# التحكم الإلكتروني في الآلات

## التحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه





قلم الجزائر | WWW.DZPEN.COM

**الجدارة:** اختيار الطريقة المناسبة للتحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه وتحديد الدائرة المناسبة لذلك.

**الأهداف:** عند الانتهاء من دراسة هذه الوحدة يتمكن المتدرب بإذن الله من:

١. معرفة كيفية تنفيذ الطرق المختلفة للتحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه باستخدام دوائر حاكمات الجهد المتناوب.
٢. معرفة كيفية تنفيذ الطرق المختلفة للتحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه باستخدام العواكس.
٣. معرفة كيفية التحكم في المحركات ذات العضو الملفوف باستعادة طاقة الانزلاق.

**الوقت المتوقع:** 9 ساعات

**متطلبات الجدارة:** اجتياز مقرر إلكترونيات القدرة
اجتياز مقرر آلات التيار المتردد والمحولات


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

# الوحدة الخامسة : التحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه

بالرغم من بساطة طرق التحكم في سرعة محركات التيار المستمر التي سبق تناولها في الوحدتين الثالثة والرابعة إلا أن محركات التيار المستمر نفسها لها بعض العيوب مثل كبر الحجم وثقل الوزن وحاجتها الدائمة إلى الصيانة الدورية بالإضافة إلى ارتفاع ثمنها، مما دفع الباحثين إلى البحث في كيفية استخدام محركات التيار المتردد كمحركات متغيرة السرعة في التطبيقات الصناعية المختلفة، وذلك لما تتمتع به من مميزات عديدة مثل خفة الوزن وصغر الحجم ورخص الثمن بالإضافة إلى عدم حاجتها للصيانة الدورية تقريباً، ولكن على الجانب الآخر فإن التحكم فيها أصعب من التحكم في آلات التيار المستمر حيث تحتاج إلى التحكم في أكثر من عامل (الجهد والتردد)، ولكن التقدم في صناعة عناصر إلكترونيات القدرة ودوائر التحكم الرقمية ساهم في الفترة الأخيرة بجهد كبير في تسهيل عملية التحكم في تلك المحركات حتى أصبحت بديلاً منافساً لمحركات التيار المستمر في التطبيقات الصناعية التي تحتاج إلى محركات متغيرة السرعة خاصة في الأماكن القابلة للانفجار مثل المناجم والصناعات الكيميائية والتركيبات تحت المياه كما تصلح أيضاً للمضخات والمراوح ونافخات الهواء والكمبرسورات والسيور بالإضافة إلى القطارات الكهربائية. وتنقسم آلات التيار المتردد إلى نوعين رئيسين هما المحركات الحثية ثلاثية الأوجه والمحركات المتزامنة، وسوف نتناول في هذه الوحدة طرق التحكم في المحركات الحثية، بينما سنتناول في الوحدة السادسة كيفية التحكم في المحركات التزامنية.

يتم التحكم في سرعة المحركات الحثية بالتحكم في العزم المتولد الذي يعتمد على التفاعل (التداخل) بين مجالين مغناطيسيين يدوران بسرعة التزامن أحدهما ناتج من تغذية ملفات العضو الثابت من مصدر للتيار المتردد ثلاثي الأوجه بينما ينتج المجال الثاني من التيار المار في العضو الدائر بالحث، وتعتمد قيمة العزم المتولد كما في المعادلة (5-1) على قيمة الجهد المسلط على أطراف العضو الثابت وعلى قيمة تردد المصدر .ويمكن مراجعة كيفية عمل المحركات الحثية ثلاثية الأوجه بالرجوع إلى الوحدة التدريبية الأولى

$$T_d = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{3I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{\omega_s} = \frac{3V_1^2 \cdot R_2'}{s\omega_s\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2\left(X_1 + X_2'\right)^2} \qquad (5\text{-}1)$$

حيث:

$I_2'$ تيار العضو الدائر منسوباً للعضو الثابت (A)

$R_1$ مقاومة ملفات العضو الثابت (Ω)

$R_2'$ مقاومة ملفات العضو الدائر منسوبة للعضو الثابت (Ω)

$X_1$ معاوقة ملفات العضو الثابت (Ω)

$X_2'$ معاوقة ملفات العضو الدائر منسوبة للعضو الثابت (Ω)

$\omega$ سرعة المحرك (rad./sec)

$\omega_s$ سرعة التزامن (rad./sec)

$s$ الانزلاق

$V_1$ الجهد المسلط على العضو الثابت

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

- **تحكم عن طريق دائرة العضو الثابت:** ويتم ذلك بطرق مختلفة وتتميز جميعها بأنها تصلح للمحركات الحثية سواء أكانت محركات ذات قفص سنجابي أم 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 (1-5) نستطيع أن نستنتج أن العزم المتولد والسرعة يمكن التحكم فيهما بعدة طرق تنفذ جميعها من خلال دائرة العضو الثابت مثل:

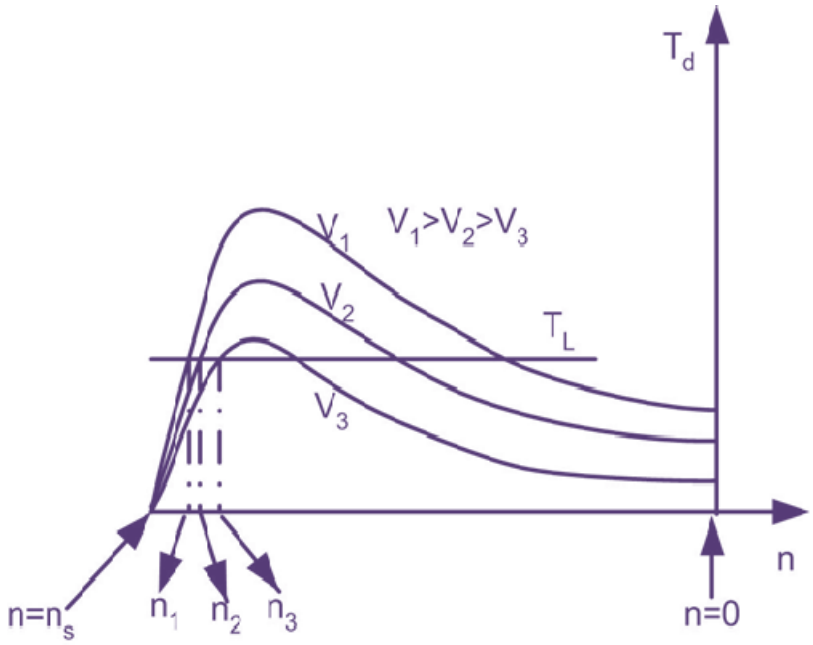
- التحكم في جهد المصدر
- التحكم في تردد المصدر
- التحكم في الجهد والتردد معاً

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

بالرجوع إلى المعادلة (1-5) 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 الشكل (1-5) العلاقة بين العزم والسرعة عند القيم المختلفة لجهد العضو الثابت.


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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.




الشكل (1-5)

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

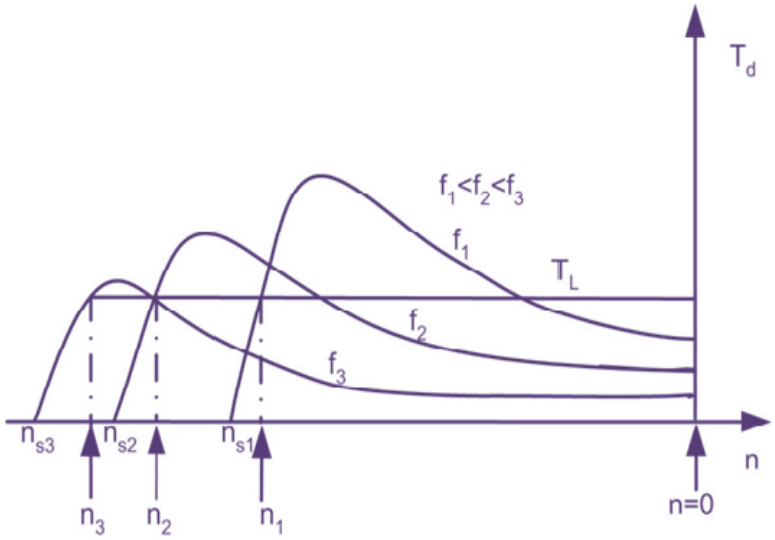
### التحكم في التردد (Frequency Control)

يمكن التحكم في العزم المتولد للمحرك الحثي وسرعته بالتحكم في تردد المصدر، وذلك لأن تغيير التردد يؤدي إلى تغيير المجال المغناطيسي الناتج طبقاً للمعادلة (2-5) والتي تربط بين المجال المغناطيسي ($\Phi$)الناتج من مرور التيار في ملف والجهد المسلط عليه ($V$) وتردد المصدر ($f$)

$$\Phi \propto \frac{V}{f} \qquad (5\text{-}2)$$


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

ومن المعادلة (2-5) يمكن ملاحظة أن المجال المغناطيسي يتناسب عكسياً 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 الشكل (2-5) 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



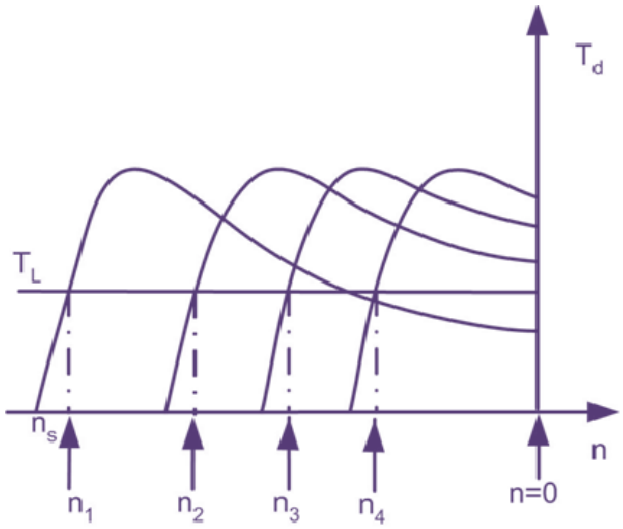

الشكل (2-5)

العلاقة بين العزم والسرعة للمحرك الحثي عند القيم المختلفة للتردد

### التحكم في الجهد والتردد معاً (Voltage and Frequency Control)

في هذه الطريقة يتم السيطرة على أداء المحرك بالتحكم في كل من الجهد والتردد معاً بحيث تكون النسبة بينهما ثابتة وذلك بهدف الحفاظ على المجال المغناطيسي عند قيمة ثابتة ولذلك تكون قيمة أقصى عزم أيضاً ثابتة بينما يمكن الحصول على سرعات مختلفة كما في الشكل (3-5)


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر




الشكل (3-5)

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

وتتميز هذه الطريقة بمدى كبير للتحكم في السرعة (من صفر إلى السرعة المقننة)، وإذا 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).

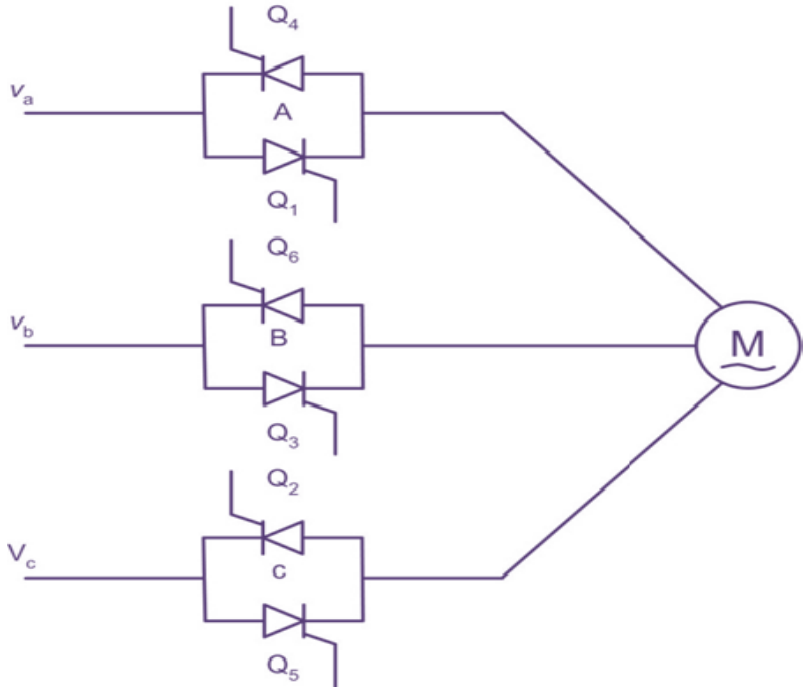
وتتم عملية التحكم في جهد العضو الثابت بطرق مختلفة مثل حاكمات الجهد المتردد أو العواكس وسوف نتناولها في الأجزاء التالية.

## 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


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر




الشكل (4-5)

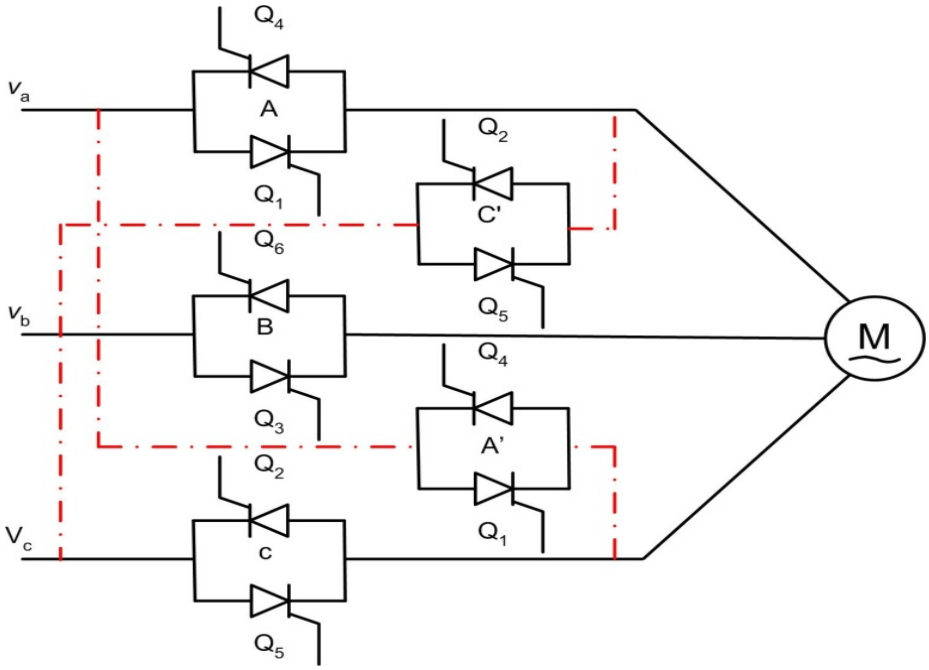
التحكم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه باستخدام حاكم الجهد المتناوب ثلاثي الأوجه

ويوضح الشكل (4-5) حاكم جهد متناوب ثلاثي الأوجه مكوناً 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 الشكل (4-5) يستخدم للتدوير الأمامي للمحرك (Forward Motoring) والفرملة العكسية (Reverse Plugging) أي في الربع الأول والربع الرابع

ويمكن استخدام حاكم الجهد المتناوب للسيطرة على المحرك في أربع حالات تدوير أي في الربع الأول والربع الثاني والربع الثالث والربع الرابع، ويوضح الشكل (5-5) حاكم الجهد المتناوب الذي يمكن استخدامه لهذه الحالات المختلفة. عند تشغيل أزواج الثايرستور (A, B, C) فإن المحرك يمكن أن يعمل في الربع الأول والربع الرابع، بينما إذا تم تشغيل أزواج الثايرستور (A', B, C') فإن المحرك يمكن أن يعمل في الربع الثاني (الفرملة الأمامية) والربع الثالث (التدوير العكسي).


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر




الشكل (5-5)

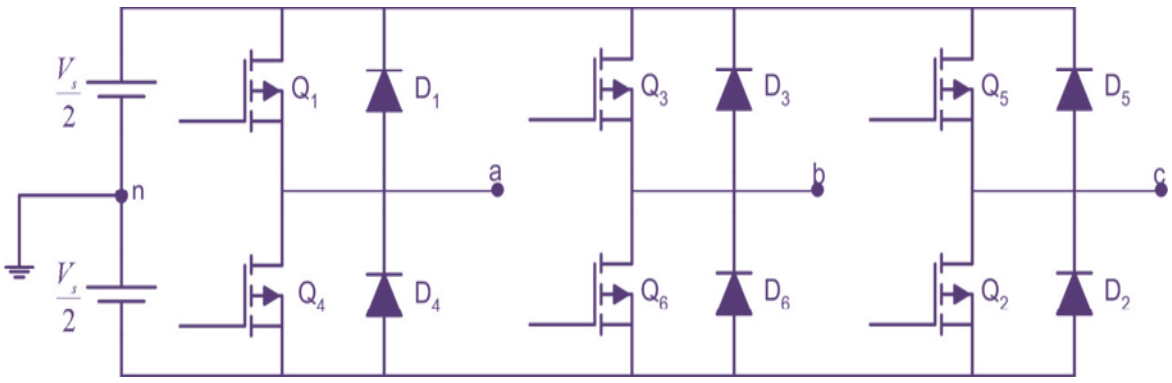
التحكم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه باستخدام حاكم جهد متناوب ثلاثي الأوجه يعمل في أربع حالات تشغيل مختلفة

## التحكم في المحركات الحثية باستخدام العواكس

## Control of Induction Motor by Inverters

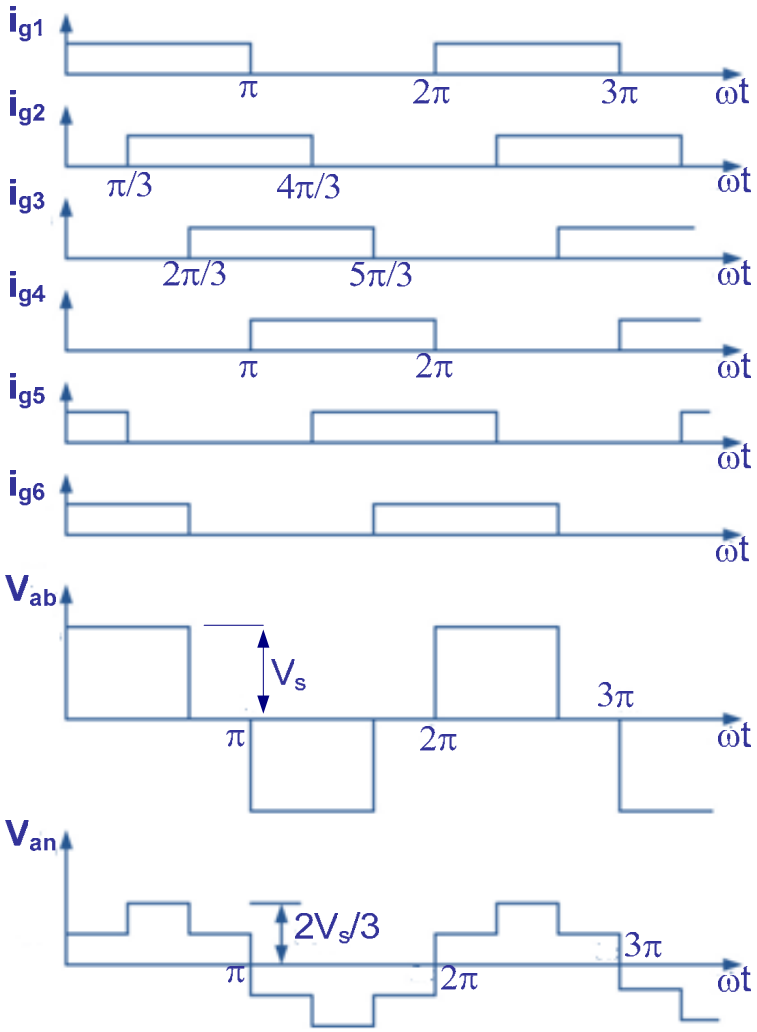
تستخدم العواكس في تنفيذ عمليات التحكم في المحركات الحثية ثلاثية الأوجه وذلك بالتحكم في الجهد المسلط على العضو الثابت أو التحكم في التردد أو التحكم في الجهد والتردد معا، ويتم ذلك باستخدام عدة أنواع من العواكس مثل العاكس ثلاثي الأوجه ذي مصدر الجهد الثابت (Three-phase Voltage Source Inverter) والعاكس ثلاثي الأوجه ذي النبضة متغيرة العرض (PWM Inverter)، ويبين الشكل (5-6) عاكساً ثلاثي الأوجه ذا مصدر جهد ويتكون من ستة موسفت وستة دايودات حيث يتم إشعال كل موسفت لمدة $180^o$ وفصله لمدة $180^o$ أخرى ويتم ذلك بالتتابع كما في الشكل (5-7) ويمكن تشغيل هذا العاكس كعاكس ست خطوات (Six Step Inverter) أو عاكس ذي نبضة متغيرة العرض (PWM Inverter).


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر




الشكل (5-6)

العاكس ثلاثي الأوجه




الشكل (5-7)

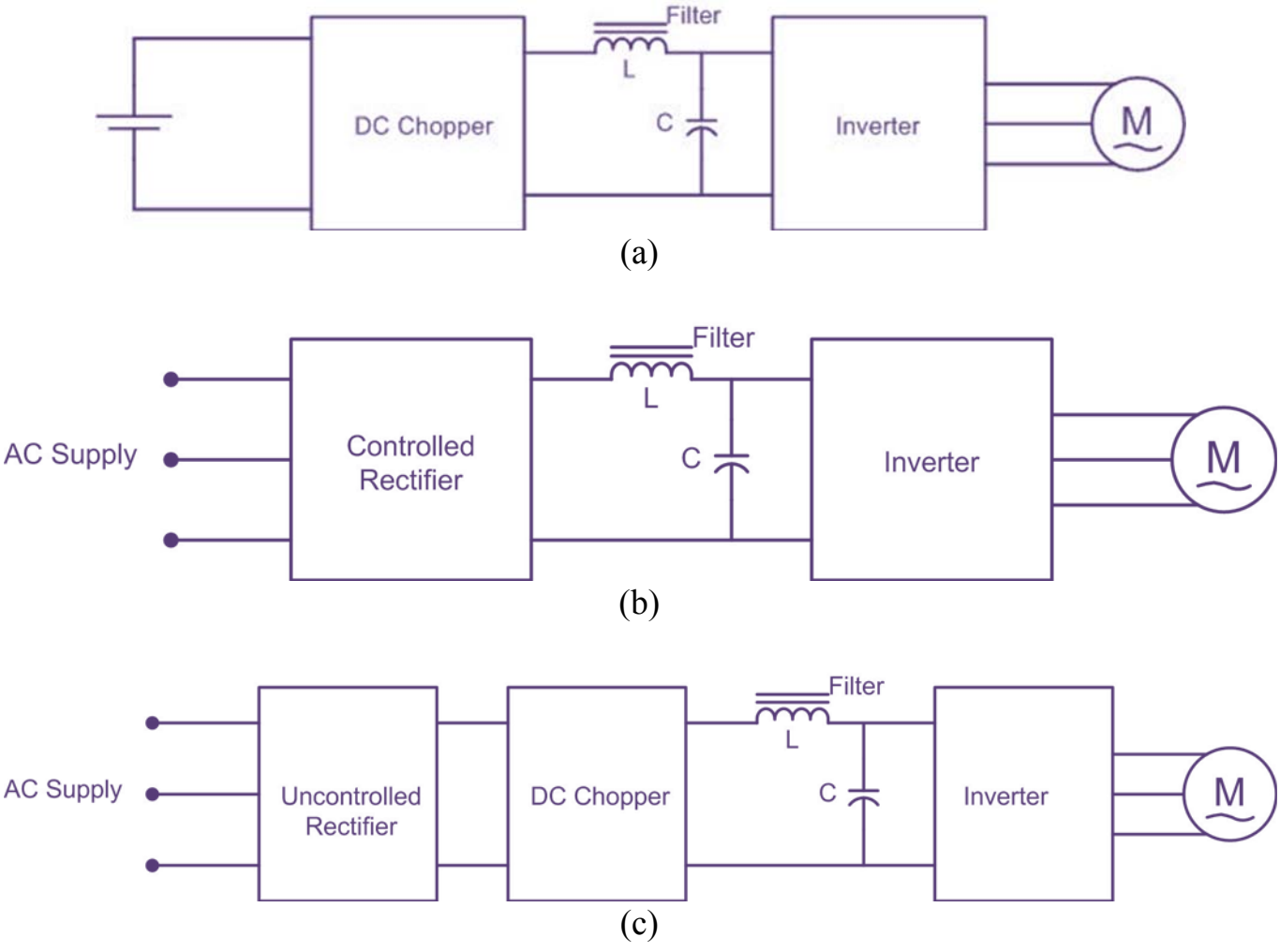
أشكال موجات التحكم والجهد الناتج من العاكس ثلاثي الأوجه ذي مصدر الجهد


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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 الشكل (5-8-a)، أو باستخدام مصدر للتيار المتردد وقنطرة الموحدات المحكومة كما في الشكل (5-8-b)، كما يمكن أن يتم ذلك باستخدام مصدر للتيار المتردد وقنطرة الموحدات غير المحكومة ومقطع التيار المستمر كما في الشكل (5-8-c).

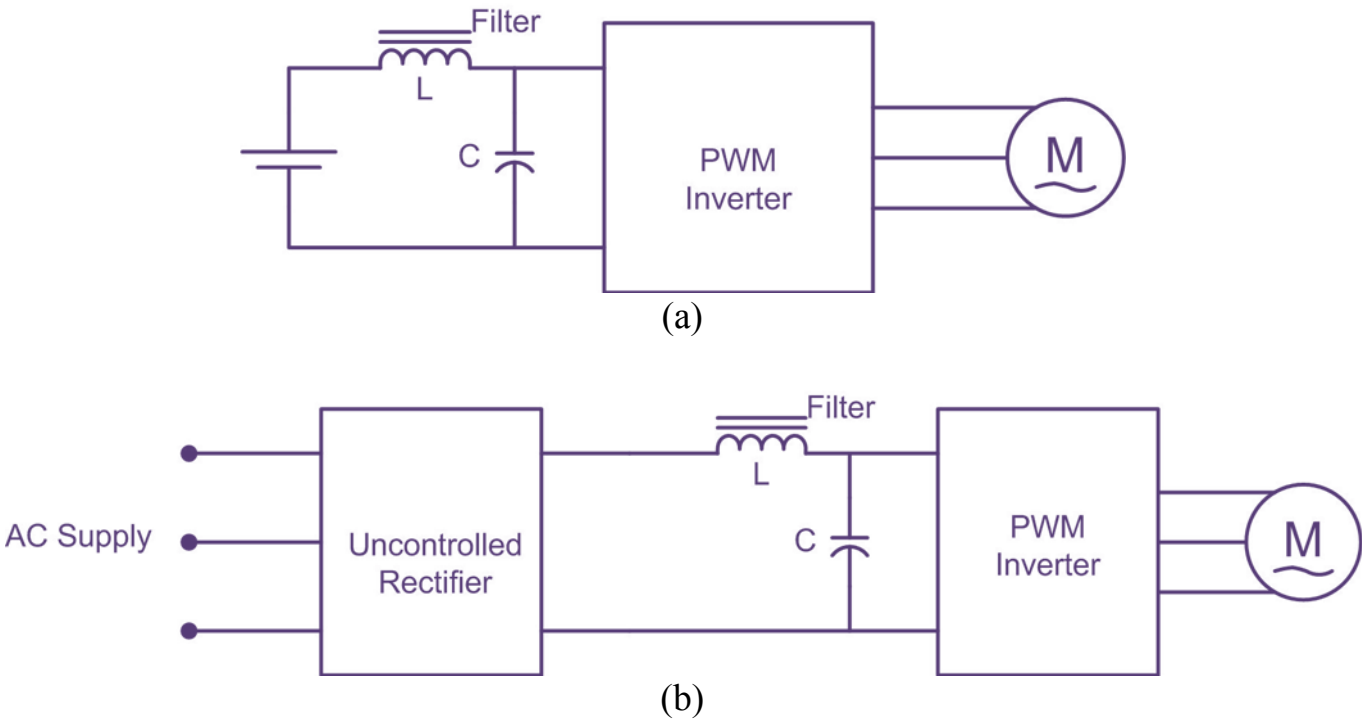
٢. **التحكم في قيمة الجهد الناتج من العاكس ذي النبضة المتغيرة العرض:** وفي هذه الحالة يمكن التحكم في كل من الجهد والتردد معا بتغيير زمن التشغيل والفصل كما في الشكل (5-9).




الشكل (5-8)

التحكم في جهد العاكس ذي الست خطوات بطرق مختلفة


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر




الشكل (9-5)

التحكم في الجهد والتردد باستخدام العاكس ذي النبضة المتغيرة العرض

## ثانيا التحكم في دائرة العضو الدائر

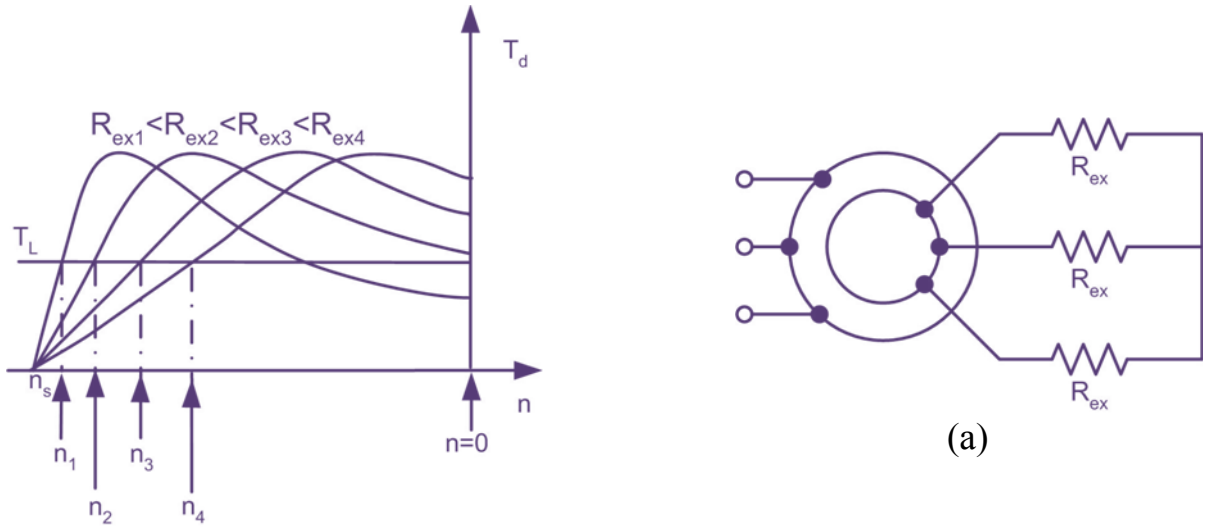
في هذه الحالة يتم التحكم في المحركات الحثية عن طريق دائرة العضو الدائر لذا تصلح هذه الطريقة فقط للتحكم في المحركات ذات العضو الملفوف. والمحركات ذات العضو الملفوف لها بعض العيوب مقارنة بالمحركات ذات القفص السنجابي مثل ارتفاع الثمن وثقل الوزن وكبر الحجم وحاجتها للصيانة الدورية ولكن التحكم فيها عن طريق 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 المقاومة (Static Rotor Resistance Control )
- التحكم باستعادة طاقة الانزلاق (Slip Power Recovery Control)

## التحكم باستخدام المقاومة (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 الشكل (5-10-a) 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 (5-1). الشكل (5-10-b) 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.




(a)

(b)

الشكل (5-10)

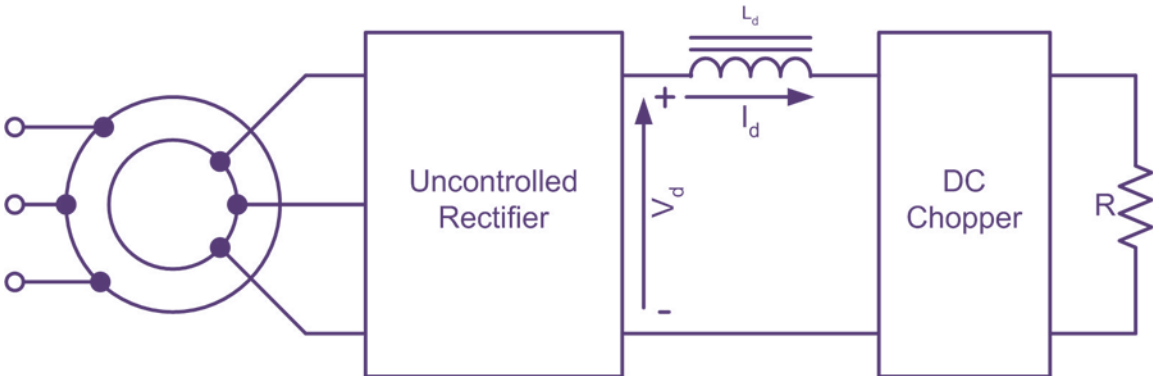
التحكم في المحرك ذي العضو الملفوف باستخدام المقاومة

ويمكن استبدال المقاومات الثلاث ($R_{ex}$) بمقاومة واحدة ($R$) ومقطع بالإضافة إلى قنطرة الموحدات كما في الشكل (5-11) 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 (5-3).

$$Re=R(1-k) \qquad (5\text{-}3)$$

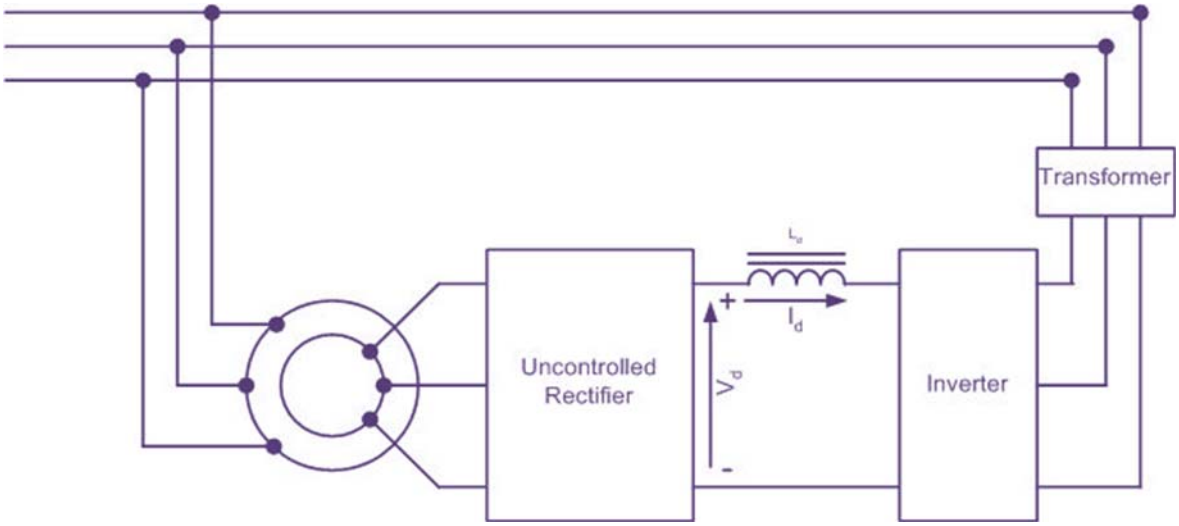
### التحكم باستعادة طاقة الانزلاق (Slip Power Recovery Control)

يمكن إعادة قدرة الانزلاق إلى المصدر باستبدال مقطع التيار المستمر والمقاومة في الشكل (5-11) بمغير قدرة ثلاثي الأوجه كما في الشكل (5-12). يتم تشغيل مغير القدرة في هذه الحالة كعاكس حيث تكون زاوية الإشعال أكبر من $90^o$ 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.




الشكل (5-11)

التحكم في قدرة الانزلاق باستخدام مقطع




الشكل (5-12)

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


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

# أسئلة

## السؤال الأول:

أ. عرف كلاً من سرعة التزامن والانزلاق

ب. ما العوامل التي تؤثر في قيمة العزم المتولد ؟

ت. اذكر مميزات وعيوب المحرك الحثي ثلاثي الأوجه عند استخدامه كمحرك متغير السرعة.

ث. اذكر طرق التحكم في المحرك الحثي ذي القفص السنجابي واشرح اثنتين منها بالتفصيل.

ج. اذكر طرق التحكم في المحرك الحثي ذي العضو الملفوف واشرح اثنتين منها بالتفصيل.

## السؤال الثاني:

**ضع ✓ أو × أمام العبارات التالية، ثم اكتب العبارة الصحيحة:**

- تمتاز طريقة التحكم في جهد العضو الثابت بمدى التحكم الواسع ☐
- يتم التحكم في جهد العضو الثابت للحصول على سرعات أكبر من السرعة المقننة
- يتم التحكم في التردد للحصول على سرعات أكبر من السرعة المقننة ☐
- تستخدم طريقة التحكم في التردد في عملية بدء المحركات الحثية ☐
- طريق التحكم بثبات المجال تتم بالتحكم في الجهد والتردد معاً بحيث تكون النسبة بينهما ثابتة ☐
- يتم التحكم في المحرك ذي القفص السنجابي بإضافة مقاومة في العضو الدائر ☐
- تستخدم طريقة كرامر الاستاتيكية للتحكم في المحرك ذي القفص السنجابي ☐

## السؤال الثالث:

أ. اشرح موضحاً بالرسم كيفية استخدام حاكم الجهد المتناوب للتحكم في المحرك الحثي ليعمل في أربع حالات التشغيل

ب. اشرح كيفية التحكم في الجهد باستخدام العواكس

ت. اشرح موضحاً بالرسم طريقة كرامر الاستاتيكية للتحكم في المحرك الحثي ثلاثي الأوجه


WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر