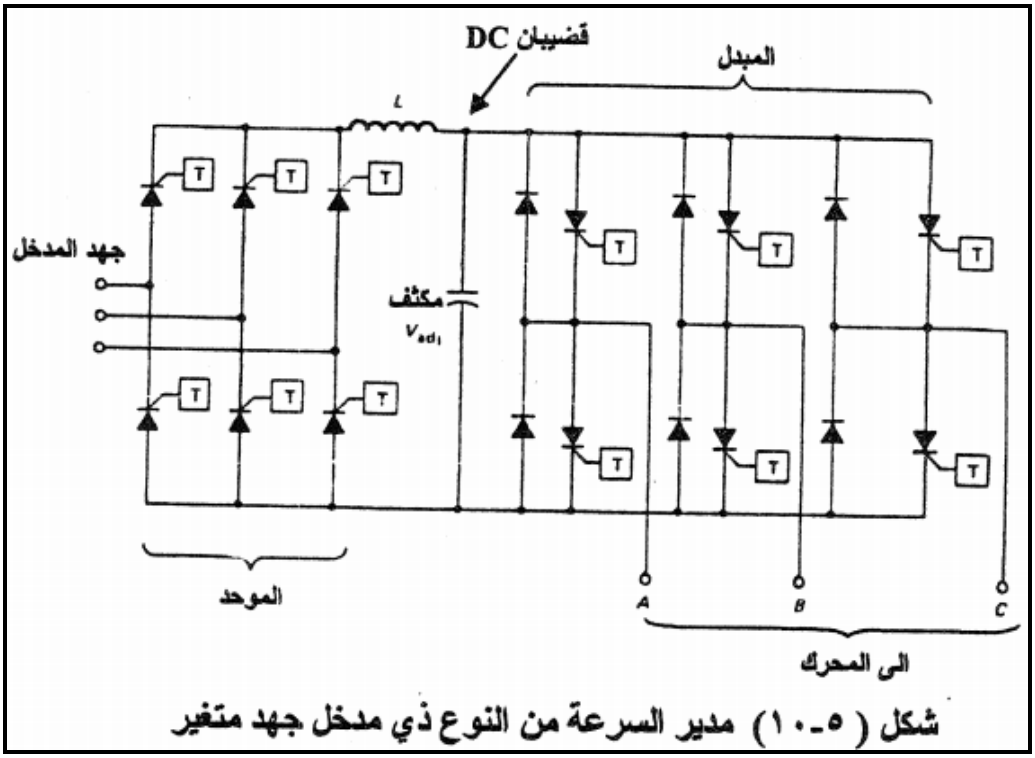


وينقسم المقوم inverter إلى ثلاثة أنواع :

أ - مدخل جهد متغير Variable - voltage input (VVI)

(والتى تعرف أيضاً بمبدل جهد المصدر voltage source inverter (VSI)
يوضح شكل (٥ – ١٠) مكونات هذا النوع. تغير قنطرة التحكم فى الطور (phase-controlled bridge) كمية مدخل الجهد المستمر (DC) للمبدل. نحصل على المخرج من المبدل فى حدود بين جهدى قضبان DC (الموجب والسالب). وتكون زاوية الاختلاف بين مخرج الأطوار الثلاثة ١٢٠° كهربائية، وعلى ذلك يحدث تأثير لمجال العضو الدوار عند تسليط الجهد على ملفات العضو الثابت. يمكن تغير اتجاه الدوران عن طريق إشعال (firing) ديودات ثايرستورات المبدل (inverter thyristor diodes) بتتابع مختلف. ويتم تغير تردد العضو الثابت عن طريق إشعال وتوحيد (commutating) كل ثايرستور لفترات زمنية مختلفة.

مديرات السرعة من النوع VVI تعتبر من أكثر المديرات شيوعاً فى هذه الأيام والتى تستخدم فى تطبيقات حتى ٤٠٠ حصان للمضخات والمراوح والمطاحن وماكينات المنشار (saws).

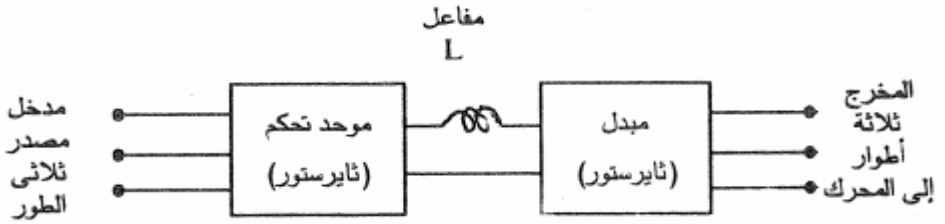


شكل (٥-١٠) مدير السرعة من النوع ذي مدخل جهد متغير

٢ - مبدل تيار المصدر Current - source inverter (CSI):

يوضح شكل (٥ – ١١) تمثيل مكونات هذا المبدل. وهى عبارة عن قضبان تيار مستمر DC متغير ويتحكم فيه من خلال منظم ثايرستور، ومفاعل مرشح DC كبير، والمبدل. فى هذا النوع ينظم تيار DC للمبدل من خلال الموحد والمرشح.

وعادة يكشف عن التيار باستخدام حساس (sensor) يوصل بعد المفاعل. ويستخدم هذا النظام فى تطبيقات المحركات أكبر من ١٠ حصان.

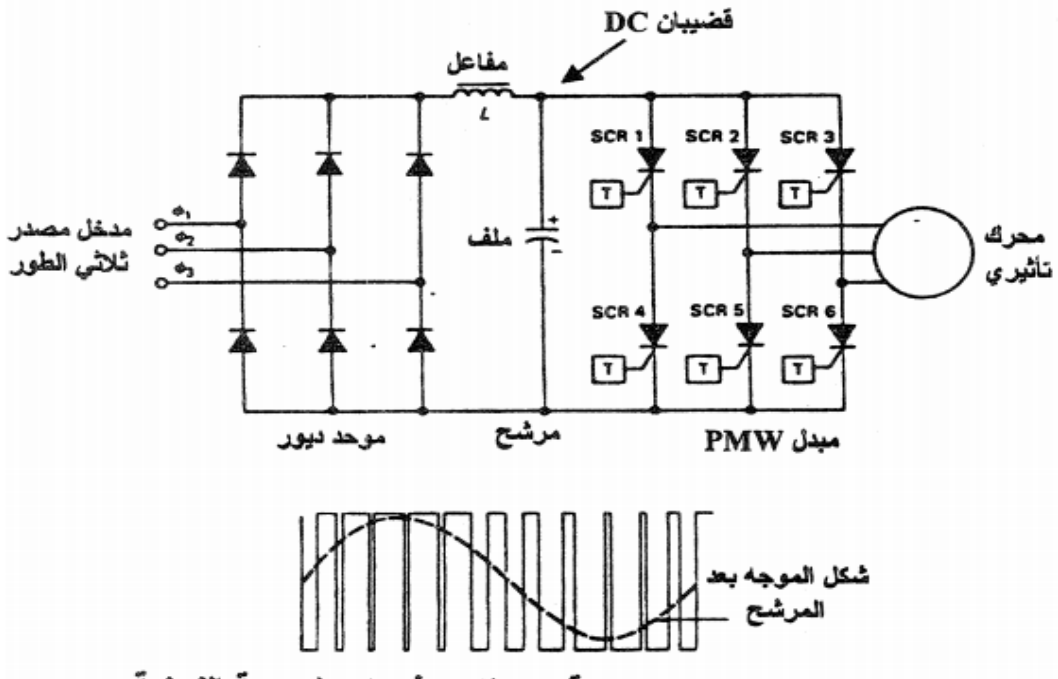


شكل (٥ - ١١) مبدل تيار المصدر

٣ - نظام تعديل سعة النبضة Pulse-width modulating (PWM):

يوضح شكل (٥ – ١٢) تمثيل لمكونات هذا النظام، وفيه تستخدم الديودات وليس الثايرستورات كما فى الحالات السابقة. فهو لايحتاج لاستخدام الثايرستورات لأن هذا النظام يعتمد على أن جهد مدخل المبدل هو جهد ثابت (DC).

تتشكل موجة المخرج النبضية (pulsed output) عن طريق تغيير زمن البوابة (gating) والتوحيد (commutation) . يمتاز هذا النظام بأنه أقل أنظمة مديرات السرعة المولدة للتوافقيات. ويستخدم هذا النظام للتحكم فى سرعة المحركات DC و AC . ويستخدم فى تطبيقات الناقلات (conveyors) والمراوح والمضخات.



شكل (٥-١٢) مدير سرعة من النوع ذي تعديل سعة النبضة

ما هى طرق التحكم فى سرعة المحركات الحثيه بإستخدام إلكترونات القوى ؟

يمكن تقسيم أنواع التحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه بشكل عام إلى نوعين رئيسيين:

- **تحكم عن طريق دائرة العضو الثابت:** ويتم ذلك بطرق مختلفة وتتميز جميعها بأنها تصلح للمحركات الحثية سواء كانت محركات ذات قفص سنجابي أو محركات ذات عضو دائر ملفوف
- **تحكم طريق دائرة العضو الدائر:** وتصلح للمحركات ذات العضو الدائر الملفوف فقط

وسوف نتناول طرق التحكم المستخدمة في كل نوع من هذه الأنواع فيما يلي.

أولا التحكم في دائرة العضو الثابت

بالرجوع إلى المعادلة (١□٥) نستطيع أن نستنتج أن العزم المتولد والسرعة يمكن التحكم فيهما بعدة طرق تنفذ جميعها من خلال دائرة العضو الثابت مثل:

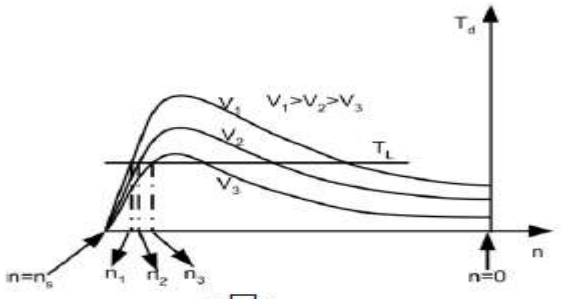
التحكم في جهد المصدر　　التحكم في تردد المصدر

التحكم في الجهد والتردد معا

التحكم في الجهد المسلط على العضو الثابت (Stator Voltage Control)

بالرجوع إلى المعادلة (١□٥) نجد أن العزم المتولد يتناسب مع مربع الجهد وبالتالي فعند تقليل الجهد المسلط على العضو الثابت فإن العزم المتولد سوف يقل وبالتالي تقل السرعة ويوضح شكل (١□٥) العلاقة بين العزم والسرعة عند قيم مختلفة لجهد العضو الثابت.

فنجد أن سرعة المحرك (n_1) والتي تنتج عند تغذية المحرك بالجهد (V_1) تكون أكبر من السرعة (n_2) والتي تنتج عند تغذية المحرك بالجهد (V_2)، والسرعة (n_2) تكون أكبر من السرعة (n_3) والتي تنتج عند تغذية المحرك بالجهد (V_3) وهكذا، وتتميز هذه الطريقة بالبساطة وسهولة التنفيذ ولكنها تصلح للحصول على سرعات أقل من السرعة المقننة فقط، كما أن مدى التحكم في السرعة يكون صغير وتستخدم هذه الطريقة بكثرة في المراوح والمضخات والأوناش.



شكل (١□٥)

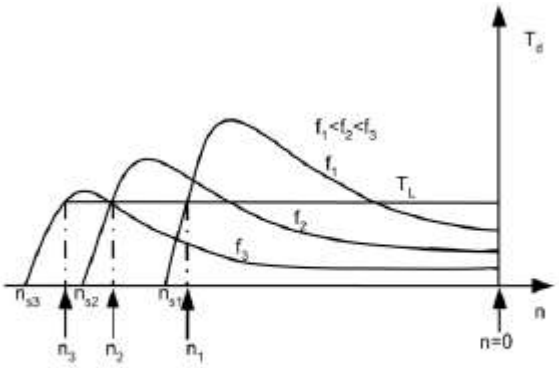
العلاقة بين العزم والسرعة للمحرك الحثي عند قيم مختلفة لجهد العضو الثابت

التحكم في التردد (Frequency Control)

يمكن التحكم في العزم المتولد للمحرك الحثي وسرعته بالتحكم في تردد المصدر، وذلك لأن تغيير التردد يؤدي إلى تغيير المجال المغناطيسي الناتج طبقا للمعادلة (٢□٥) والتي تربط بين المجال المغناطيسي (Φ) الناتج من مرور التيار في ملف والجهد المسلط عليه (V) وتردد المصدر (f)

$$\Phi \propto \frac{V}{f} \qquad (٢□٥)$$

ومن المعادلة (٢ـ٥) يمكن ملاحظة أن المجال المغناطيسي يتناسب عكسيا مع التردد أي أنه بزيادة التردد يقل المجال المغناطيسي المتولد وبالتالي يقل العزم وتزيد سرعة المحرك، كما يمكن ملاحظة أنه بتقليل التردد يزداد المجال المغناطيسي ويزيد العزم المتولد وتقل السرعة، كما هو واضح من شكل (٢ـ٥) والذي يوضح العلاقة بين العزم المتولد وسرعة المحرك عند ترددات مختلفة. فنجد أن سرعة المحرك (n_1) والتي تنتج عند تغذية المحرك بتردد (f_1) تكون أقل من السرعة (n_2) والتي تنتج عند تغذية المحرك بتردد (f_2)، والسرعة (n_2) تكون أقل من السرعة (n_3) والتي تنتج عند تغذية المحرك بتردد (f_3) وهكذا. وتصلح هذه الطريقة للحصول على سرعات عالية (أكبر من السرعة المقننة) مع مراعاة أن لايقل العزم المتولد عن عزم الحمل المطلوب، ولاتصلح هذه الطريقة للحصول على سرعات صغيرة (أقل من السرعة المقننة) لأن ذلك يحتاج إلى تردد صغير قد يؤدي إلى تشبع المجال المغناطيسي المتولد. وتسمى هذه الطريقة طريقة إضعاف المجال (Field-weakening mode) وذلك لضعف المجال المغناطيسي نتيجة لزيادة التردد

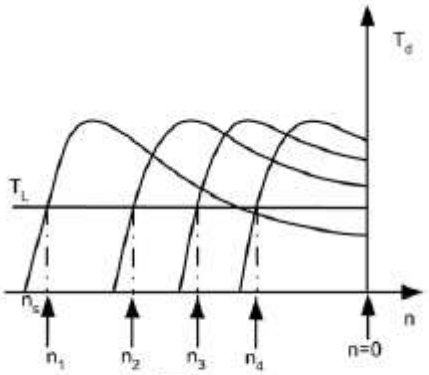


شكل (٢ـ٥)

العلاقة بين العزم والسرعة للمحرك الحثي عند قيم مختلفة للتردد

التحكم في الجهد والتردد معا (Voltage and Frequency Control)

في هذه الطريقة يتم السيطرة على أداء المحرك بالتحكم في كل من الجهد والتردد معا بحيث تكون النسبة بينهما ثابتة وذلك بهدف الحفاظ على المجال المغناطيسي عند قيمة ثابتة ولذلك تكون قيمة أقصى عزم أيضا ثابتة بينما يمكن الحصول على سرعات مختلفة كما في شكل (٢ـ٥)



شكل (٢ـ٥)

العلاقة بين العزم والسرعة للمحرك الحثي عند التحكم في الجهد والتردد معا

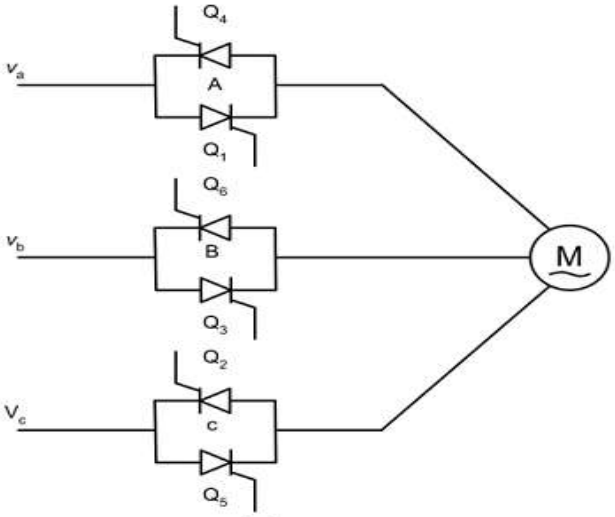
وتتميز هذه الطريقة بمدى كبير للتحكم في السرعة (من صفر إلى السرعة المقننة)، و إذا أريد زيادة السرعة عن ذلك فإننا نلجأ للتحكم في التردد فقط، كما تتميز هذه الطريقة بإمكانية استخدامها لبدء المحرك بعزم بدء عال مما يقلل من زمن التعجيل اللازم للوصول لنقطة التشغيل. ونتيجة لثبات المجال المغناطيسي في هذه الطريقة فتسمى بطريقة التحكم بثبات المجال (Constant Flux Operation).

وتتم عملية التحكم في جهد العضو الثابت بطرق مختلفة مثل حاكمات الجهد المتردد أو العواكس وسوف نتناولها في الأجزاء التالية.

التحكم في المحركات الحثية باستخدام حاكمات الجهد المتناوب

Control of Induction Motor by AC Voltage Controller

تستخدم حاكمات الجهد المتناوب للتحكم في جهد العضو الثابت، وذلك بهدف السيطرة على أداء المحركات الحثية ثلاثية الأوجه، وفي هذه الحالة يكون الجهد المغذي للمحرك متغير القيمة (محكوماً) بينما يكون التردد هو نفسه تردد المصدر ثلاثي الأوجه، وتتم عملية التحكم في القيمة الفعالة للجهد عن طريق التحكم في زاوية الإشعال للثايرستورات المكونة لحاكم الجهد المتردد وتستخدم حاكمات الجهد المتردد للتحكم في تطبيقات متعددة مثل المراوح والمضخات والأوناش. ومن عيوب حاكمات الجهد المتناوب توليد توافقيات غير مرغوب فيها كما أن معامل القدرة لها منخفض



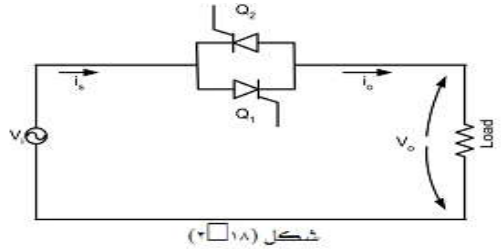
شكل (٤-٥)

التحكم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه باستخدام حاكم الجهد المتناوب ثلاثي الأوجه

ويوضح شكل (٤-٥) حاكم جهد متناوب ثلاثي الأوجه مكون من ستة ثايرستورات يستخدم اثنان منها لكل وجه ويستخدم هذا الحاكم للتحكم في محرك حثي ثلاثي الأوجه. وفي حالة المحركات الصغيرة يمكن أن يستبدل كل زوج من الثايرستورات المستخدمة بترياك يستخدم في الوجه الواحد.

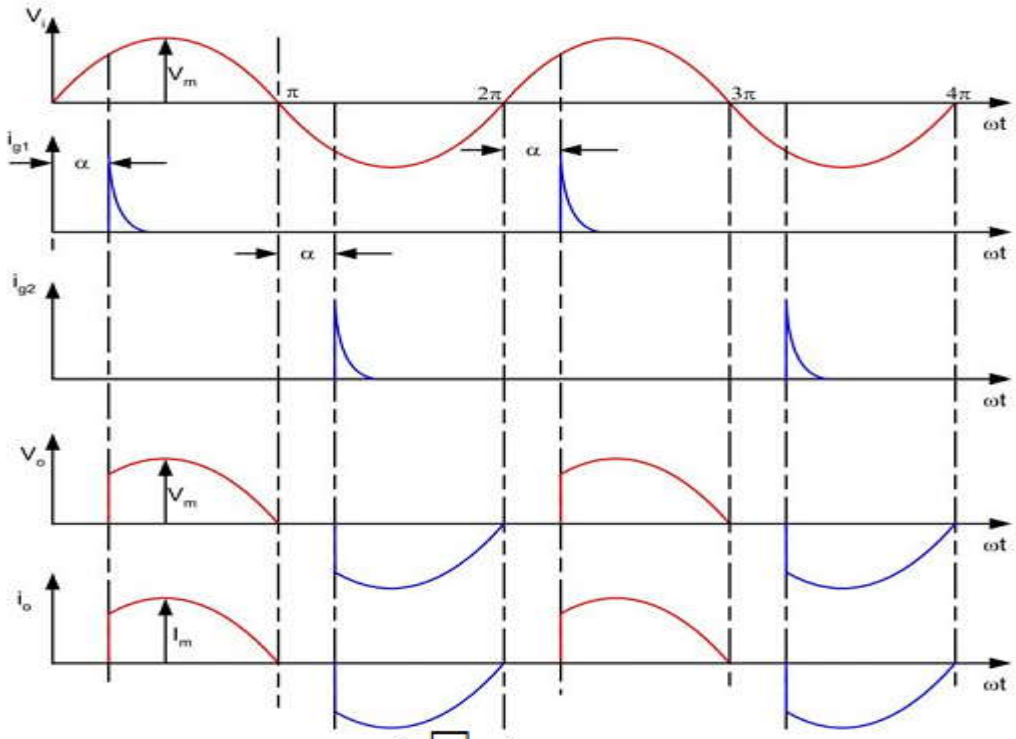
والحاكم الموضح في شكل (٤-٥) يستخدم للدوير الأمامي للمحرك (Forward Motoring) والفرملة العكسية (Reverse Plugging) أي في الربع الأول والرابع

ويمكن توضيح فكرة عمل single phase voltage controller كالآتى :



شكل (١٨-٢)

دائرة حاكم الجهد المتردد أحادي الوجه مع حمل مقاومة



شكل (٢□٢٠)

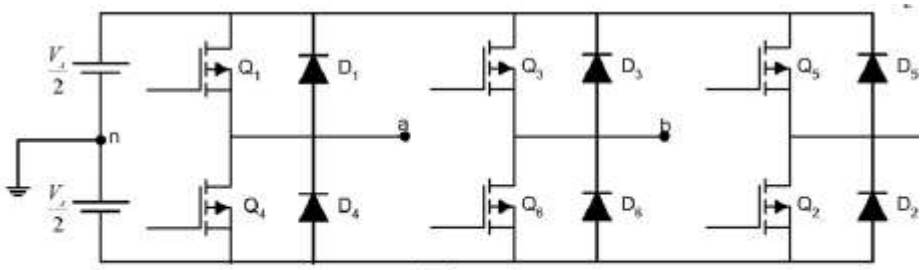
أشكال موجات الجهد والتيار للحاكم أحادي الوجه مع حمل (مقاومة)

التحكم في زاوية الإشعال

التحكم في المحركات الحثية باستخدام العواكس

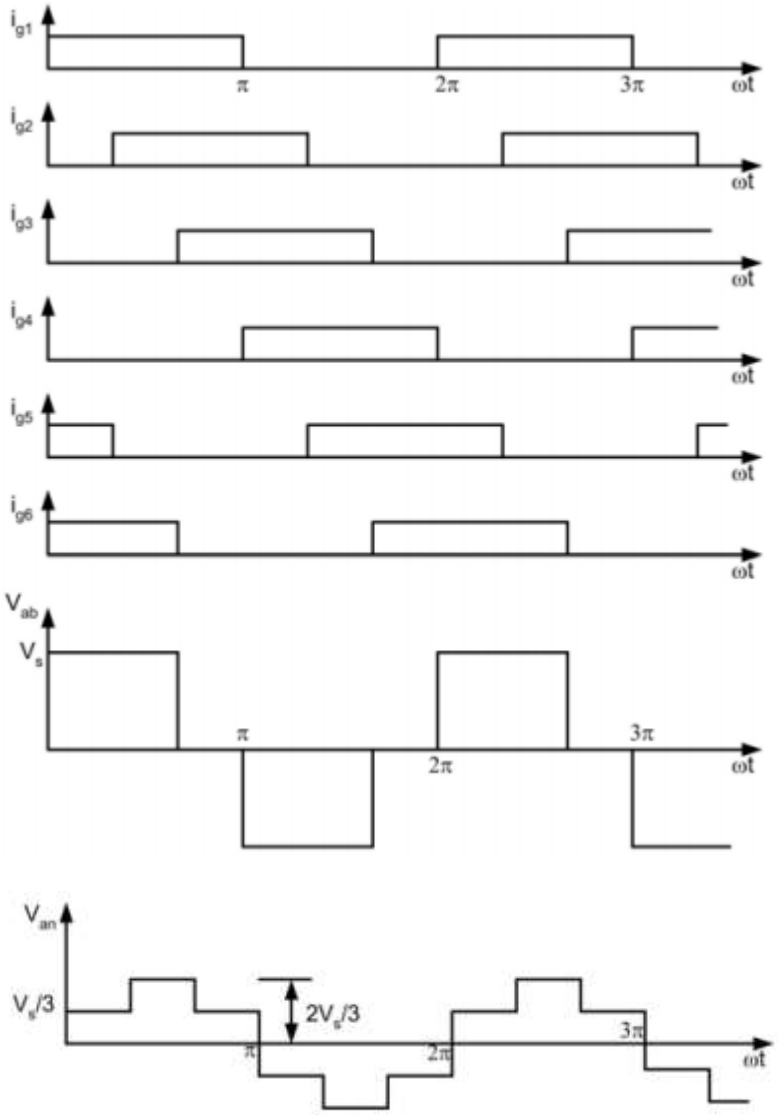
Control of Induction Motor by Inverters

تستخدم العواكس في تنفيذ عمليات التحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه وذلك بالتحكم في الجهد المسلط على العضو الثابت أو التحكم في التردد أو التحكم في الجهد والتردد معا، ويتم ذلك باستخدام عدة أنواع من العواكس مثل العاكس ثلاثي الأوجه ذي مصدر الجهد الثابت (Three-phase Voltage Source Inverter) والعاكس ثلاثي الأوجه ذي النبضة متغيرة العرض (PWM Inverter)، ويبين شكل (٦□٥) عاكساً ثلاثي الأوجه ذا مصدر جهد ويتكون من ستة موسفت وستة دايودات حيث يتم إشعال كل موسفت لمدة ١٨٠° وفصله لمدة ١٨٠° أخرى ويتم ذلك بالتتابع كما في شكل (٧□٥) ويمكن تشغيل هذا العاكس كعاكس ست خطوات (Six Step Inverter) أو عاكس ذي نبضة متغيرة العرض (PWM Inverter).



شكل (٦□٥)

عاكس ثلاثي الأوجه



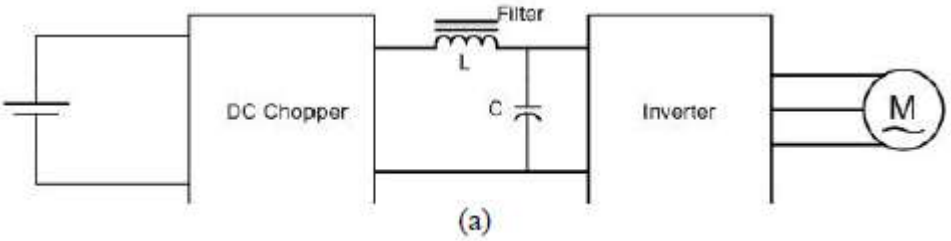
شكل (٧-٥)

أشكال موجات التحكم والجهد الناتج من العاكس ثلاثي الأوجه ذي مصدر الجهد

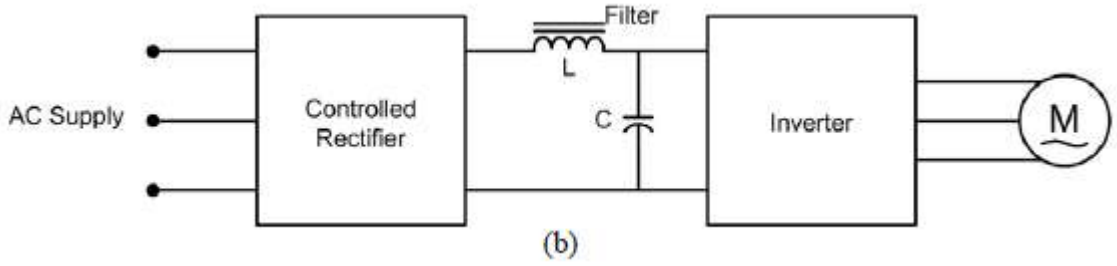
يتم التحكم في التردد بتغيير مدة التشغيل والفصل لعناصر إلكترونيات القدرة المستخدمة في العاكس، بينما يمكن التحكم في الجهد بإحدى الطرق التالية

١. **التحكم في قيمة الجهد المستمر الداخل للعاكس:** ويتم ذلك باستخدام مصدر تيار مستمر ومقطع كما في شكل (٨-a-٥)، أو باستخدام مصدر للتيار المتردد وقنطرة موحدات محكومة كما في شكل (٨-b-٥)، كما يمكن أن يتم ذلك باستخدام مصدر للتيار المتردد وقنطرة موحدات غير محكومة ومقطع تيار مستمر كما في شكل (٨-c-٥).

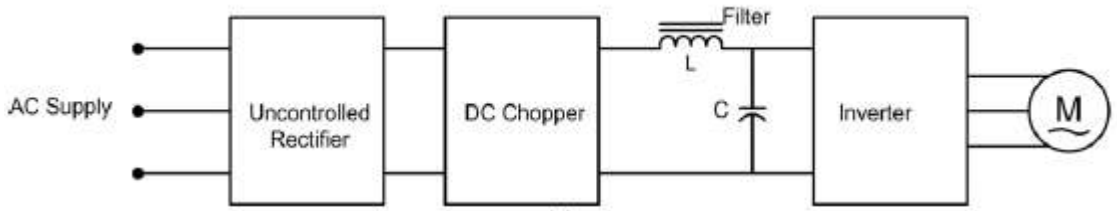
٢. **التحكم في قيمة الجهد الناتج من العاكس ذي النبضة متغيرة العرض:** وفي هذه الحالة يمكن التحكم في كل من الجهد والتردد معا بتغيير زمن التشغيل والفصل كما في شكل (٩-٥).



(a)



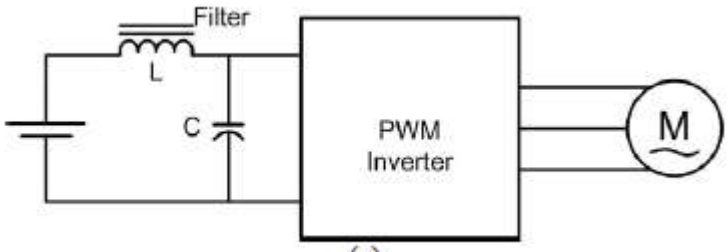
(b)



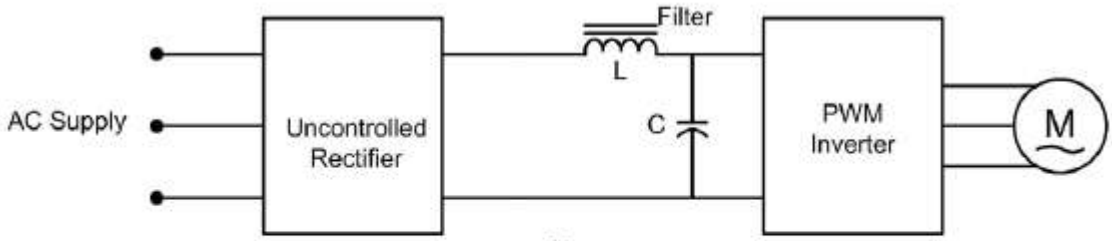
(c)

شكل (٨□٥)

التحكم في جهد العاكس ذي الست خطوات بطرق مختلفة



(a)



(b)

شكل (٩□٥)

التحكم في الجهد والتردد باستخدام العاكس ذي النبضة متغيرة العرض

ثانيا التحكم في دائرة العضو الدائر

في هذه الحالة يتم التحكم في المحركات الحثية عن طريق دائرة العضو الدائر لذا تصلح هذه الطريقة فقط للتحكم في المحركات ذات العضو الملفوف. والمحركات ذات العضو الملفوف لها بعض العيوب مقارنة بالمحركات ذات القفص السنجابي مثل ارتفاع الثمن وثقل الوزن وكبر الحجم وحاجتها للصيانة الدورية ولكن التحكم فيها عن طريق دائرة العضو الدائر يكون أرخص لذا تستخدم في بعض التطبيقات الصناعية المحدودة.

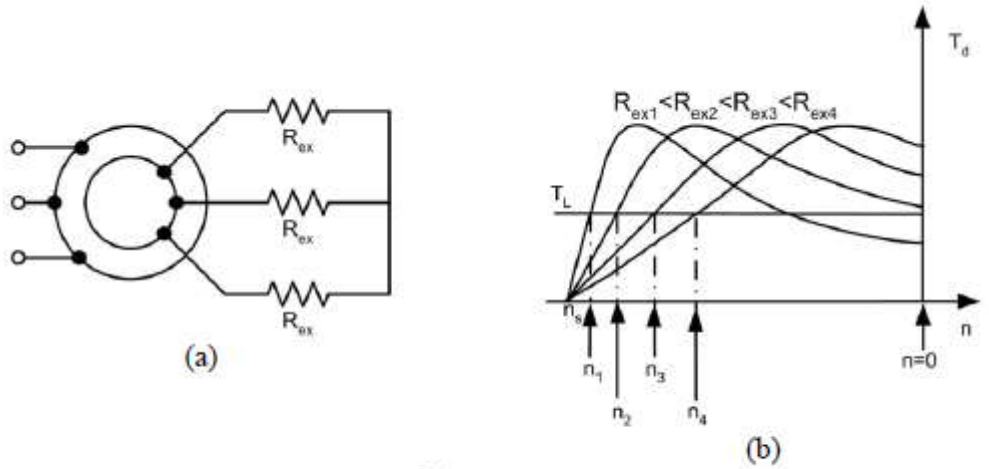
في المحركات الحثية يتحول جزء من القدرة في الثغرة الهوائية إلى قدرة ميكانيكية والجزء المتبقي يسمى قدرة الانزلاق (Slip Power) وتعتمد طرق التحكم عن طريق العضو الدائر على التحكم في هذه القدرة وبالتالي التحكم في القدرة الميكانيكية، ومن ثم يتم التحكم في السرعة ويمكن تلخيص طرق التحكم عن طريق دائرة العضو الدائر كما يلي:

- التحكم باستخدام مقاومة (Static Rotor Resistance Control)
- التحكم باستعادة طاقة الانزلاق (Slip Power Recovery Control)

التحكم باستخدام مقاومة (Static Rotor Resistance Control)

عند توصيل ثلاث مقاومات (R_{ex}) في دائرة العضو الدائر من خلال حلقات الانزلاق الموصلة على أطراف العضو الدائر كما في شكل (a-١٠□٥) فإن العزم المتولد من المحرك يمكن التحكم فيه بتغيير قيمة المقاومة الخارجية الموصلة، ويمكن حساب قيمة العزم المتولد في هذه الحالة بعد إضافة المقاومة الخارجية لمقاومة العضو الدائر في المعادلة (١□٥). شكل (b-١٠□٥) يوضح العلاقة بين السرعة والعزم عند قيم

مختلفة للمقاومة المضافة (R_{ex}) وبالرغم من المفاقيد العالية التي تنتج عن استخدام هذه الطريقة إلا أنها تتمتع ببعض المميزات مثل البساطة، ورخص الثمن، ومعامل القدرة العالي، ومدى التحكم في السرعة الكبير، وكذلك تقليل تيار البدء، لذا تستخدم هذه الطريقة في بعض التطبيقات مثل الحفارات والأوناش.



شكل (١٠□٥)

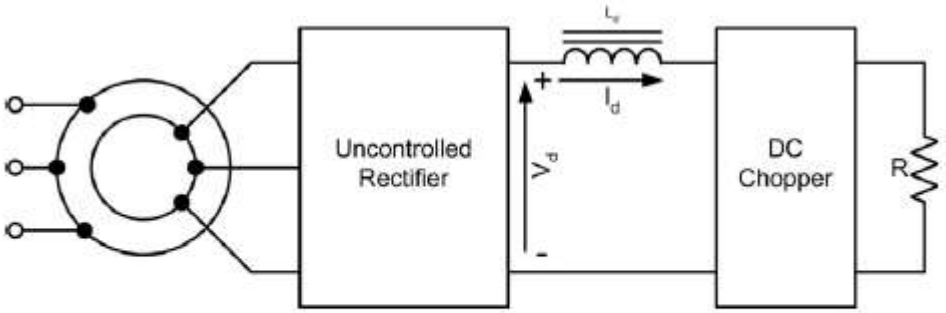
التحكم في المحرك ذي العضو الملفوف باستخدام مقاومة

ويمكن استبدال المقاومات الثلاث (R_{ex}) بمقاومة واحدة (R) ومقطع بالإضافة إلى قنطرة موحدات كما في شكل (١١□٥) وبتغيير نسبة تشغيل المقطع (k) يتم التحكم في القيمة الفعالة للمقاومة (R_e) والتي ستتغير قيمتها من (R) إذا كانت نسبة تشغيل المقطع صفر إلى صفر إذا كانت نسبة تشغيل المقطع واحد ويمكن إيجاد القيمة الفعالة للمقاومة عند أي نسبة تشغيل من المعادلة (٢□٥).

$Re=R(1-k)$	(٥-٢)

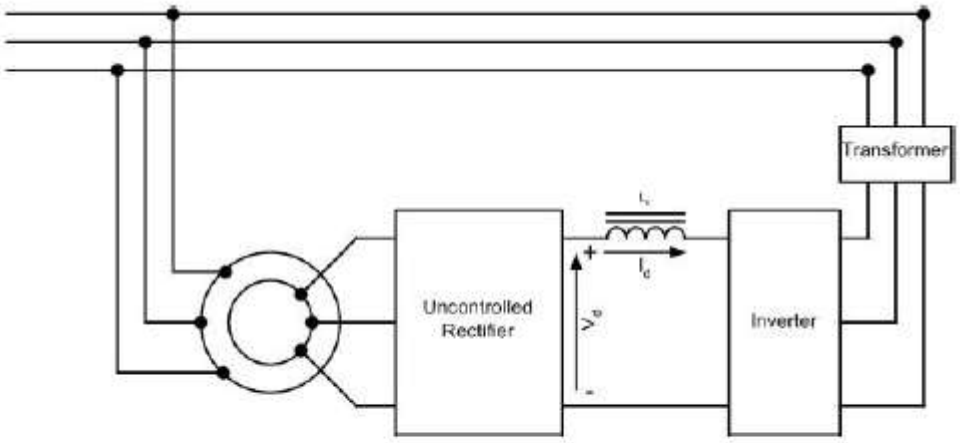
التحكم باستعادة طاقة الانزلاق (Slip Power Recovery Control)

يمكن إعادة قدرة الانزلاق إلى المصدر باستبدال مقطع التيار المستمر والمقاومة في شكل (١١-٥) بمغير قدرة ثلاثي الأوجه كما في شكل (١٢-٥). يتم تشغيل مغير القدرة في هذه الحالة كعاكس حيث تكون زاوية الإشعال أكبر من ٩٠° وذلك لتحويل الجهد المستمر (V_d) إلى جهد متردد ومن ثم توصيله بمصدر التيار المتردد من خلال محول، وبالتحكم في قيمة زاوية إشعال الثايرستور في دائرة العاكس يتم التحكم في قيمة قدرة الانزلاق المعادة إلى المصدر وبالتالي في سرعة المحرك وتعرف هذه الطريقة بطريقة كرامر الإستاتيكية.



شكل (١١-٥)

التحكم في قدرة الانزلاق باستخدام مقطع



شكل (١٢-٥)

التحكم في المحرك الحثي باستعادة قدرة الانزلاق (طريقة كرامر الاستاتيكية)