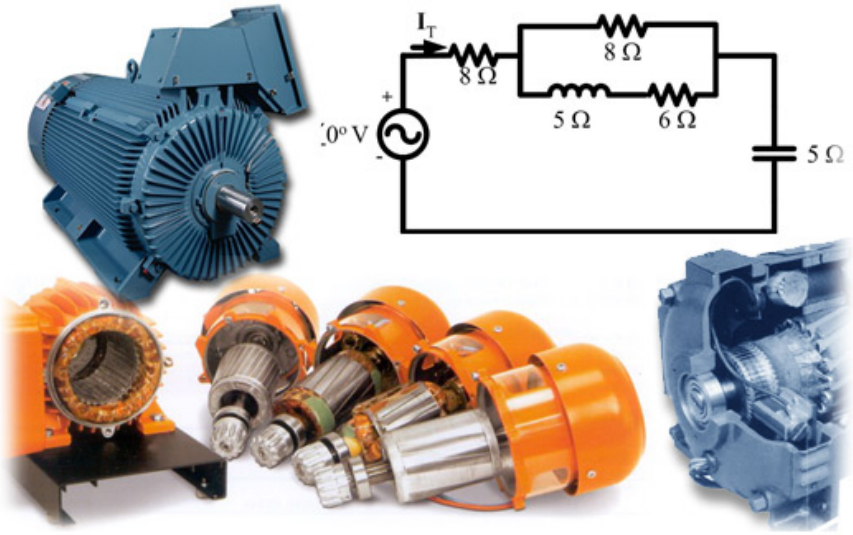
المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

آلات ومعدات كهربائية

دوائر وقياسات كهربائية – ٢

١٣٢ كهر



جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي: لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " دوائر وقياسات كهربائية -٢ " لمتدربي قسم" آلات ومعدات كهربائية " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه: إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

الحمد لله حمدا كثيرا كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، والصلاة والسلام على سيدنا محمد وعلى آله وصحبه، أما بعد

فإن مقرر دوائر وقياسات كهربائية -٢ يهدف إلى تعريف المتدرب بأساسيات الكهرومغناطيسية ومبادئ التيار المتردد وتحليل دوائره البسيطة، كما يهدف إلى تعريف المتدرب بأهم أجهزة قياس التيار المتردد وكيفية استعمالها. ودراسة هذا المقرر ستمكن المتدرب من:

- الإلمام بأساسيات المغناطيسية الطبيعية وأساسيات الكهرومغناطيسية مثل الآثار المغناطيسية للتيار والحثية.
- الإلمام بمبادئ التيار المتردد وكيفية تحليل دوائره .
- فهم التوصيلات المختلفة للمعاوقات في دوائر التيار المتردد.
- أخذ فكرة عن مقومات التيار المتردد.
- الإلمام بدوائر التيار المتردد ثلاثي الأطوار.
- الإلمام بأساسيات قياس التيار المتردد والأجهزة المستعملة في القياس.

ولتحقيق هذه الأهداف بإذن الله تعالى فقد قسمت هذه الحقيبة التدريبية إلى ثلاثة وحدات رئيسة:

تعنى الوحدة الأولى بأساسيات الكهرومغناطيسية التي تعتبر أساس التقنية الكهربائية، فالتيارات والجهود المتوفرة في نظم التوزيع الكهربائي تولد نتيجة حركة أسلاك موصلة داخل مجال مغناطيسي، والمحولات التي لا تشتغل الشبكات بدونها تستعمل قانون الحث الكهرومغناطيسي الذي اكتشفه فاراداي، والمحركات الكهربائية، الكبيرة منها والصغيرة، تشتغل نتيجة لتواجد موصلات تمر فيها تيارات كهربائية داخل مجالات مغناطيسية، ومعظم أجهزة القياس تشتغل نتيجة للتأثير المتبادل بين المجالات المغناطيسية الطبيعية أو المولدة عن طريق تيارات كهربائية. ولهذه الأسباب يتوجب على طالب التقنية الكهربائية أن يلم بهذه الموضوعات. وتهدف هذة الوحدة إلى تحقيق هذا الغرض ، وقد قسمت إلى فصلين: فصل المغناطيسية، وفصل أساسيات الكهرومغناطيسية.

وفي الفصل الأول سندرس المغناطيسية الطبيعية وظواهرها، وسنتطرق إلى القوة المشاهدة بين الأقطاب المغناطيسية، وإلى مفهوم خطوط القوى التي تساعد في فهم الفيض المغناطيسي وكثافته، ثم نرى كيف نصنف المواد إلى مغناطيسية وغير مغناطيسية حسب قابليتها لتمرير خطوط القوى وذلك باستعمال مفهوم

النفاذية، وأخيرا سنعرف شدة المجال المغناطيسي المربوط بكثافة الفيض والذي لا يعتمد على نوع المادة المتواجدة في المجال.
وفي الفصل الثاني فإننا سنتطرق إلى دراسة الظواهر المغناطيسية للتيار الكهربائي بإيجاز، وإلى دراسة القوى الناتجة عن تواجد أسلاك حاملة للتيار داخل مجالات مغناطيسية، ثم سندرس مفهوم الحثية المستعملة كثيرا في الدوائر الكهربائية. وأخيرا سندرس بإيجاز الحث الكهرومغناطيسي وبخاصة العلاقة بين التيار المار في ملف والجهد المستحث فيه، وهذه العلاقة ضرورية لتحليل دوائر التيار المتردد.

وخصصت الوحدة الثانية لدراسة مبادئ التيار المتردد وتحليل دوائره، وقد قسمت إلى أربعة فصول:
سنتطرق في الفصل الأول إلى تعريف التيار المتردد وشرح خصائصه، فنعرف الدورة والتردد والقيمة اللحظية والقيمة الفعالة. وفي الفصل الثاني سنعرف الأنواع المختلفة للمعاوقات كما نعرف مفهوم المطاور الذي يسهل كثيرا تحليل دوائر التيار المتردد. بعد ذلك سنشرح التوصيلات المختلفة للمعاوقات (توصيل على التوالي، على التوازي، التوصيل توالي -توازي)، وسنبين بالأمثلة الخطوات المستعملة في التحليل. وأخيرا سندرس مقومات التيار المتردد البسيطة.
أما الفصل الثالث فإنه يعنى بتعريف الأنواع المختلفة للقدرة الكهربائية في دوائر التيار المتردد وأيضا بتعريف معامل القدرة ذي الأهمية الكبرى في التقنية الكهربائية. وأخيرا سندرس في الفصل الرابع دوائر التيار المتردد ثلاثية الأطوار والتوصيلات المختلفة المستعملة في هذه الدوائر.

أما الوحدة الثالثة والأخيرة فسندرس فيها قياسات التيار المتردد، وقد قسمت إلى ثلاثة فصول:
في الفصل الأول سنشرح طريقة تشغيل أهم أجهزة قياس التيار المتردد والجهد المتردد (الآميترات والفولطميترات) مع ذكر مزاياها وعيوبها، وكيفية إطالة مدى قياسها باستعمال محولات القياس. وفي الفصل الثاني سنتطرق إلى شرح طرق قياس القدرة والطاقة ومعامل القدرة في الدوائر أحادية الطور وفي الدوائر ثلاثية الأطوار، والأجهزة المستعملة في ذلك. وأخيرا سنشرح في الفصل الأخير طريقة قياس التردد وطريقة دقيقة لقياس المعاوقات ألا وهي طريقة القناطر.

والله الموفق

دوائر وقياسات كهربائية – ٢

الكهرومغناطيسية

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الجدارة: معرفة أساسيات الكهرومغناطيسية اللازمة لفهم دوائر وقياسات التيار المتردد.

الأهداف: بعد دراسة هذه الوحدة يكون للطالب القدرة على معرفة:

- أساسيات المغناطيسية الطبيعية وطريقة تصنيف المواد من وجهة النظر المغناطيسية .
- القوى الكهرومغناطيسية والآثار المغناطيسية للتيار الكهربائي .
- الحثية الذاتية والتبادلية.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان هذه الوحدة بنسبة ٨٠٪

الوقت المتوقع للتدريب: ساعتان للفصل الأول و أربع ساعات للفصل الثاني، بحيث يكون الوقت الكلي ست ساعات.

الفصل الأول

المفاهيم الأساسية للمغناطيسية

في هذا الفصل سندرس بإيجاز أساسيات المغناطيسية الطبيعية وسنعرف مفهوم المجال والفيض المغناطيسيين وكذلك مفهوم النفاذية وسنرى كيف تقسم المواد من وجهة النظر المغناطيسية.

القوة المغناطيسية

نميز أي مغناطيس بقطبيه الشمالي (North و رمزه N) والجنوبي (South ورمزه S). وعندما نقرب قطبي مغناطيسين نلاحظ أن القطبين يتجاذبان إذا كانا مختلفين ، و يتنافران إذا كانا متشابهين. ولوحظ بالتجربة أن قانون هذه القوة F يشبه قانون كولون للكهروستاتيكية (راجع مادة دوائر وقياسات كهربائية-١) ، أي

$$F=\frac{\mu}{4\pi}\frac{P_1 P_2}{r^2} \qquad \square_1 \square_1$$

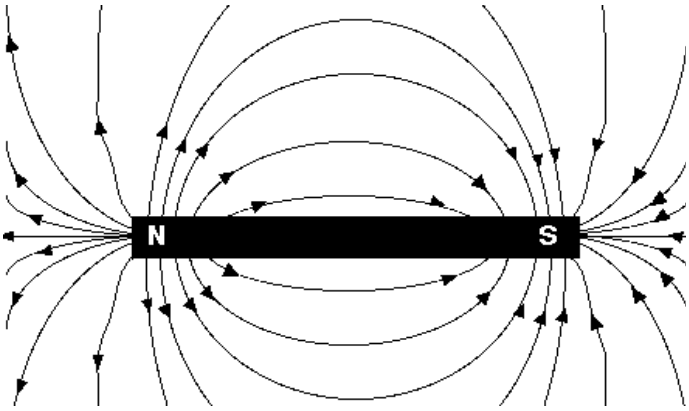
حيث

- μ تسمى نفاذية الوسط الذي يحيط بالمغناطيسين، وهي تعبر عن مدى قابلية هذا الوسط لنقل القوة بين القطبين وسندرسها بالتفصيل فيما بعد ؛
- P_1 و P_2 هما شدتا القطبين المغناطيسيين ووحدتهما الآمبير-متر (A.m). وسبب وجود الآمبير في الوحدة هي أن التيار الكهربائي المار في سلك ينتج نفس الأثار المغناطيسية كالتي ينتجها مغناطيس طبيعي كما سنرى في الفصل الثاني من هذه الوحدة. ونعرف شدة القطب المغناطيسي بطريقة مماثلة لتعريف الشحنة الكهربائية، أي أنه إذا وضعنا قطبين شدة كل منهما ١A/m على بعد ١m من بعضهما، فإن القوة الناتجة تساوي $\frac{\mu}{4\pi}$ نيوتن.
- r هي المسافة بين القطبين.

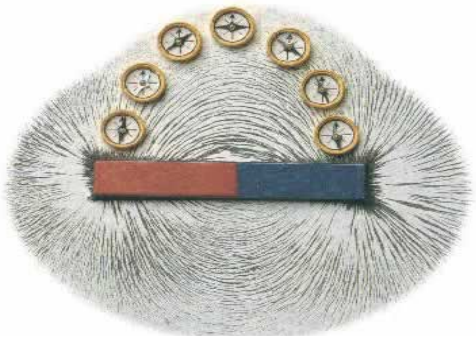
المجال المغناطيسي

يمكن تعريف المجال المغناطيسي بأنه المنطقة المحيطة بالمغناطيس و التي تظهر فيها آثاره المختلفة. من هذه الآثار نذكر على سبيل المثال انحراف إبرة مغناطيسية بطريقة معينة (كانحراف البوصلة في مجال المغناطيس الأرضي) ، أو ظهور قوة دافعة كهربائية في موصل يتحرك داخل نفس المجال.

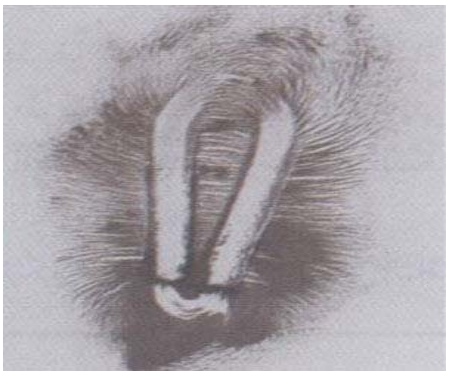
ولدراسة وتحليل المجال المغناطيسي نستعمل مفهوم خطوط القوى أي أننا نخطط المجال المغناطيسي برسم خطوط قوى فيه بحيث أن المماس لخط القوة عند أي نقطة يعطي اتجاه القوة على قطب شمالي موجود في هذه النقطة. وكما هو موضح في الشكل ١-١ فإن هذه الخطوط لا تتداخل فيما بينها، وهي خطوط مغلقة وتتبع دائما من القطب الشمالي للمغناطيس لتدخل في قطبه الجنوبي . ويمكن إيضاح خطوط القوى بواسطة لوح من الزجاج مغطى ببرادة الحديد، وبوضع مغناطيس تحت هذا اللوح وبدق اللوح دقا خفيفا ، تنظم الأجزاء الحديدية نفسها على هيئة خطوط متقاربة. ويبين الشكل ٢-١ تشكيل الأجزاء الحديدية عند استعمال قضيبا مغناطيسيا، وكما نلاحظ فقد وضعت مجموعة بوصلات في أماكن مختلفة حول القضيب لتدل بانحرافها على اتجاه المجال، أما الشكل ٣-١ فإنه يبين تشكيل المجال المغناطيسي بالنسبة لمغناطيس على هيئة حدوة الحصان ، وهذان الشكلان للمغناطيس هما الأكثر استعمالا.



الشكل ١-١: خطوط المجال المغناطيسى



الشكل ٢-١: خطوط المجال حول قضيب مغناطيسي



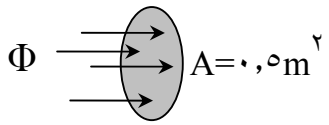
الشكل ٣-١: خطوط المجال حول مغناطيس بشكل حدوة حصان

الفيض المغناطيسي

الفيض المغناطيسي Φ في مساحة معينة A يعبر عن عدد خطوط القوى التي تمر عموديا على هذه المساحة، فكلما ازداد عدد الخطوط ازداد الفيض، ووحدته الويبر (Weber ورمزه Wb) . أما كثافة الفيض B فتسمى الحث المغناطيسي ووحدتها التسلا (Tesla ورمزه T)، وهي مقدار موجه اتجاهها في نقطة معينة هو اتجاه خطوط القوى في هذه النقطة، وترتبط قيمتها بالفيض بالمعادلة

$$B=\frac{\Phi}{A} \qquad \text{١□٢}$$

مثال ١□١: إذا كان الفيض المغناطيسي في المساحة A المبينة في الشكل ٤-١، $\Phi=٢\times١٠^{-٥}$ Wb، احسب كثافة الفيض حول هذه المساحة.

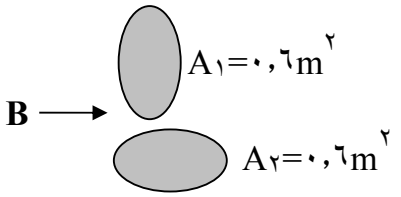


الشكل ٤-١

الحل:

$$B=\frac{\Phi}{A}=\frac{2\times10^{-5}}{0.5}=4\times10^{-5}\,T$$

مثال ٢□١: احسب الفيض المغناطيسي في المساحتين المتعامدتين $A_١$ و $A_٢$ (الشكل ٥□١) إذا كانت كثافة الفيض في المنطقة المحيطة بالمساحتين $B=١٠^{-٥}$T ، وكان اتجاهها عمودي على المساحة $A_١$.



الشكل ٥-١

الحل:

الفيض في المساحة A_1: $\Phi = B\,A_1 = ٠,٦ \times ١٠^{-٥}$ Wb

الفيض في المساحة A_2 يساوي الصفر لأن خطوط المجال لاتمر داخل هذه المساحة.

النفاذية

تعتمد كثافة الفيض المغناطيسي في نقطة ما على نوع المادة المتواجدة في تلك النقطة. وتسمى خاصية المادة التي تؤثر على كثافة الفيض النفاذية ويرمز لها بالرمز μ ووحدتها الهنري لكل متر (Henry/m ورمزها H/m). ونستعمل نفاذية الفراغ كمرجع ويرمز لها بالرمز μ. وقيمتها

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ H/m$$

وقيمة نفاذية الهواء قريبة جدا من μ. ونسمي النسبة بين نفاذية مادة ما والنفاذية μ. النفاذية النسبية لهذه المادة ويرمز لها بالرمز μ_r، أي

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \qquad ١\square٣$$

وتعبر النفاذية على مدى سماحية المادة لمرور خطوط القوى المغناطيسية، وعلى هذا الأساس نقسم المواد إلى :

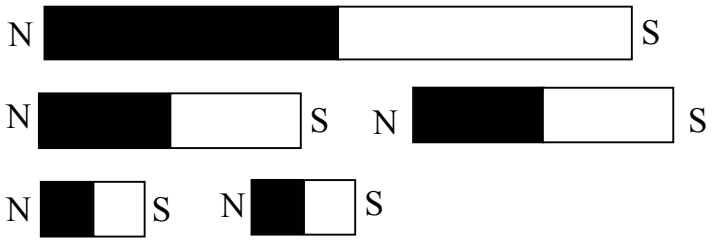
- المواد المغناطيسية (الحديدية Ferromagnetic) و قيم μ_r فيها أكبر من الواحد بكثير كما في الحديد و النيكل والكوبلت. وهذه المواد تزيد من كثافة خطوط المجال بمئات أو آلاف المرات عما كانت عليه في الفراغ (وتتجاوز μ_r المليون في بعض الفلزات).
- المواد شبه المغناطيسية (البارامغناطيسية Paramagnetic) و قيم μ_r فيها أكبر بقليل من الواحد كما في الألومنيوم والسيليكون. وهذه المواد تزيد من كثافة خطوط الفيض عما كانت عليه في الفراغ بنسبة قليلة جدا.

- المواد ضد المغناطيسية (الديامغناطيسية Diamagnetic) و قيم μ_r فيها أقل بقليل من الواحد كما في النحاس والفضة. وهذه المواد تنقص من كثافة خطوط الفيض عما كانت عليه في الفراغ بنسبة قليلة جدا.

وتجدر الإشارة إلى أن المواد شبه المغناطيسية و المواد ضد المغناطيسية تعتبر مواد غير مغناطيسية لأن تأثيرها على كثافة الفيض المغناطيسي يكاد يكون معدوما.

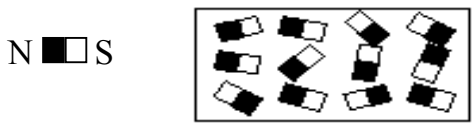
التفسير الجزيئي للمغناطيسية

يفسر ارتفاع الفيض المغناطيسي في الحديد وفي غيره من المواد المغناطيسية إلى تكوين هذه المواد من مغناطيسات متناهية في الصغر تسمى المغناطيسات الجزيئية (magnetic domains). ويوضح الشكل٦-١ هذا المفهوم، حيث نحصل دائما على قضيبين مغناطيسيين لكل واحد منهما قطب شمالي واحد وقطب جنوبي واحد، وذلك كلما قسمنا قضيبا مغناطيسيا إلى قطعتين. ويمكن نظريا الإستمرار في هذا التقسيم حتى الحصول على أصغر مغناطيس له قطب شمالي واحد وقطب جنوبي واحد، وهوالذي نسميه المغناطيس الجزيئي



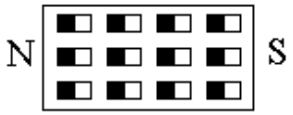
الشكل ٦-١: تقسيم المغناطيسات

وعند انعدام مجال مغناطيسي خارجي تتوزع هذه المغناطيسات الجزيئية عشوائيا كما هو مبين في الشكل ٧-١، بحيث يكون المجال الناتج عن هذه المغناطيسات معدوما.



الشكل ٧-١: مغناطيسات جزيئية غير مرتبة في مادة مغناطيسية

وعند مغنطة هذه المواد المغناطيسية، بتعريضها لمجال خارجي قوي نسبيا، فإن المغناطيسات الجزيئية ترتب نفسها بالطريقة المبينة في الشكل ٨-١.



الشكل ٨-١ : مغناطيسات جزيئية مرتبة في مادة مغناطيسية

والحديد المطاوع يفقد مغناطيسيته بعد وقت قصير من إبعاده عن المجال الممغنط، ولكن يبقى قليل من المغناطيسات الجزيئية به في حالة مرتبة، وهذا يفسر ظاهرة المغناطيسية الاستبقائية. وعندما يمغنط الحديد الصلب فإنه يتحول إلى مغناطيس، ويرجع سبب ذلك إلى بنية الصلب الكثيفة والقوية. ويفقد الحديد الصلب مغناطيسيته إذا تعرض إلى اهتزازات عنيفة أو إلى حرارة عالية.

شدة المجال المغناطيسي

شدة المجال المغناطيسي H في نقطة ما هي النسبة بين كثافة الفيض المغناطيسي والنفاذية المطلقة للمادة الموجودة في تلك النقطة ، أي

$$H=\frac{B}{\mu} \qquad \text{١□٤}$$

ووحدة الشدة هي آمبير لكل متر (A/m) ، وسنرى سبب اختيار هذه الوحدة عندما ندرس العلاقة بين التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي. وعلى العكس من كثافة الفيض، فإن شدة المجال المغناطيسي لا تعتمد على نوع المادة المتواجدة في المجال، وإنما تعتمد على مصدر المجال (المغناطيس) فقط. وشدة المجال هي مقدار موجه لها نفس اتجاه كثافة الفيض.

مثال ٣-١: ينتج مغناطيس مجالا شدته ٢٠A/m في نقطة معينة من الفضاء المجاور له. احسب كثافة الفيض في هذه النقطة إذا كانت نفاذية الفضاء المحيط بها تساوي :

أ - $\mu_.$ (الفراغ أو الهواء)

ب - $١,٠٠٠٠٢٢\mu_.$ (الألمنيوم : مادة بارامغناطيسية)

ج - $٠,٩٩\mu_.$ (مادة ديامغناطيسية)

د - $٥٠٠٠\mu_.$ (نوع من الحديد : مادة مغناطيسية).

الحل

من المعادلة ٤-١ نستنتج أن $B=\mu H$:

أ - $B = \mu_. H = ٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٢٠ = ٢,٥١ \times ١٠^{-٥}$ T

ب - $B = ١,٠٠٠٠٢٢\ \mu_. H = ١,٠٠٠٠٢٢ \times ٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٢٠ = ٢,٥١٣ \times ١٠^{-٥}$ T

ج - $B = ٠,٩٩\ \mu_. H = ٠,٩٩ \times ٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٢٠ = ٢,٤٨ \times ١٠^{-٥}$ T

د - $B = ٥٠٠٠\ \mu_. H = ٥٠٠٠ \times ٤\pi \times ١٠^{-٧} \times ٢٠ = ١٢٥٦٦ \times ١٠^{-٥}$ T

وكما نرى فإن كثافة الفيض لا تتغير بصورة ملحوظة في مكان ما إلا إذا وضعنا مادة مغناطيسية فيه.

الفصل الثاني

أساسيات الكهرومغناطيسية

اكتشف أورستيد الظاهرة المغناطيسية الكهربائية، حيث لاحظ أن البوصلة المغناطيسية تنحرف في اتجاه معين عند وضعها قرب سلك يمر فيه تيار كهربائي. وأوضح بالتجارب أن أي سلك حامل لتيار كهربائي ينشئ حوله مجالا مغناطيسيا له نفس الظواهر التي للمجال المغناطيسي الذي ينتج عن أي مغناطيس طبيعي والذي درسنا خصائصه سابقا. كما أوضحت تجارب أخرى أن قوة ميكانيكية تظهر على أي سلك يمر فيه تيار كهربائي إذا وضع داخل مجال مغناطيسي. وأدت التجارب التي قام بها فاراداي إلى اكتشاف ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي والتي تنص على أن قوة دافعة كهربائية تظهر في أي سلك عندما يتحرك داخل مجال مغناطيسي بحيث يقطع خطوط المجال، أو إذا وضع داخل مجال مغناطيسي يتغير مع الزمن.

وأدت هذه الظواهر إلى الإستعمال الواسع للكهرباء كطاقة نافعة يمكن توليدها وتحويلها إلى أشكال أخرى بطرق بسيطة نوعا ما، وفيما يلي سندرس هذه الظواهر بإيجاز.

شدة المجال الناشئ عن مرور تيار كهربائي في سلك مستقيم طويل

ترتبط خطوط القوى المغناطيسية باتجاه التيار الذي ولدها حسب قاعدة اليد اليمنى الموضحة في الشكل ٩-١. وتنص هذه القاعدة على أنه عند القبض على السلك الحامل للتيار باليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار، فإن أطراف باقي الأصابع تشيرإلى اتجاه المجال.

ويعطى الحث المغناطيسي الناتج عن التيار I المارفي سلك مستقيم طويل بالمعادلة

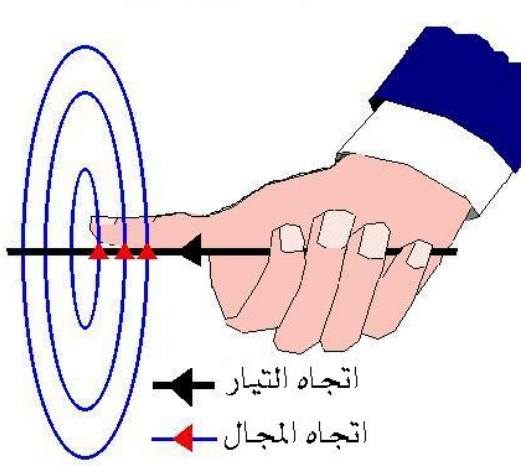
$$B=\frac{\mu I}{2\pi r} \qquad ١□٥$$

حيث r هي المسافة بين النقطة التي نحسب عندها الحث والمسقط العمودي لهذه النقطة على محور السلك، كما هو موضح في الشكل ١٠-١.

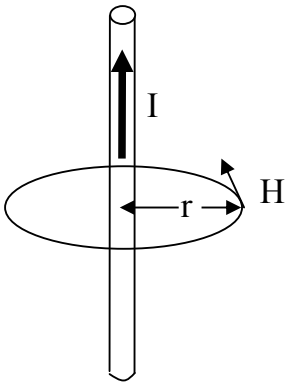
و باستعمال القانون ١□٤ نجد أن شدة المجال الناشئ عن هذا التيار هي

$$H=\frac{I}{2\pi r} \qquad ١□٦$$

من هذه العلاقة نفهم اختيار وحدة A/m لشدة المجال، ونلاحظ أن شدة المجال لاتعتمد على نفاذية الوسط كما أشرنا إلى ذلك في نهاية الفصل السابق.



الشكل ٩-١: قاعدة اليد اليمنى



الشكل ١٠-١: المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في سلك مستقيم طويل

مثال ٤□١ : يمر تيار كهربائي شدته ١٥A في سلك مستقيم طويل موضوع في الفراغ. احسب قيمة الحث المغناطيسي وشدة المجال الناتجين على بعد ٤cm من السلك.

الحل:

نطبق المعادلتين ٥-١ و٦-١ علما أن في الفراغ $\mu=\mu_0=4\pi\times10^{-7}\,H/m$

$$B=\frac{\mu I}{2\pi r}=\frac{4\pi\times10^{-7}\times15}{2\pi\times4\times10^{-2}}=7.5\times10^{-5}\,T$$

$$H=\frac{I}{2\pi r}=\frac{15}{2\pi\times4\times10^{-2}}=59.7\,A/m$$

القوة على سلك حامل لتيار في مجال مغناطيسي

يحدد اتجاه القوة F التي تظهر على سلك حامل لتيار كهربائي I عند وضعه في مجال مغناطيسي كثافة فيضه B باستخدام قاعدة فليمنج لليد اليسرى الموضحة في الشكل ١١-١، والتي تنص على ما يلي : إذا أشارت السبابة إلى اتجاه المجال، وأشارت الوسطى إلى اتجاه التيار فإن الإبهام سيشير إلى اتجاه القوة. أما قيمة هذه القوة فهي

$$F=IBl\sin\theta \qquad ١□٧$$

حيث l هو طول السلك و θ هي الزاوية بين اتجاه التيار وخطوط المجال. ونستنتج أن القوة تصل إلى قيمتها القصوى IBl عندما يكون السلك عمودي على المجال أي عندما $\theta=90^{\circ}$. أما إذا كان السلك موازيا للمجال أي $\theta=0^{\circ}$ فإن القوة تنعدم.

الشكل ١١-١: قاعدة فليمنج لليد اليسرى

مثال ٥-١: وضع سلك طوله ١٠cm عموديا على مجال مغناطيسي. إذا كانت شدة التيار المار في السلك ٢A، وكانت القوة الناتجه على السلك ٠,٠٤N، فما هي كثافة الفيض المغناطيسي؟ احسب هذه الكثافة إذا كانت الزاوية بين السلك والمجال تساوي ٣٠^{o}.

الحل:

من المعادلة ٧-١ نستنتج

$$B=\frac{F}{Il\sin\theta}$$

$$=\frac{0.04}{2\times10\times10^{-2}\times\sin(90^{o})}=0.2\,T$$

عندما تكون الزاوية $\theta = ٣٠^{o}$ تصبح كثافة الفيض

$$B=\frac{0.04}{2\times10\times10^{-2}\times\sin(30^{o})}=0.4\,T$$

القوة بين موصلين حاملين للتيار

إذا وضعنا سلكين طويلين متوازيين وحاملين للتيارين I_1 و I_2 على بعد d بينهما فإن كلا السلكين يصبحان خاضعين للمجال المغناطيسي الذي ينتجه تيار السلك الآخر وبذلك تظهر عليه قوة، فالسلك ٢ مثلا ينتج الحث المغناطيسي B_2 ذا اتجاه عمودي على السلك ١ ، وبذلك تظهر على كل وحدة طول من السلك ١ القوة (حسب المعادلة ٧-١)

$$F_{21}=I_1 B_2$$

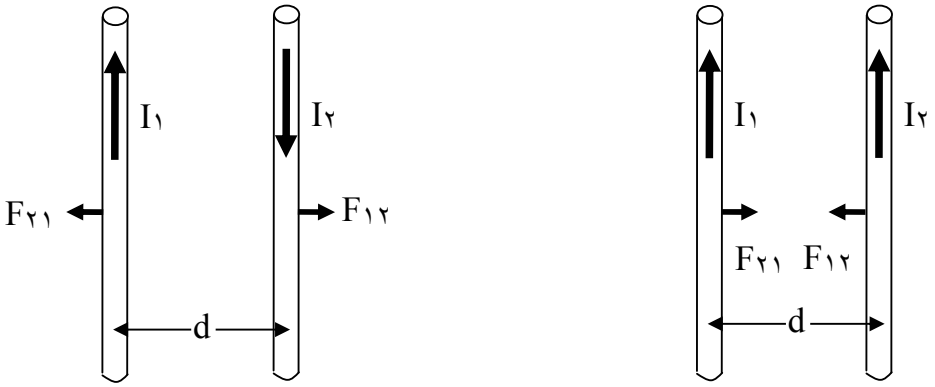
حيث أن الزاوية بين I_1 و B_2 هي $\theta = 90^o$، وحيث إننا أخذنا $l = 1m$. باستعمال المعادلة ٥-١ نكتب

$$B_2 = \frac{\mu I_2}{2\pi d}$$

نستنتج قيمة القوة

$$F_{21} = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi d} \qquad (1-8)$$

و بالمثل نحصل على القوة المؤثرة على كل وحدة طول من السلك ٢، F_{12}، وهي تساوي القوة F_{21} في القيمة وتعاكسها في الإتجاه. أما اتجاه القوتين فإنه يعتمد على اتجاه التيارين، فإذا كان التياران في نفس الإتجاه يتجاذب السلكان، ويتنافران في الحالة الأخرى (الشكل ١٢-١).



الشكل ١٢-١ : القوة بين سلكين حاملين للتيار

وتجدر الإشارة هنا إلى أن تعريف الإمبير مبني على قياس القوة بين سلكين متوازيين، حيث إن القوة بين سلكين مستقيمين بطول لانهائي متوازيين ومساحة مقطعيهما صغيرة يمكن إهمالها ويمر في كل منهما تيار 1A وهما موضوعان في الفراغ على بعد 1m من بعضهما هي 2×10^{-7}N لكل متر طولي. وهذه الطريقة لتعريف الآمبير أعلى دقة من الطرق الأخرى.

مثال ١-٦ : عند قياس قوة التجاذب بين سلكين طويلين متوازيين يمر فيهما تياران موضوعان في الفراغ على بعد 30cm من بعضهما وجد أنها تساوي 20×10^{-7}N/m . احسب شدة التيار المارة في السلك الثاني إذا كانت شدة التيار المار في السلك الأول هي 2A.

الحل :

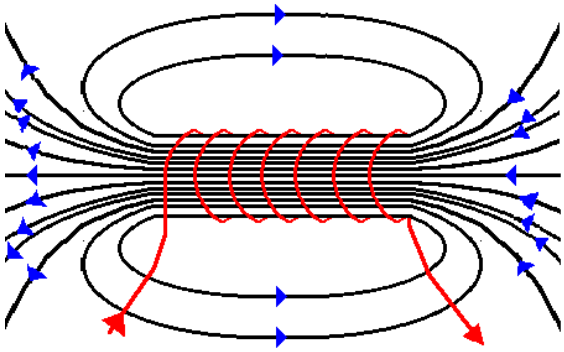
من المعادلة ٨□١ نستنتج

$$I_2 = \frac{2\pi d F_{21}}{\mu_0 I_1}$$

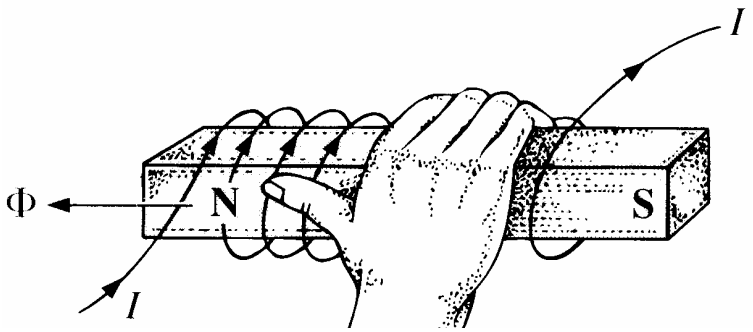
$$= \frac{2\pi \times 30\times10^{-2} \times 20\times10^{-7}}{4\pi \times 10^{-7} \times 2} = 1.5\,A$$

الحثية

لو مررنا تيارا كهربائيا في سلك ملفوف N لفة فإننا نحصل على فيض مغناطيسي يتناسب مع التيار، وتخرج خطوط القوى المغناطيسية من أحد طرفي الملف لتدخل في طرفه الآخر. ولو كان طول الملف كبيرا مقارنة بقطره فإن خطوط المجال تكون كما في الشكل ١٣-١. ونسمي هذا بالمغناطيس الكهربائي لأنه ينتج نفس المجال الذي ينتجه مغناطيس دائم على شكل قضيب موضوع بحيث يتطابق محوره مع محور الملف. ونستطيع رفع قيمة الفيض الناتج عن المغناطيس الكهربائي بإدخال قلب حديدي في الملف. ويمكن معرفة قطبية الملف بمساعدة قاعدة الإبهام التالية والمبينة في الشكل ١٤-١: عند القبض على الملف باليد اليمنى بحيث تشير أطراف الأصابع إلى اتجاه التيار، فإن طرف الإبهام الممدود يشير إلى موضع القطب الشمالى.



الشكل ١٣□١ : المجال المغناطيسي لملف حامل لتيار



الشكل ١٤□١ : قاعدة الإبهام

الحثية الذاتية

نسمي النسبة بين الكمية NΦ (حاصل ضرب الفيض المغناطيسي في عدد اللفات) والتيار I المار في نفس الملف والذي ولد الفيض Φ بالحثية الذاتية L للملف

$$L=\frac{N\Phi}{I} \qquad ١□٩$$

ووحدتها الهنري (Henry ورمزها H) .

الحثية التبادلية

لو وضعنا ملفين بجانب بعضهما ومررنا التيار I_1 في الملف الأول فإن هذا التيار سينتج فيضا مغناطيسيا يمر جزء منه داخل الملف الثاني. نسمي الكمية

$$M_{21}=\frac{N_2\,\Phi_{21}}{I_1} \qquad ١□١٠$$

بالحثية التبادلية بين الملفين ووحدتها الهنري.

في المعادلة ١٠□١، Φ_{21} هو الجزء من الفيض الناتج عن التيار I_1 والمار في الملف الثاني ، و N_2 هو عدد لفات الملف الثاني.

وبالمثل نعرف الحثية التبادلية M_{12} . وفي كل الحالات فإن $M_{12} = M_{21}$.

مثال ٧□١ : تعطى كثافة الفيض المغناطيسي في محورملف مكون من N لفة، ذي قلب (حديدي أو غير حديدي) نفاذيته μ وطوله l، بالمعادلة B=μNI/l، حيث I هوالتيار المار في هذا الملف. وهذه المعادلة لا تصلح إلا إذا كان طول القلب أكبر بكثير من قطره d. احسب الحثية الذاتية للملف عندما تكون

N=١٠٠، l=١٠cm، μ_r=١٠٠٠ (قلب حديدي) و d=٥mm. كم تصبح هذه الحثية لو نزعنا القلب الحديدي ؟

الحل:

باستعمال المعادلة ٢□١ فإن الفيض المغناطيسي Φ يكون

$$\Phi = BA = \frac{\mu N I}{l} A$$

حيث أن مساحة مقطع القلب $A=\pi d^2/4$. وبالتعويض في المعادلة ٩□١ نستنتج الحثية

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 \pi d^2}{4l}$$

$$= \frac{4\pi\times10^{-7}\times1000\times(100)^2\pi(5\times10^{-3})^2}{4\times10\times10^{-2}} = 2.5\times10^{-3}\ H = 2.5\,mH$$

لو نزعنا القلب الحديدي فإن الحثية تنخفض بنسبة μ_r، أي تصبح

$$L = 2.5\times10^{-3}/\mu_r = 2.5\times10^{-3}/1000 = 2.5\times10^{-6}\ H = 2.5\ \mu H$$

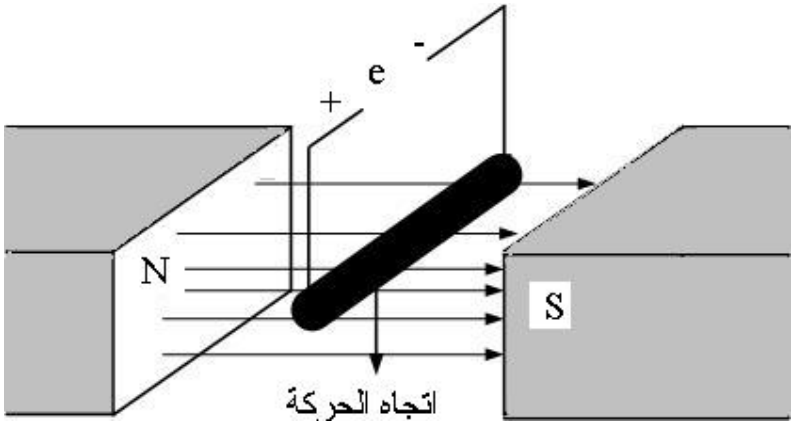
ونلاحظ أن الحثية في الملفات الطويلة تتناسب مع نفاذية ومساحة مقطع القلب ومع مربع عدد اللفات كما تتناسب عكسيا مع طول الملف.

الحث الكهرومغناطيسي

لو حركنا سلك موصل داخل مجال مغناطيسي بحيث يقطع خطوط القوى كما في الشكل □١ ١٥، فإن قوة دافعة كهربائية (ق.د.ك.) ستتولد في هذا السلك. ونلاحظ نفس النتيجة لو ثبتنا السلك وحركنا مصدر المجال المغناطيسي. ولو وضعنا ملفا في منطقة يتغير فيها الفيض المغناطيسي Φ مع الزمن t، فإن الق.د.ك. الناتجة بين أطراف الملف e تحسب باستعمال قانون فاراداي (Faraday)

$$e = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad ١□١١$$

حيث N هو عدد لفات الملف . وتدل الإشارة السالبة على قانون لينز (Lenz) والذي ينص على أن الق.د.ك. تعارض تغير الفيض الذي ولدها ، بحيث لو أغلقنا دائرة الملف فإن تيارا كهربائيا سيمر في الملف وينشئ فيضا مغناطيسيا يعارض تغير الفيض الأصلي، ففي حال ارتفاع هذا الأخير فإن الفيضان الأصلي والمستحث يتعارضان في الاتجاه، أما في حالة انخفاض الفيض الأصلي فإن الفيضان يكون لهما نفس الإتجاه.



الشكل ١٥□١ : الحث الكهرومغناطيسي في سلك موصل
يتحرك في مجال مغناطيسي بحيث يقطع خطوط القوى

ولو مررنا التيار i في ملف ما فإن فيضا مغناطيسيا سيتولد في هذا الملف ، ولو تغير التيار بالنسبة للزمن (مثل التيار المتردد الذي سندرسه في الوحدة القادمة) فإن الفيض سيتغير بنفس الوتيرة لأن الفيض يتناسب مع التيار في كل لحظة. وباستعمال المعادلتين ٩□١ و ١١□١ نستنتج

$$e = -L\frac{di}{dt} \qquad ١٢\square١$$

مسائل إضافية

١□١ : يمر تيار شدته ٢A في سلك طويل مستقيم موضوع في الهواء. احسب كثافة الفيض المغناطيسي الناتج وشدة المجال عند نقطة تبعد ٨cm عن السلك.

٢□١ : يمر تيار شدته ٤A في سلك مستقيم طوله ١٠cm. احسب القوة الميكانيكية التي تظهر على السلك إذا وضع عموديا على خطوط مجال مغناطيسي كثافة فيضه ٠,٠٠٦T. كم تصبح هذه القوة إذا كانت الزاوية بين السلك والمجال ٤٠° ؟

٣□١ : وضع سلك طوله ٠,٥٠m وحامل لتيار شدته ٨A في مجال مغناطيسي كثافة فيضه ٠,٤٠T. ما هي القوة التي سيخضع لها السلك إذا كانت الزاوية بين السلك والمجال ١٥° ؟

٤□١ : يمر التياران ٢A و ٤A في نفس الاتجاه في سلكين طويلين متوازيين يبعدان ٨cm عن بعضهما. احسب القوة بين السلكين. هل هذه القوة تجاذبية أو تنافرية ؟

٥□١ : احسب الحثية الذاتية لملف عدد لفاته ٢٠٠، طوله ٨cm، ذي قلب حديدي نفاذيته النسبية ٥٠٠٠ وقطره ٣mm.

٦□١ : احسب القوة الدافعة الكهربائية المستحثة في ملف عدد لفاته ١٠٠ إذا وضعناه في مجال مغناطيسي يتغير فيضه ٢Wb في الثانية.

دوائر وقياسات كهربائية – ٢

مبادئ التيار المتردد وتحليل دوائره

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الجدارة: معرفة الخطوات المستعملة لتحليل دوائر التيار المتردد البسيطة.

الأهداف:

بعد دراسة هذه الوحدة يكون للطالب القدرة على معرفة:

- خصائص وقوانين التيار المتردد .
- التوصيلات المختلفة للمعاوقات في دوائر التيار المتردد .
- طرق تحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر .
- تحليل دوائر التيار المتردد ثلاثي الأطوار.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان هذه الوحدة بنسبة ٩٠٪

الوقت المتوقع للتدريب: ساعتان للفصل الأول، و سبع ساعات للفصل الثاني، وثلاث ساعات للفصل الثالث، و ساعتان للفصل الرابع، بحيث يكون الوقت الكلي أربع عشرة ساعة.

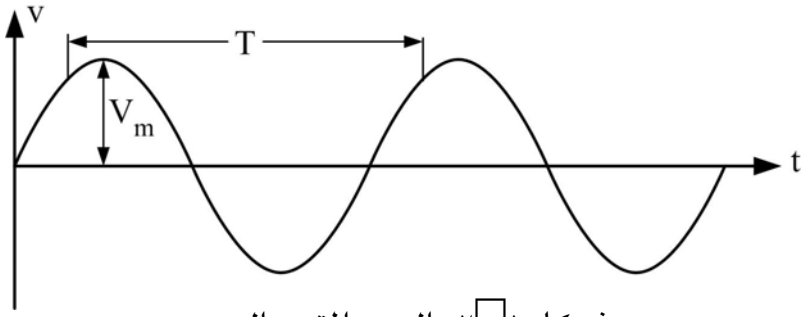
الفصل الأول

التيار المتردد

التيار المتردد هو الأكثر استعمالا في كل مجالات التقنية الكهربائية، ولهذا يجب فهم خصائصه جيدا. وسنحاول شرح هذه الخصائص في هذا الفصل بإيجاز غير مخل.

التيار المتردد الجيبي

يكون التيار (أو الجهد) مترددا إذا تغير اتجاهه و قيمته بصفة دورية منتظمة مع الزمن t، بحيث يمر في كل دورة بنفس التغيرات التي مر بها في الدورة السابقة. وإذا كان هذا التغير مع الزمن على شكل دالة جيبية فنقول أن التيار (أو الجهد) متردد جيبي ، وهذا الشكل هو الأكثر استعمالا حيث إن المولدات المستعملة في الشبكات الكهربائية تنتج جهودا قريبة جدا منه. ويمثل الشكل ١□٢ جهدا مترددا جيبيا، ومنه نعرف ما يلي :



شكل ١□٢ : الجهد المتردد الجيبي

الموجة

هي المسار الذي يرسمه الجهد (أو التيار) بدلالة الزمن أو بدلالة كمية أخرى (كزاوية الطور كما سنرى فيما بعد). ونسمي نصف الموجة فوق المحور الأفقي النصف الموجب، أما النصف الآخر فيسمى النصف السالب.

التردد (f) والدورة (T)

التردد f هو عدد الدورات التي ترسمها الموجة في وحدة الزمن، ووحدته الهرتز (Hertz ورمزه Hz) وهو يمثل عدد الدورات في الثانية. والزمن اللازم لكي تكمل الموجة دورة كاملة يسمى الدورة T. بما أنه كلما انخفضت الدورة ازداد التردد بنفس النسبة ، نستخلص أن

١□٢	$T=\frac{1}{f}$

مثال ١□٢ : احسب دورة موجة مترددة ترددها يساوي

أ - ٥٠ Hz

ب - ٦٠ Hz

الحل :

أ -	$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02\,s = 20\,ms$
ب -	$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0.01667\,s = 16.67\,ms$

وهذان الترددان هما المستعملان في الشبكات الكهربائية عبر العالم (في المملكة العربية السعودية تستعمل ٦٠ Hz).

القيمة اللحظية

نسمي قيمة الجهد (أو التيار) في زمن معين t بالقيمة اللحظية للجهد (أو للتيار) ، ونرمز لها بـ v (أو i). وأكبر قيمة للقيمة اللحظية تسمى القيمة العظمى للجهد (أو للتيار) ورمزها V_m (أو I_m) .

ونستطيع أن نحسب القيمة اللحظية للجهد باستعمال الطريقة الموضحة في الشكل ٢□٢: نمثل مسار الجهد بنقطة A تدور في محيط دائرة بسرعة زاوية ω (وتسمى كذلك التردد الزاوي ووحدتها الراديان لكل ثانية rad/s) بحيث أن المسافة Aa من النقطة A إلى الإسقاط العمودي لهذه النقطة على المحور الأفقي تعطي القيمة اللحظية. ويساوي نصف قطر الدائرة OA القيمة العظمى للجهد ، أما الزاوية α بين نصف القطر OA و المحور الأفقي فإنها تسمى طور الجهد وتعطى بالمعادلة

٢□٢	$\alpha = \omega t + \theta_v$

حيث θ_v هي طور الجهد في بداية الزمن (t = ٠).

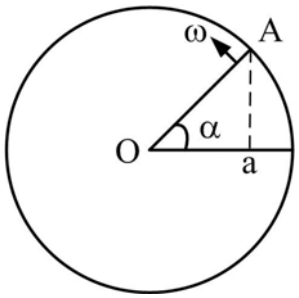
بما أن التردد يعطي عدد الدورات في وحدة الزمن ، وحيث أن دورة واحدة تناسبها زاوية 2π راديان ، فإن العلاقة بين السرعة الزاوية و التردد هي

٢□٣	$\omega = 2\pi f$

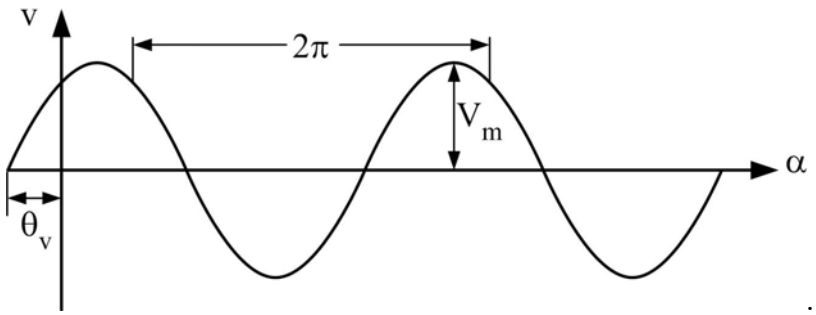
بناء على ما سبق نكتب

٢□٤	$v(t)=V_m \sin\alpha$ $=V_m \sin(\omega t+\theta_v)$ $=V_m \sin(2\pi f t+\theta_v)$

و نمثل موجة الجهد (أو التيار) بدلالة الزاوية α كما في الشكل ٢□٣



شكل ٢□٢ : طريقة تحديد القيمة اللحظية لموجة جيبية



شكل ٢□٣ : الجهد المتردد الجيبي بدلالة

مثال ٢□٢ : احسب التردد الزاوي لموجة مترددة ترددها ٦٠ Hz

الحل :

	$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377\, rad/s$

مثال ٢□٣ : إذا كانت معادلة موجة الجهد هي

	$v(t)=100 \sin(377 t+\frac{\pi}{6})$ V

استنتج ما يلي :

أ - القيمة العظمى

ب - زاوية الطور عند بداية الزمن

ج - زاوية الطور عند الزمن $t = ٠,٠٢٥\ s$

د - القيمة اللحظية عند الزمن $t = ٠,٠٢٥\ s$

الحل :

أ - $V_m = ١٠٠\ V$

ب - $\theta_v = \frac{\pi}{6}\ rad = 30^\circ$

ج - $\alpha = 377 \times 0.025 + \frac{\pi}{6} = 9.95\,rad = \frac{9.95 \times 180}{\pi}\,deg = 570^\circ$

د - $v = 100 \times \sin 570^\circ = -50\ V$

القيمة المتوسطة

تعرف القيمة المتوسطة خلال الفترة الزمنية T. لأي دالة a(t) تتغير مع الزمن بالمعادلة

٢-٥	$A_{av} = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} a(t)\,dt$

وهي المساحة المحصورة بين منحنى الدالة a(t) والمحور الأفقي مقسومة على الفترة الزمنية التي نحسب خلالها هذه القيمة المتوسطة. وتجدر الإشارة إلى أن المساحة تعتبر موجبة إذا كان المنحنى فوق المحور الأفقي و تعتبر سالبة إذا كان المنحنى تحت المحور الأفقي.

مثال ٤□٢: اوجد القيمة المتوسطة للجهد الجيبي المبين في الشكل ١□٢ خلال :

أ - دورة كاملة T

ب - نصف دورة T/٢

الحل :

أ - بما أن المساحة الموجبة لموجة الجهد تساوي المساحة السالبة خلال دورة كاملة نستنتج أن القيمة المتوسطة للجهد الجيبي خلال دورة كاملة تساوي الصفر

ب - خلال نصف دورة نعوض T. بـ T/٢ في المعادلة ٥□٢.

$V_{av} = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} v(t)\,dt = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} V_m \sin(\omega t + \theta_v)\,dt = \frac{2}{\pi} V_m = 0.636 V_m$	

القيمة الفعالة للجهد المتردد والتيار المتردد

نعرف القيمة الفعالة لتيار متردد بأنها القيمة التي تنتج نفس القدرة الحرارية في مقاومة R كالتي ينتجها تيار مستمر معين.

بما أن قيمة التيار المتردد تتغير ، فإن القدرة الحرارية الناتجة هي القدرة المتوسطة (خلال دورة T) والتي تساوي

$P_{ac} = \frac{1}{T}\int_0^T R\, i(t)^2\, dt$	

أما القدرة التي ينتجها تيار مستمر I_{dc} فهي

$P_{dc} = R\, I_{dc}^2$	

بما أن

$P_{ac} = P_{dc}$	

نستنتج أن

$I_{dc} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i(t)^2\, dt}$	٢-٦

ونرمز للقيمة الفعالة (التي تساوي I_{dc}) بالرمز I أو I_{rms} . والرمز الأخير يعني الجذر التربيعي لمتوسط مربع التيار (Root Mean Square) والتسمية مستخرجة من المعادلة ٦□٢.

وبنفس الطريقة نعرف القيمة الفعالة للجهد

$V_{dc} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v(t)^2\, dt}$	٢-٧

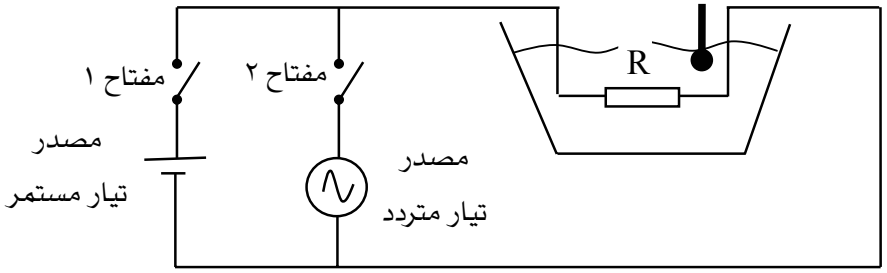
و باستعمال المعادلة ٤□٢ ، نستنتج أن

$V = V_{dc} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707\, V_m$	٢-٨

وكذلك نكتب

٢□٩	$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}=0.707\,I_m$

و نستطيع قياس القيمة الفعالة لتيار متردد بإجراء التجربة الموضحة في الشكل٢□٤ : نأخذ مقاومة R معلومة القيمة ونغمرها في إناء مملوء بالماء ثم نوصلها إلى مصدر تيار مستمر ذي جهد معلوم بإغلاق المفتاح١ ، وعندئذ يمر التيار المستمر I وقيمته V/R ، وترتفع درجة حرارة الماء إلى قيمة معينة. بعد ذلك نفتح المفتاح ١ ونترك الماء يبرد ويرجع إلى حرارته قبل بدء التجربة. ثم نغلق المفتاح٢ ونزيد في القيمة العظمى لجهد مصدر التيار المتردد حتى تصل درجة حرارة الماء إلى نفس القيمة التي وصلت إليها عند تطبيق التيار المستمر. عندئذ تكون القيمة العظمى للتيار المتردد تساوي I/٠,٧٠٧ حسب المعادلة ٩-٢.



شكل ٤□٢ : تجربة لقياس القيمة الفعالة لتيار متردد

مثال ٥□٢ : في الشكل ٤□٢ إذا كانت قيمة $R = ٥٠\Omega$ ، وكان جهد التيار المستمر $V_{dc} = ٢٢٠V$ ، احسب القيمة العظمى للتيار المترددالذي ينتج نفس القدرة في المقاومة ، واحسب قيمة هذه القدرة.

الحل:

نحسب قيمة التيار المستمر I_{dc} باستعمال قانون أوم

	$I_{dc}=\frac{V_{dc}}{R}=\frac{220}{50}=4.4\,A$

القيمة الفعالة للتيار المتردد I تساوي قيمة التيار المستمر الذي يعطي نفس القدرة في المقاومة ، أي

	$I=I_{dc}=4.4\,A$

القيمة العظمى للتيار المتردد تحسب باستعمال المعادلة ٩-٢

	$I_m=\sqrt{2}\,I=\sqrt{2}\times4.4=6.2\,A$

القدرة الحرارية الناتجة في المقاومة

$$P=R\,I^2=50\times4.4^2=968\,W$$

الفصل الثاني

تحليل دوائر التيار المتردد البسيطة

هناك عدة طرق لتحليل دوائر التيار المتردد مهما تعقدت الدائرة، وكلها تستعمل قانون أوم وقوانين كيرشوف، وفي هذا الفصل سنشرح الخطوات المستعملة لتحليل الدوائر البسيطة فقط. وقبل ذلك نعرف الجهد المطاور والتيار المطاور والمعاوقة المركبة، وهذه المفاهيم تساعد كثيرا على تحليل دوائر التيار المتردد. وفي نهاية الفصل سنتطرق إلى دراسة مقومات التيار المتردد البسيطة.

المقاومات الأومية والحثية والسعوية في دائرة التيار المتردد

المقاومة المادية في دائرة التيار المتردد

ينص قانون أوم على أن التيار المار في مقاومة R يتناسب في كل لحظة مع الجهد بين طرفي هذه المقاومة (الشكل a٥□٢)، فإذا كان الجهد بين طرفي المقاومة

	$v(t)=V_m \sin(\omega t+\theta_v)$

فإن التيار الناتج هو

	$i(t)=\frac{v(t)}{R}=\frac{V_m \sin(\omega t+\theta_v)}{R}=I_m \sin(\omega t+\theta_v)$

حيث

	$I_m=\frac{V_m}{R}$

وباستعمال القيم الفعالة نحصل على العلاقة

٢□١٠	$I=\frac{V}{R}$

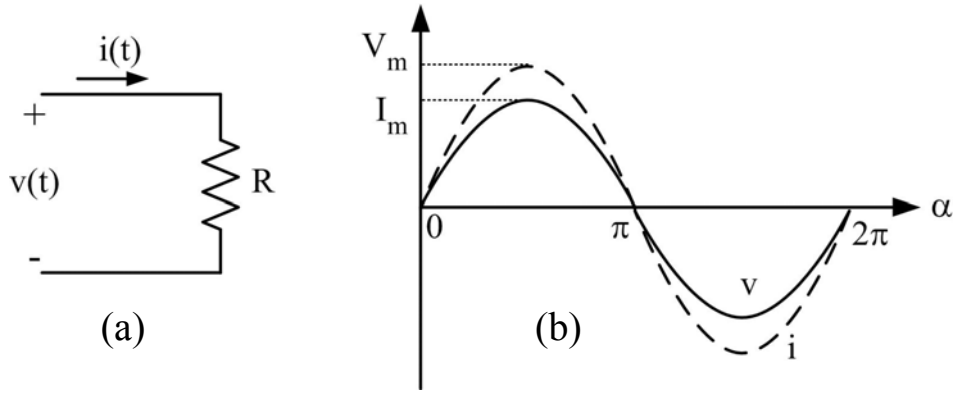
وكما نرى فإن الجهد والتيار في مقاومة لهما نفس الطور ، وهذا موضح في الشكل b٥□٢ حيث أخذنا $\theta_v=0$ لتبسيط الرسم.

المانعة الحثية في دائرة التيار المتردد

رأينا في الفصل الثاني من الوحدة الأولى أنه عند تسليط تيار متردد i(t) على ملف حثيته الذاتية L (الشكلa٦□٢) فإن القوة الدافعة الكهربائية الناتجة e(t) تعطى بالمعادلة ١٢□١. وستحاول هذه الق.د.ك

أن تعاكس الجهد v(t) بين أطراف الملف الذي تسبب في توليد التيار، وهكذا فإن العلاقة بين التيار والجهد في الملف هي

٢□١١	$v(t)=-e(t)=L\frac{di(t)}{dt}$



شكل ٥□٢ : التيار والجهد في مقاومة مادية

فعندما يمر التيار

	$i(t)=I_m \sin(\omega t+\theta_i)$

في ملف، فإن الجهد بين طرفي هذا الملف يكون

	$v(t)=\omega L I_m \cos(\omega t+\theta_i)$ $=\omega L I_m \sin(\omega t+\theta_i+90°)$ $=V_m \sin(\omega t+\theta_i+90°)$

نلاحظ أن القيمة القصوى للجهد تتناسب مع القيمة القصوى للتيار

٢□١٢	$V_m=\omega L I_m$

ونسمي الكمية

٢□١٣	$X_L=\omega L$

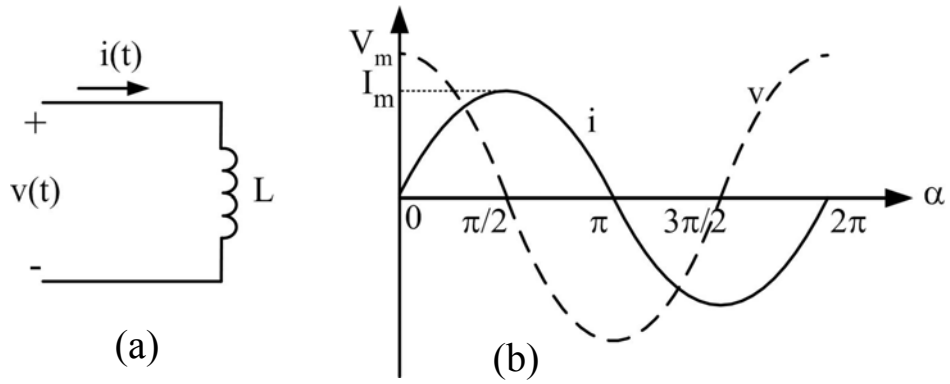
بالممانعة الحثية للملف ، وذلك لأنها تعارض مرور التيار في هذا الملف .

وباستعمال القيم الفعالة

٢□١٤	$V=\omega L I=X_L I$

ونلاحظ أن موجة التيار تتخلف عن موجة الجهد بـ٩٠° ، وهذا موضح في الشكل ٦-٢b حيث أخذنا $\theta_i=0$ لتبسيط الرسم.

وننبه إلى أن السلك الذي يلف منه الملف له بعض المقاومة، ولهذا فإنه توجد للملف خاصيتان : خاصية الحثية وخاصية المقاومة. وتصمم الملفات غالبا بحيث تكون ممانعاتها الحثية كبيرة مقارنة بمقاوماتها. والملف الذي لايحتوي على أي مقاومة (ملف مثالي) يسمى ملف نقي، وفي هذه الوحدة فسنعتبر أن كل الملفات نقية.



شكل ٦-٢ : التيار والجهد في ممانعة حثية

الممانعة السعوية في دائرة التيار المتردد

رأينا في الوحدة الأولى من مادة دوائر وقياسات كهربائية-١ أن سعة المكثفة C تمثل النسبة بين الشحنة الكهربائية لهذه المكثفة والجهد بين طرفيها. وحيث أن التيار يساوي تغير الشحنة بالنسبة للزمن ، فإن العلاقة بين التيار والجهد في مكثفة (الشكل ٧a-٢) هي

$i(t)=C\frac{dv(t)}{dt}$	١٥-٢

فعندما يكون الجهد بين طرفي المكثفة

$v(t)=V_m\sin(\omega t+\theta_v)$	

فإن التيارالناتج هو

$i(t)=\omega C V_m\cos(\omega t+\theta)$ $=\omega C V_m\sin(\omega t+\theta+90°)$ $=I_m\sin(\omega t+\theta+90°)$	

نلاحظ أن القيمة القصوى للجهد تتناسب مع القيمة القصوى للتيار

٢□١٦	$V_m = \frac{1}{\omega C} I_m$

ونسمي الكمية

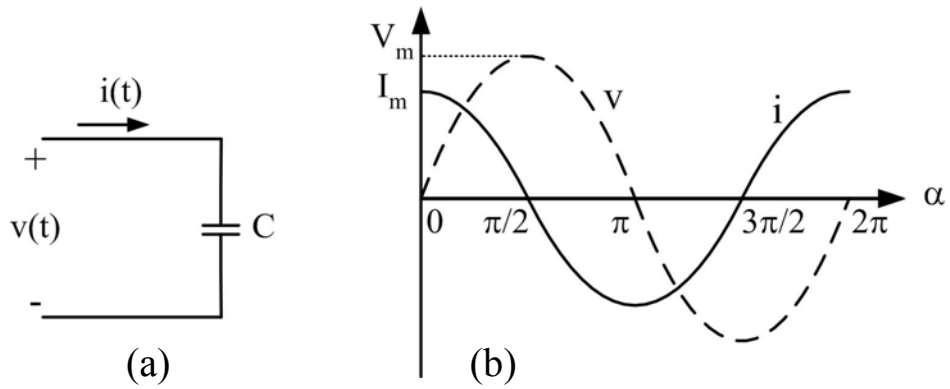
٢□١٧	$X_C = \frac{1}{\omega C}$

بالممانعة السعوية للمكثفة ، وذلك لأنها تعارض مرور التيار في هذه المكثفة .

وباستعمال القيم الفعالة

٢□١٨	$V = \frac{1}{\omega C} I = X_C I$

كما نلاحظ أن موجة التيار تتقدم على موجة الجهد بـ٩٠°، وهذا موضح في الشكل ٢□٧b حيث أخذنا θ_V=٠ لتبسيط الرسم.



شكل ٢□٧ : التيار والجهد في ممانعة سعوية

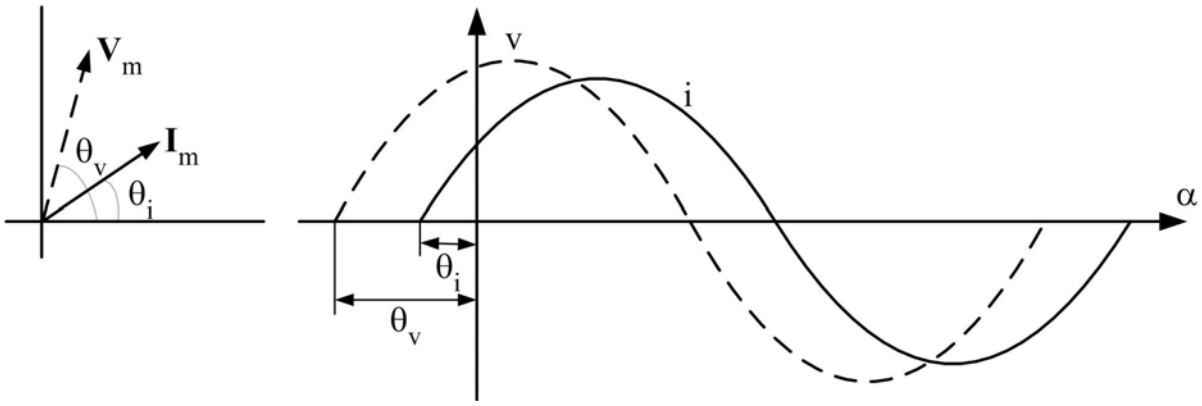
التطبيق العام لقانون أوم على دائرة تيار متردد

المطاور (Phasor)

لكي يتم تطبيق قانون أوم (وقوانين كيرشوف) في دوائر التيار المتردد بطريقة سهلة نستعمل مفهوم الجهد المطاور و التيار المطاور ومفهوم المعاوقة المركبة. لقد رأينا من قبل (الشكل ٢□٢) أننا نستطيع تمثيل الجهد (أو التيار) الجيبي بمتجه يساوي قياسه القيمة القصوى للجهد ويدور بسرعة زاوية تساوي التردد الزاوي لهذا الجهد. وبما أن كل تيارات وجهود الدائرة لها نفس التردد الزاوي، فإن متجهاتها تدور بنفس السرعة، وبهذا تبقى الزاوية الفاصلة بين أي متجهين ثابتة بالنسبة للزمن وتساوي

قيمتها عند الزمن t=٠. ولتسهيل الحسابات نرسم كل المتجهات عند بداية الزمن. ويمثل الشكل ٨□٢ العلاقة بين الكميات الجيبية v و i ومتجهاتها $\mathbf{V}_m$ و $\mathbf{I}_m$، حيث إن طوري v و i عند بداية الزمن هما θ_v و θ_i على التوالي.

وعلما بأننا نستعمل القيم الفعالة للجهود والتيارات في تحليل الدوائر عوضا عن القيم القصوى وذلك لاعتبارات القدرة كما سنرى في الفصل القادم، فإنه من الأفضل أخذ القيمة الفعالة كطول للمتجه (أي نقسم قيم المتجهات على $\sqrt{2}$). وفي هذه الحالة فإننا نرمز لمتجه v مثلا بالرمز $\mathbf{V}$ بدلا من $\mathbf{V}_m$.



شكل ٨□٢ : العلاقة بين موجتي الجهد والتيار ومتجهاتها

ونستطيع تمثيل متجه الجهد (أوالتيار) بعدد مركب، قيمته الحقيقية هي إحداثية المتجه في المحور الأفقي وقيمته التخيلية هي إحداثية المتجه في المحور العمودي، يسمى الجهد (أوالتيار) المطاور ، وهذا التمثيل يسهل كثيرا الحسابات في دوائر التيار المتردد. وهكذا نحول الجهد الجيبي

$v(t)=V_m \sin(\omega t+\theta_v)=V\sqrt{2}\sin(\omega t+\theta_v)$	

إلى الجهد المطاور

$\mathbf{V}=V\angle\theta_v$	٢□١٩

حيث V هو مقياس الجهد المطاور (القيمة الفعالة للجهد) و θ_v هي إزاحته الزاوية (طور الجهد عند بداية الزمن). ونلاحظ هنا أننا استعملنا الصيغة القطبية للجهد المطاور، وهذا يسهل عمليتي الضرب والقسمة. أما الصيغة المتعامدة والتي تسهل حسابات الجمع والطرح فهي

$\mathbf{V}=V\cos\theta_v+j\,V\sin\theta_v$	٢-٢٠

حيث $j=\sqrt{-1}$.

ويسمى المخطط المبين للجهود والتيارات المطاورة في دائرة ما بالشكل المطاور (Phasor diagram).

مثال ٦□٢: أوجد الجهد المطاور للجهد المتردد $v(t)=144.4\sin(377t+30^\circ)$ V .

الحل

القيمة الفعالة للجهد تعطى بالمعادلة $V=\frac{V_m}{\sqrt{2}}=\frac{141.4}{\sqrt{2}}=100\,V$

أما الجهد المطاور فهو $\mathbf{V}=100\angle 30^\circ$ V

المعاوقة المركبة

بما أن معاوقة أي عنصر هي النسبة بين الجهد **V** بين أطرافها والتيار **I** المار فيها فإننا نستطيع تمثيلها هي كذلك بعدد مركب يسمى المعاوقة المركبة **Z**، وهكذا نكتب قانون أوم كما يلي

٢-٢١	$\mathbf{V}=\mathbf{Z}\,\mathbf{I}$

ويجب أن ننتبه إلى أنه على العكس من الجهود والتيارات المطاورة، فإن المعاوقة **Z** لا تمثل دالة جيبية. وفيما يلي نطبق مفهوم المعاوقة المركبة على العناصر الأساسية الثلاثة : المقاومة والملف والمكثفة.

- **المقاومة المادية**

لقد رأينا أن الجهد بين طرفي مقاومة والتيار المار فيها لهما نفس الطور، فلو كان الجهد المطاور

	$\mathbf{V}=V\angle\theta_V$

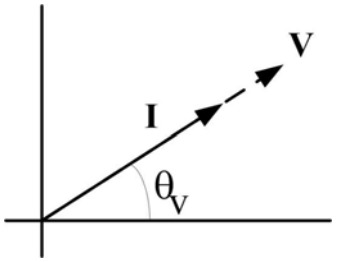
فإن التيار المطاور يكون

	$\mathbf{I}=I\angle\theta_V$

وعليه فإن النسبة بينهما والتي هي المعاوقة المركبة تساوي

٢□٢٢	$\mathbf{Z}_R=\frac{V\angle\theta_V}{I\angle\theta_V}=\frac{V}{I}\angle 0^\circ=R\angle 0^\circ=R$

حيث استعملنا المعادلة ١١□٢. وهكذا نرى أن المعاوقة المركبة لمقاومة مادية هي عدد حقيقي وقيمتها هي النسبة بين القيم الفعالة للجهد والتيار. ويبين الشكل ٩-٢ الشكل المطاور في مقاومة مادية.



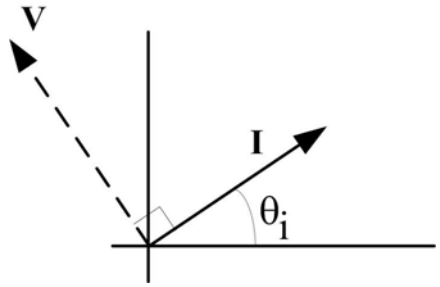
شكل ٩□٢ : الشكل المطاور في مقاومة مادية

- **المانعة الحثية**

رأينا من قبل أن الجهد بين طرفي ملف يتقدم على التيار المار فيه بزاوية ٩٠°، وهكذا فإن $\theta_i = \theta_v - 90^\circ$ ، وعليه فإن المعاوقة المركبة الحثية هي

$\mathbf{Z}_L = \frac{V\angle\theta_v}{I\angle(\theta_v - 90)} = \frac{V}{I}\angle 90^\circ = X_L\angle 90^\circ = jX_L$	٢-٢٣

حيث استعملنا المعادلة ٢-١٤، وكما نعلم من درس الأعداد المركبة فإن العدد التخيلي j قيمته المطلقة هي الواحد وإزاحته الزاوية هي ٩٠°. نستنتج أن المعاوقة المركبة لملف هي عدد تخيلي نقي. ويبين الشكل ٢-١٠ الشكل المطاور في ملف.



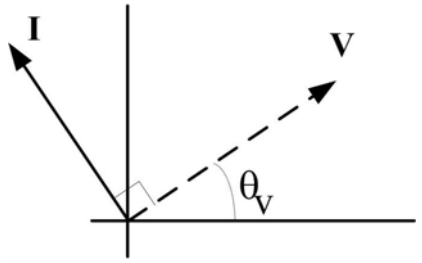
شكل ٢-١٠ : الشكل المطاور في ممانعة حثية

- **المانعة السعوية**

رأينا من قبل أن الجهد بين طرفي ملف يتأخر على التيار المار فيه بزاوية ٩٠°، وهكذا فإن $\theta_i = \theta_v + 90^\circ$ ، وعليه فإن المعاوقة المركبة السعوية هي

$\mathbf{Z}_C = \frac{V\angle\theta_v}{I\angle(\theta_v + 90)} = \frac{V}{I}\angle -90^\circ = X_C\angle -90^\circ = -jX_C$	٢-٢٤

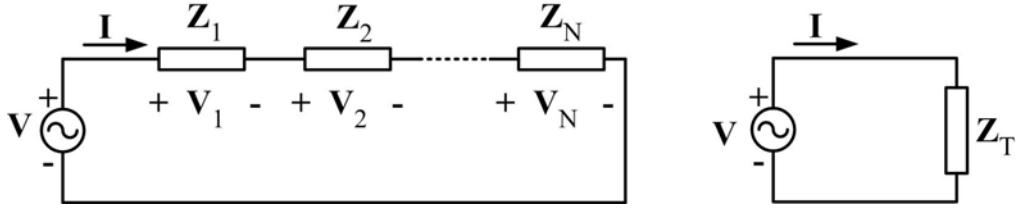
حيث استعملنا المعادلة ٢-١٨، وكما نعلم من درس الأعداد المركبة فإن العدد j- قيمته المطلقة هي الواحد وإزاحته الزاوية هي ٩٠°. نستنتج أن المعاوقة المركبة لمكثفة هي عدد تخيلي نقي. ويبين الشكل ٢-١١ الشكل المطاور في مكثفة.



شكل ٢-١١ : الشكل المطاور في ممانعة سعوية

التوصيل على التوالي

يبين الشكل ١٢□٢ دائرة توالي وهي تتكون من مصدر جهد ومن معاوقات يمر فيها نفس التيار. ونستطيع تمثيل هذه المعاوقات بمعاوقة مكافئة $\mathbf{Z}_T$.



الشكل ١٢□٢ : دائرة التوالي

وباستعمال قانون كيرشوف للجهد

	$\mathbf{V} = \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \cdots + \mathbf{V}_N$

وقوانين أوم

	$\mathbf{V}_x = \mathbf{Z}_x \mathbf{I}$, $\mathbf{V} = \mathbf{Z}_T \mathbf{I}$

حيث $x = 1, 2, \ldots, N$ ، نستنتج

٢□٢٥	$\mathbf{Z}_T = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \cdots + \mathbf{Z}_N$

والشكل العام للمعاوقة $\mathbf{Z}_T$ هو

٢□٢٦	$\mathbf{Z}_T = R_T + j\, X_T = Z_T \angle\theta$

والجزء الحقيقي R_T يمثل المقاومة الكلية و هو موجب، أو معدوم (إذا لم تكن هناك أي مقاومة في الدائرة). أما الجزء التخيلي X_T فيمثل الممانعة الكلية ويمكن أن يكون:

- موجبا : إذا كانت الممانعة الحثية الكلية أكبر من الممانعة السعوية الكلية.
- معدوما : إذا تساوت الممانعة الحثية الكلية و الممانعة السعوية الكلية، أو إذا لم تكن هناك أي ممانعة في الدائرة.
- سالبا : إذا كانت الممانعة الحثية الكلية أصغر من الممانعة السعوية الكلية.

والعلاقة بين مقياس المعاوقة Z_T والمقاومة R_T والممانعة X_T هي

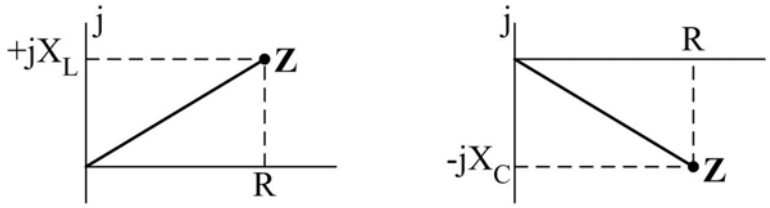
٢-٢٧	$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$

أما العلاقة بين الإزاحة الزاوية للمعاوقة θ وR_T و X_T فهي

٢□٢٨	$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_T}{R_T}\right)$

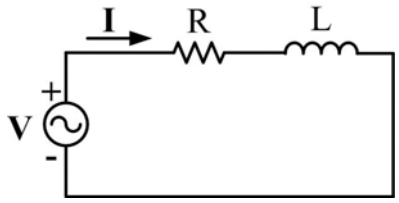
وتمثل هذه الزاوية تخلف التيار المطاور عن الجهد المطاور.

ويمكن توضيح المعاوقة في مستوى مركب. ولما كانت المقاومة لا تأخذ قيما سالبة أبدا فإننا نحتاج إلى الربعين الأول والرابع فقط. ونسمي الشكل التوضيحي الناتج بشكل المعاوقة (Impedance Diagram)، وكما هو مبين في الشكل ٢□١٣ فإن المقاومة R ترسم على المحور الأفقي، أما الممانعة الحثية X_L فترسم على محور j الموجب بينما ترسم الممانعة السعوية X_C على محور j السالب.



شكل ٢□١٣ : أشكال المعاوقة

مثـــال ٢□٧: في دائـــرة التـــوالي الموضـــحة في الشـــكل ٢□١٤، $R=7\Omega$ ، $L=8mH$، $v=100\sqrt{2}\sin(377t)\ V$. احسب المعاوقة المكافئة وارسم شكلها، ثم احسب التيار المار في الدائرة والجهدين $\mathbf{V}_R$ و$\mathbf{V}_L$ بين طرفي المقاومة وطرفي الحثية، وارسم الشكل المطاور للتيار والجهود.



شكل ٢□١٤

الحل:

الممانعة الحثية $X_L = \omega L = ٣٧٧ \times ٨ \times ١٠^{-٣} = ٣\ \Omega$

المعاوقة المكافئة: $\mathbf{Z}_T = R + jX_L$

$= ٧ + j٣\ \Omega = ٧,٦ \angle ٢٣,٢^{o}\ \Omega$

ويبين الشكل ٢□١٥a شكل المعاوقة.

الجهد الكلي: $\mathbf{V} = ١٠٠ \angle ٠^{o}\ V$

التيار :

$$\mathbf{I} = \mathbf{V} / \mathbf{Z}_T = ١٠٠ \angle ٠^o / ٧,٦ \angle ٢٣,٢^o$$

$$= ١٣,٢ \angle -٢٣,٢^o \text{ A}$$

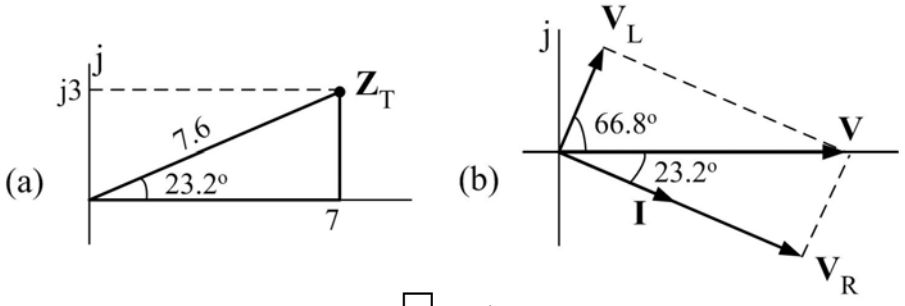
الجهد بين طرفي المقاومة

$$\mathbf{V}_R = R\,\mathbf{I} = \times ١٣,٢ \angle -٢٣,٢^o = ٩٢,٤ \angle -٢٣,٢^o \text{ V}$$

الجهد بين طرفي الحثية

$$\mathbf{V}_L = jX_L\,\mathbf{I} = ٣\angle ٩٠^o \times ١٣,٢ \angle -٢٣,٢^o = ٣٩,٦ \angle ٦٦,٨^o \text{ V}$$

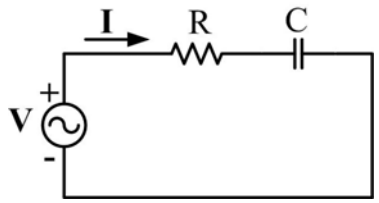
ويبين الشكل ٢-١٥b الشكل المطاور.



شكل ٢-١٥

وعلى العموم فإن التيار يتخلف عن الجهد بزاوية منحصرة بين ٠ و ٩٠^o في أي دائرة توالي تحتوي على مقاومات وممانعات حثية (حمل مادي - حثي) .

مثال ٢-٨: احسب المعاوقة المكافئة للدائرة الموضحة في الشكل ٢-١٦ وارسم شكلها، ثم ارسم الشكل المطاور للتيار والجهود $\mathbf{V}$ و$\mathbf{V}_R$ (بين طرفي المقاومة) و$\mathbf{V}_C$ (بين طرفي المكثفة)، علما أن $R=٥\Omega$، $C=٣٣٢\mu F$، $v=200\sqrt{2}\sin(377t)$ V .



شكل ٢-١٦

الحل:

الممانعة السعوية

$$X_L = ١ / (\omega\, C) = ١/ (٣٧٧ \times ٣٣٢ \times ١٠^{-٦}) = ٨\ \Omega$$

المعاوقة المكافئة:

$$\mathbf{Z}_T = R - jX_C$$

$= ٥ - j٨\ \Omega = ٩,٤ \angle -٥٨^{o}\ \Omega$

ويبين الشكل ١٧a-٢ شكل المعاوقة.

الجهد الكلي: $\mathbf{V} = ٢٠٠ \angle ٠^{o}\ V$

التيار : $\mathbf{I} = \mathbf{V} / \mathbf{Z}_T = ٢٠٠ \angle ٠^{o} / ٩,٤ \angle -٥٨^{o}$

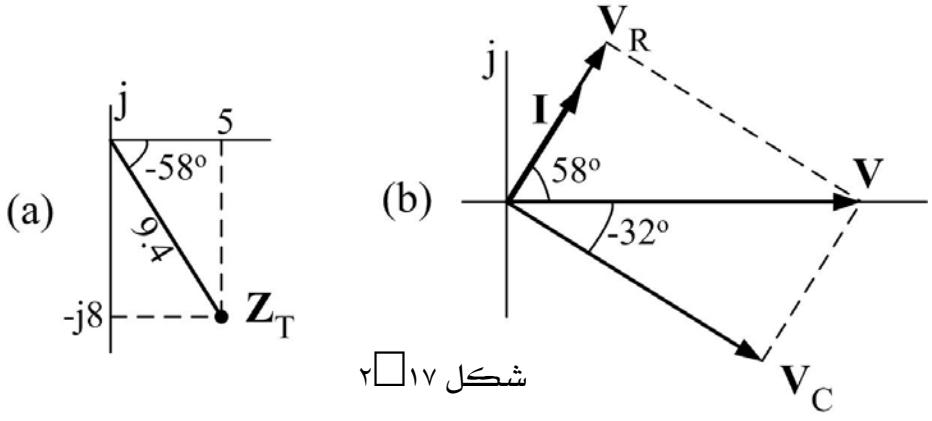
$= ٢١,٣ \angle ٥٨^{o}\ A$

الجهد بين طرفي المقاومة $\mathbf{V}_R = R\,\mathbf{I} = ٥ \times ٢١,٣ \angle ٥٨^{o} = ١٠٦,٥ \angle ٥٨^{o}\ V$

الجهد بين طرفي المكثفة $\mathbf{V}_C = - jX_L\,\mathbf{I} = ٨ \angle -٩٠^{o} \times ٢١,٣ \angle ٥٨^{o} = ١٧٠,٤ \angle -٣٢^{o}\ V$

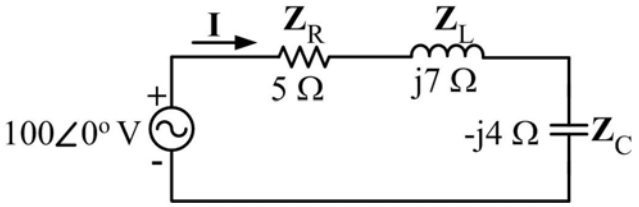
ويبين الشكل ١٧b-٢ الشكل المطاور.

وعلى العموم فإن التيار يتقدم على الجهد بزاوية منحصرة بين ٠ و ٩٠^{o} في أي دائرة توالي تحتوي على مقاومات وممانعات سعوية (حمل مادي - سعوي) .



شكل ١٧-٢

مثال ٩-٢: في دائرة التوالي الموضحة في الشكل ١٨-٢ احسب المعاوقة المكافئة $\mathbf{Z}_T$ والتيار $\mathbf{I}$ وبين أن مجموع الهبوط في الجهد يساوي الجهد المطاور المؤثر، ثم ارسم شكل المعاوقة والشكل المطاور.



شكل ١٨-٢

الحل:

$$Z_T = Z_R + Z_L + Z_C = ٥ + j٧ - j٤$$

$$= ٥ + j٣\ \Omega = ٥,٨ \angle ٣١^o\ \Omega$$

$$I = V / Z_T = ١٠٠ \angle ٠^o / ٥,٨ \angle ٣١^o = ١٧,٢ \angle -٣١^o \quad A$$

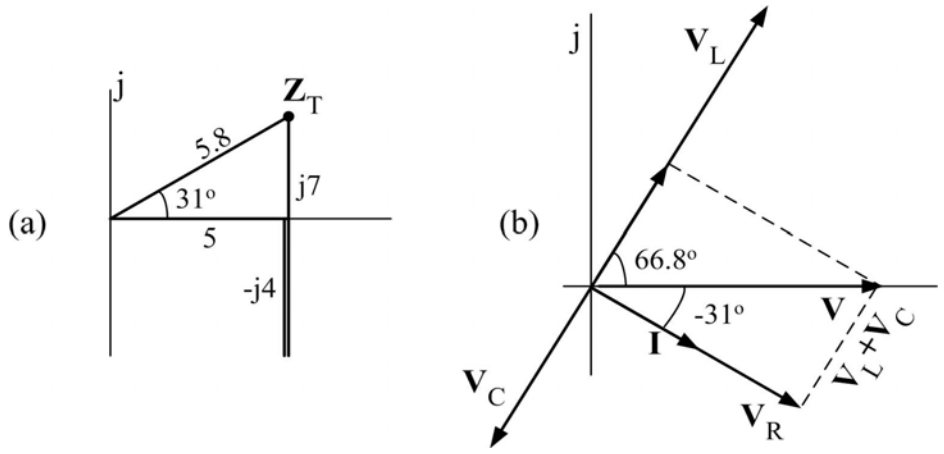
$$V_R = R\ I = ٥ \times ١٧,٢ \angle -٣١^o = ٨٦ \angle -٣١^o \quad V$$

$$V_L = jX_L\ I = ٧\angle ٩٠^o \times ١٧,٢ \angle -٣١^o = ١٢٠,٤ \angle ٥٩^o\ V$$

$$V_C = -jX_C\ I = ٤\angle -٩٠^o \times ١٧,٢ \angle -٣١^o = ٦٨,٨ \angle -١٢١^o\ V$$

$$V_R + V_L + V_C = (٧٣,٦ - j٤٤,٣) + (٦١,٩ + j١٠٣,٢) + (-٣٥,٥ - j٥٩) = ١٠٠\ V = V$$

ويبين الشكل a١٩□٢ شكل المعاوقة ، كما يبين الشكل b١٩□٢ الشكل المطاور.



شكل ١٩□٢

في هذا المثال نرى أن المعاوقة حثية، ولهذا فإن التيار **I** يتخلف عن الجهد المؤثر **V** بزاوية ٣١^o والتي تساوي الإزاحة الزاوية للمعاوقة المكافئة. ونلاحظ أن هبوط الجهد $\mathbf{V}_R$ في المقاومة هو في اتجاه التيار، وأن هبوط الجهد $\mathbf{V}_L$ في الملف يتقدم عن التيار بزاوية ٩٠^o، بينما يتخلف هبوط الجهد $\mathbf{V}_C$ في المكثفة عن التيار بزاوية ٩٠^o.

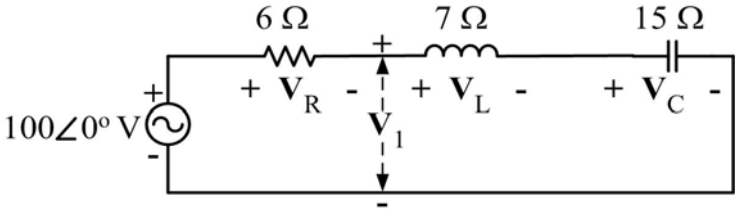
قانون توزيع الجهد

يتوزع الجهد في معاوقات دائرة التوالي حسب القانون التالي

٢-٢٩	$\mathbf{V}_x = \frac{\mathbf{Z}_x \mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T}$

حيث $\mathbf{V}_x$ هو الجهد بين طرفي معاوقات متجاورة معاوقتها المكافئة $\mathbf{Z}_x$ ؛ $\mathbf{Z}_T$ هي المعاوقة المكافئة للدائرة ؛ و$\mathbf{V}$ هو الجهد المؤثر.

مثال ٢-١٠ : احسب الجهود $\mathbf{V}_R$ ، $\mathbf{V}_L$ ، $\mathbf{V}_C$ و$\mathbf{V}_1$ في دائرة التوالي المبينة في الشكل ٢-٢٠، وذلك باستعمال قانون توزيع الجهد.



شكل ٢٠-٢

الحل:

$$\mathbf{Z}_T = R + j X_L - j X_C = ٦ + j٧ - j١٥ = ٦ - j٨\ \Omega = ١٠ \angle -٥٣,١^{o}\ \Omega$$

$$\mathbf{V}_R = \frac{R\,\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \frac{6\angle 0^\circ \times 100\angle 0^\circ}{10\angle -53.1^\circ} = 60\angle 53.1^\circ \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_L = \frac{jX_L\,\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \frac{7\angle 90^\circ \times 100\angle 0^\circ}{10\angle -53.1^\circ} = 70\angle 143.1^\circ \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_C = \frac{-jX_C\,\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \frac{15\angle -90^\circ \times 100\angle 0^\circ}{10\angle -53.1^\circ} = 150\angle -36.9^\circ \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_1 = \frac{(jX_L - jX_C)\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \frac{(7\angle 90^\circ - 15\angle -90^\circ)\,100\angle 0^\circ}{10\angle -53.1^\circ} = \frac{8\angle -90^\circ \times 100\angle 0^\circ}{10\angle -53.1^\circ}$$

$$= 80\angle -36.9^\circ \text{ V}$$

التوصيل على التوازي

يبين الشكل ٢-٢١ دائرة توازي وهي تتكون من مصدر جهد ومن معاوقات خاضعة لنفس الجهد المؤثر بين أطرافها. ونستطيع تمثيل هذه المعاوقات بمعاوقة مكافئة $\mathbf{Z}_T$.

وباستعمال قانون كيرشوف للتيار

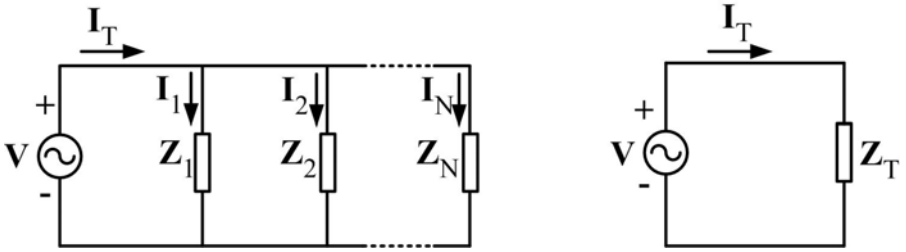
	$\mathbf{I_T = I_1 + I_2 + \cdots + I_N}$

وقوانين أوم

	$\mathbf{I_X = V / Z_X \ , \ I_T = V / Z_T}$

حيث x = ١, ٢, ..., N ، نستنتج

٢□٣٠	$\frac{1}{\mathbf{Z_T}}=\frac{1}{\mathbf{Z_1}}+\frac{1}{\mathbf{Z_2}}+...+\frac{1}{\mathbf{Z_N}}$



الشكل ٢□٢١ : دائرة التوازي

وهنا يستحسن استعمال السماحيات المركبة **Y** عوضا عن المعاوقات **Z**، حيث **Y** = ١/**Z**، وبهذا نكتب المعادلة ٢□٣٠ كما يلي

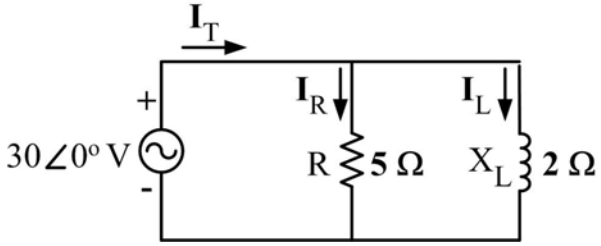
٢□٣١	$\mathbf{Y_T = Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_N}$

ووحدة السماحية هي Siemens (ورمزها S) أما شكلها العام فهو

٢□٣٢	$\mathbf{Y_T = G_T + j\, B_T}$

والجزء الحقيقي G_T يسمى المواصلة (مقلوب المقاومة) وهي موجبة، أما الجزء التخيلي X_T فيسمى التقبلية ويمكن أن تكون موجبة (تقبلية سعوية) أو سالبة (تقبلية حثية).

مثال ٢□١١ : في دائرة التوازي الموضحة في الشكل ٢٢-٢، احسب السماحية المكافئة وارسم شكلها، ثم احسب التيار الكلي وارسم الشكل المطاور للتيارات والجهد المؤثر.



الشكل ٢٢□٢

الحل :

$$\mathbf{Y}_T = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} = \frac{1}{5} + \frac{1}{j2} = 0.2 - j0.5 \text{ S} = 0.54\angle -68.2^\circ \text{ S}$$

$$\mathbf{Z}_T = \frac{1}{\mathbf{Y}_T} = \frac{1}{0.54\angle -68.2^\circ} = 1.9\angle 68.2^\circ \ \Omega$$

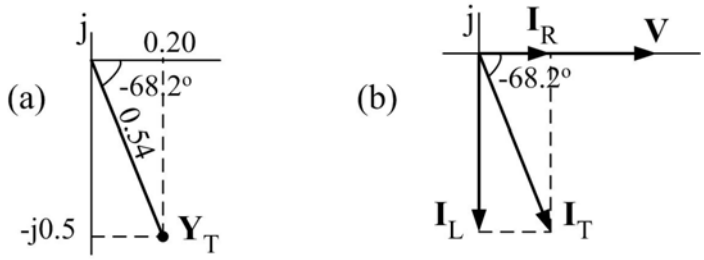
ويبين الشكل a٢٣-٢ شكل السماحية.

$$\mathbf{I}_T = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \mathbf{Y}_T\mathbf{V} = 0.54\angle -68.2^\circ \times 30\angle 0^\circ = 16.2\angle -68.2^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{V}}{R} = \frac{30\angle 0^\circ}{5} = 6\angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_L = \frac{\mathbf{V}}{jX_L} = \frac{30\angle 0^\circ}{2\angle 90^\circ} = 15\angle -90^\circ \text{ A}$$

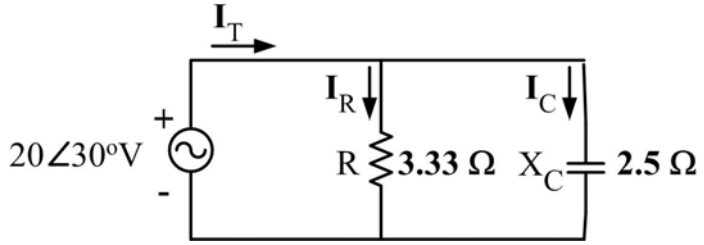
ويوضح الشكل b٢٣□٢ الشكل المطاور للتيارات والجهد المؤثر



الشكل ٢٣□٢

وكما نرى فإن التيار الكلي يتخلف عن الجهد وذلك لأن الحمل مادي - حثي

مثال ١٢□٢ : ارسم شكل السماحية والشكل المطاور للتيارات والجهد المؤثر لدائرة التوازي الموضحة في الشكل ٢٤-٢.



الشكل ٢٤□٢

الحل :

$$\mathbf{Y}_T = \frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_C} = \frac{1}{3.33} + \frac{1}{-j2.5} = 0.3 + j0.4 \text{ S} = 0.5\angle 53.1^\circ \text{ S}$$

$$\mathbf{Z}_T = \frac{1}{\mathbf{Y}_T} = \frac{1}{0.5\angle 53.1^\circ} = 2\angle -53.1^\circ \ \Omega$$

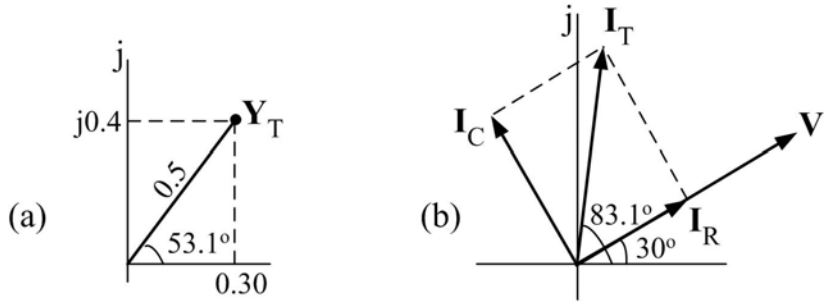
ويبين الشكل a٢٥-٢ شكل السماحية.

$$\mathbf{I}_T = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \mathbf{Y}_T\mathbf{V} = 0.5\angle 53.1^\circ \times 20\angle 30^\circ = 10\angle 83.1^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{V}}{R} = \frac{20\angle 30^\circ}{3.33} = 6\angle 30^\circ \text{ A}$$

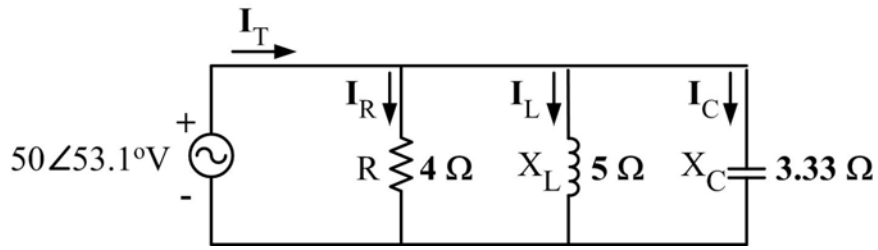
$$\mathbf{I}_C = \frac{\mathbf{V}}{-jX_C} = \frac{20\angle 30^\circ}{2.5\angle -90^\circ} = 8\angle 120^\circ \text{ A}$$

ويوضح الشكل b٢٥□٢ الشكل المطاور للتيارات والجهد المؤثر، ونلاحظ أن التيار يتقدم على الجهد.



الشكل ٢٥□٢

مثال ١٣□٢ : في دائرة التوازي الموضحة في الشكل ٢٦-٢ احسب السماحية المكافئة $\mathbf{Y}_T$ والتيار الكلي $\mathbf{I}_T$ وبين أن مجموع التيارات $\mathbf{I}_R$ و $\mathbf{I}_L$ و $\mathbf{I}_C$ يساوي $\mathbf{I}_T$ ، ثم ارسم شكل السماحية والشكل المطاور.



الشكل ٢٦□٢

الحل:

$$\mathbf{Y_T} = \mathbf{Y_R} + \mathbf{Y_L} + \mathbf{Y_C} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} + \frac{1}{-jX_C} = \frac{1}{4} + \frac{1}{j5} + \frac{1}{-j3.33}$$

$$= 0.25 + j0.1\ \text{S} = 0.27 \angle 21.8^\circ\ \text{S}$$

$\mathbf{Z_T} = ١ / \mathbf{Y_T} = ٣{,}٧ \angle -٢١{,}٨^\circ\ \Omega$

$\mathbf{I_T} = \mathbf{Y_T}\,\mathbf{V} = ٠{,}٢٧ \angle ٢١{,}٨^\circ \times ٥٠ \angle ٥٣{,}١^\circ = ١٣{,}٥ \angle ٧٤{,}٩^\circ\ \text{A}$

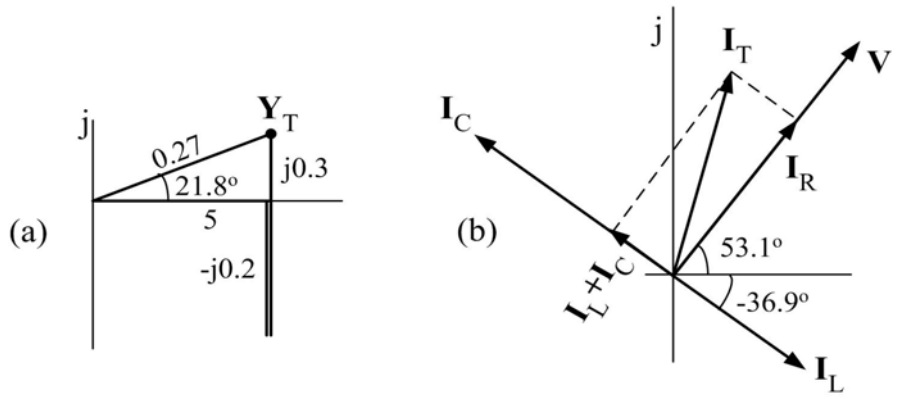
$\mathbf{I_R} = \mathbf{V} / R = ٥٠ \angle ٥٣{,}١^\circ / ٤ = ١٢{,}٥ \angle ٥٣{,}١^\circ\ \text{A}$

$\mathbf{I_L} = \mathbf{V} / jX_L = ٥٠ \angle ٥٣{,}١^\circ / ٥ \angle ٩٠^\circ = ١٠ \angle -٣٦{,}٩^\circ\ \text{A}$

$\mathbf{I_C} = \mathbf{V} / -jX_C = ٥٠ \angle ٥٣{,}١^\circ / ٣{,}٣٣ \angle -٩٠^\circ = ١٥ \angle ١٤٣{,}١^\circ\ \text{A}$

$\mathbf{I_R} + \mathbf{I_L} + \mathbf{I_C} = (٧{,}٥ + j\ ١٠) + (٨ - j\ ٦) + (-١٢ + j\ ٩) = ٣{,}٥ + j\ ١٣\ \text{A} = \mathbf{I_T}$

ويبين الشكل ٢-٢٧a شكل السماحية، كما يبين الشكل ٢-٢٧b الشكل المطاور.



الشكل ٢-٢٧

وكما نرى فإن التيار الكلي يتقدم على الجهد المؤثر، مما يدل على أن الحمل الكلي مادي – سعوي.

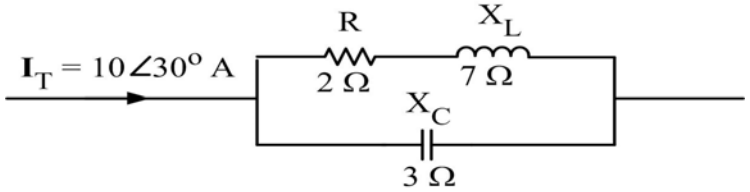
قانون توزيع التيار

يتوزع التيار في المعاوقتين $\mathbf{Z_1}$ و $\mathbf{Z_2}$ على التوازي حسب القانونين

$\mathbf{I_1} = \frac{\mathbf{Z_2}\,\mathbf{I_T}}{\mathbf{Z_1} + \mathbf{Z_2}}\ ,\ \mathbf{I_2} = \frac{\mathbf{Z_1}\,\mathbf{I_T}}{\mathbf{Z_1} + \mathbf{Z_2}}$	٢-٣٣

حيث $\mathbf{I_T}$ هو التيار الكلي الذي يتفرع في المعاوقتين.

مثال ١٤□٢ : احسب التيار في كل فرع في الشكل ٢٨□٢ ، وذلك باستعمال قانون توزيع التيار.



الشكل ٢٨□٢

الحل:

$$\mathbf{I}_{RL} = \frac{-jX_C\,\mathbf{I}_T}{(R+jX_L)-jX_C} = \frac{3\angle -90^\circ \times 10\angle 30^\circ}{2+j7-j3} = \frac{30\angle -60^\circ}{4.47\angle 63.4^\circ} = 6.71\angle 3.4^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_C = \frac{(R+jX_L)\,\mathbf{I}_T}{(R+jX_L)-jX_C} = \frac{(2+j7)\,10\angle 30^\circ}{4.47\angle 63.4^\circ} = \frac{7.28\angle 74.1^\circ \times 30\angle -60^\circ}{4.47\angle 63.4^\circ} = 48.86\angle -49.3^\circ \text{ A}$$

التوصيل توالي – توازي

كثير من الدوائر الكهربائية لاتحتوي على عناصر مربوطة على التوالي فقط أو على التوازي فقط، وإنما تتكون من فروع بعضها على التوالي وبعضها على التوازي. وتبين الأمثلة التالية الخطوات المستعملة لتحليل مثل هذه الدوائر.

مثال ١٥□٢: في الدائرة الموضحة في الشكل ٢٩□٢ ، احسب مايلي:

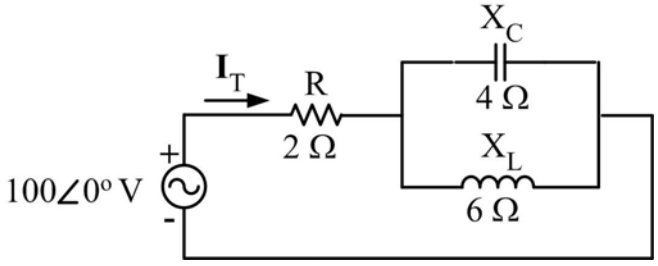
أ - المعاوقة المكافئة $\mathbf{Z}_T$؛

ب - التيار الكلي $\mathbf{I}_T$؛

ج - التيار في الملف $\mathbf{I}_L$؛

د - الجهد بين طرفي المقاومة $\mathbf{V}_R$؛

ه - الجهد بين طرفي المكثفة $\mathbf{V}_C$.



الشكل ٢٩□٢

الحل :

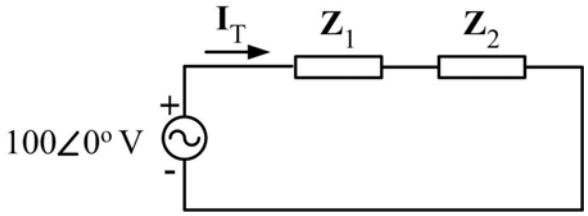
أ - لتسهيل حساب المعاوقة المكافئة أعيد رسم الدائرة كما في الشكل ٣٠□٢، حيث

$$\mathbf{Z}_1 = \mathrm{R} = 2\Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{(\mathrm{jX_L})(-\mathrm{jX_C})}{(\mathrm{jX_L})+(-\mathrm{jX_C})} = \frac{(6\angle 90^\circ)(4\angle -90^\circ)}{\mathrm{j6-j4}} = -\mathrm{j12}\Omega = 12\angle -90^\circ\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_T = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 = 2 - \mathrm{j12}\ \Omega = 12.17\angle -80.5^\circ\ \Omega$$

نستنتج أن الحمل مادي - سعوي



الشكل ٣٠-٢

ب -

$$\mathbf{I}_T = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \frac{100\angle 0^\circ}{12.17\angle -80.5^\circ} = 8.22\angle 80.5^\circ\ \mathrm{A}$$

ج - لحساب التيار في الملف نستعمل قانون توزيع التيار :

$$\mathbf{I}_L = \frac{(\mathrm{-jX_C})\mathbf{I}_T}{(\mathrm{-jX_C})+(\mathrm{jX_L})} = \frac{(4\angle -90^\circ)(8.22\angle 80.5^\circ)}{2\angle 90^\circ} = 16.44\angle 99.5^\circ\ \mathrm{A}$$

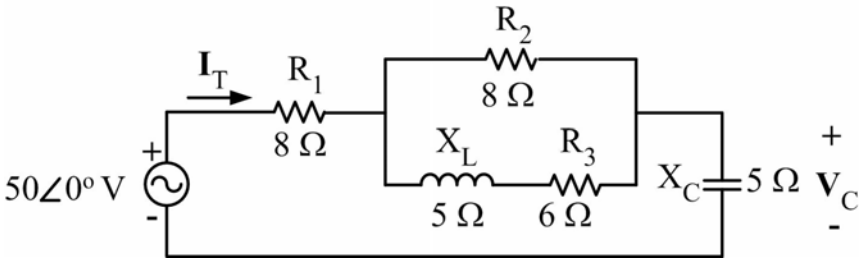
د - $\mathbf{V}_R = \mathrm{R}\,\mathbf{I}_T = 2 \times 8.22\angle 80.5^\circ = 16.44\angle 80.5^\circ\ \mathrm{V}$

ه - $\mathbf{V}_C = \mathbf{Z}_2\,\mathbf{I}_T = 12 \times \angle -90^\circ \times 8.22\angle 80.5^\circ = 98.64\angle -9.5^\circ\ \mathrm{V}$

مثال ١٦□٢ : : في الدائرة الموضحة في الشكل ٣١-٢، احسب مايلي:

أ - الجهد بين طرفي المكثفة $\mathbf{V}_C$ باستعمال قانون توزيع الجهد .

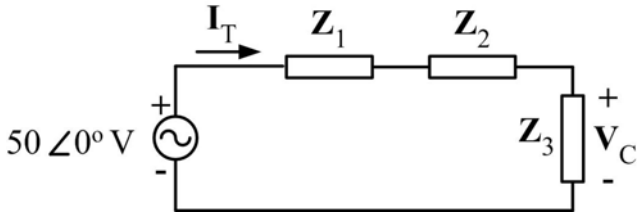
ب - التيار الكلي $\mathbf{I}_T$.



الشكل ٣١-٢

الحل :

أ - لتسهيل حساب الجهد $\mathbf{V}_C$ أعيد رسم الدائرة كما في الشكل ٣٢-٢ ، حيث



الشكل ٣٢-٢

$$\mathbf{Z}_1 = R_1 = 8\Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{R_2(R_3 + jX_L)}{R_2 + (R_3 + jX_L)} = \frac{8(6+j5)}{8+(6+j5)} = \frac{62.48\angle 39.8^\circ}{14.87\angle 19.7^\circ} = 4.2\angle 20.1^\circ\ \Omega = 3.94 + j1.44\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_3 = -jX_C = -j5\ \Omega$$

وباستعمال قانون توزيع الجهد نحسب الجهد

$$\mathbf{V}_C = \frac{\mathbf{Z}_3\,\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3} = \frac{(5\angle -90^\circ)(50\angle 0^\circ)}{(8)+(3.94+j1.44)+(-j5)} = \frac{250\angle -90^\circ}{12.46\angle -16.6^\circ} = 20.06\angle -73.4^\circ\ \text{V}$$

ب -

$$\mathbf{I}_T = \frac{\mathbf{V}_C}{-jX_C} = \frac{20.06\angle -73.4^\circ}{5\angle -90^\circ} = 4.01\angle 16.6^\circ\ \text{A}$$

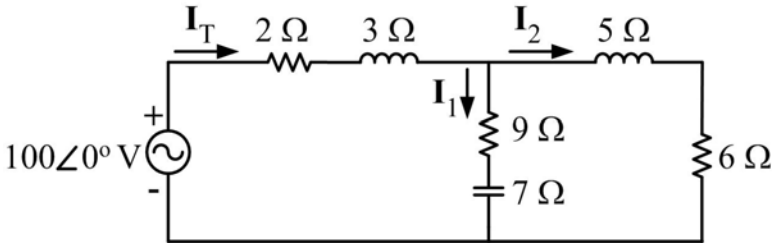
مثال ١٧-٣: في الدائرة الموضحة في الشكل ٣٣-٢ ، احسب مايلي:

أ - المعاوقة المكافئة $\mathbf{Z}_T$؛

ب - التيار الكلي $\mathbf{I}_T$؛

ج - التيار في المعاوقة المادية-السعوية $\mathbf{I}_1$؛

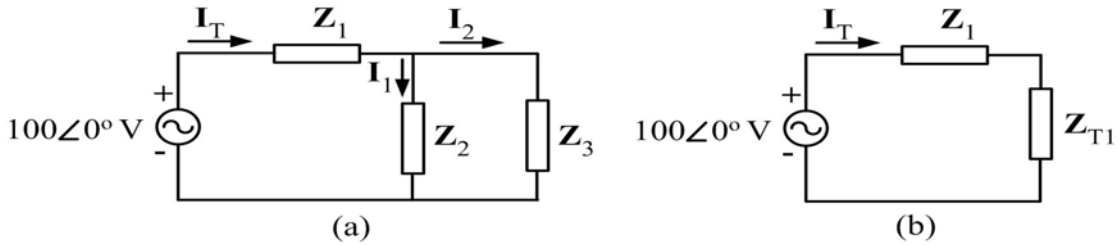
د - التيار في المعاوقة المادية-الحثية $\mathbf{I}_2$.



الشكل ٣٣-٢

الحل :

نعيد رسم الدائرة كما في الشكلين ٣٤a-٢ و ٣٤b-٢، حيث:



الشكل ٣٤-٢

$$\mathbf{Z}_1 = 2 + j3\ \Omega = 3.61\angle 56.3^\circ\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_2 = 9 - j7\ \Omega = 11.4\angle -37.9^\circ\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_3 = 6 + j5\ \Omega = 7.81\angle 39.8^\circ\ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{T1} = \frac{\mathbf{Z}_2\,\mathbf{Z}_3}{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3} = \frac{(11.4\angle -37.9^\circ)(7.81\angle 39.8^\circ)}{(9-j7)+(6+j5)} = \frac{80.94\angle 1.9^\circ}{15.13\angle -7.6^\circ}$$

$$= 5.35\angle 9.5^\circ\ \Omega = 5.28 + j0.88\ \Omega$$

أ - $$\mathbf{Z}_T = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_{T1} = 2 + j3 + 5.28 + j0.88 = 7.28 + j3.88\ \Omega = 8.25\angle 28.1^\circ\ \Omega$$

ب - $$\mathbf{I}_T = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_T} = \frac{100\angle 0^\circ}{8.25\angle 28.1^\circ} = 12.12\angle -28.1^\circ\ \text{A}$$

ج - نستعمل قانون توزيع التيار لحساب التيار $\mathbf{I}_1$

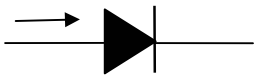
$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{Z}_3\,\mathbf{I}_T}{\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3} = \frac{(7.8\angle 39.8^\circ)(12.12\angle -28.1^\circ)}{(9-j7)+(6+j5)} = \frac{94.536\angle 11.7^\circ}{15.13\angle -7.6^\circ} = 6.25\angle 19.3^\circ\ \text{A}$$

د - نستعمل قانون كيرشوف للتيار لحساب التيار $\mathbf{I}_2$

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_T - \mathbf{I}_1 = (10.69 - j5.71) - (5.9 + j2.07) = 9.14 \angle -58.4^\circ \text{ A}$$

دوائر مقومات التيار المتردد البسيطة

تشتغل معظم الأجهزة الإلكترونية وكثير من الأجهزة الكهربائية بالتيار المستمر، ولتوفير القدرة لهذه الأجهزة عبر شبكات التوزيع ذات التيار المتردد نحتاج إلى مقومات (وتسمى كذلك موحدات) لتحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر. وتستعمل المقومات الديودات (diodes) وهي أجهزة إلكترونية مصنوعة من أشباه الموصلات (السيليكون غالبا) لاتسمح بمرور التيار إلا في اتجاه واحد، ونسمي قطب الديود الذي يدخل منه التيار المصعد (anode)، كما نسمي القطب الآخر (الذي يخرج منه التيار) المهبط (cathode). ويبين الشكل ٣٥□٢ رمز الديود كما يوضح السهم في الشكل الإتجاه المسموح به للتيار.

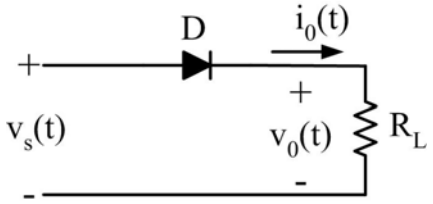


الشكل ٣٥□٢: رمز

فيما يلي سندرس بإيجاز نوعين مشهورين من هذه المقومات.

مقوم نصف موجة

يوضح الشكل ٣٦□٢ دائرة المقوم نصف موجة، وهي تتكون من مصدر تيار متردد (محول غالبا) وديود D وحمل مكون من مقاومة مادية R_L. وبما أن التيار لا يمر في الديود إلا عندما يكون الجهد بين مصعدها ومهبطها موجبا ، فإن أشكال موجات التيار المار في الحمل المادي i. والجهد بين طرفيه v. تكون كما في الشكل ٣٧□٢، كما يبين نفس الشكل موجة جهد المصدر v_S.



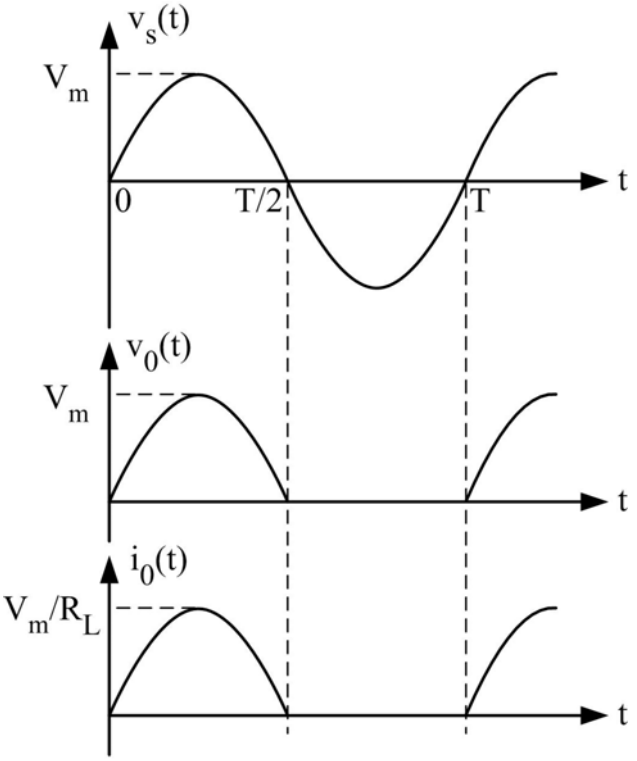
الشكل ٣٦□٢: دائرة المقوم نصف موجة

وكما نلاحظ فإن الجهد بين طرفي الحمل يتغير مع الزمن ولكن قطبيته ثابته، أما قيمته المتوسطة (الجهد المستمر) فإنها تحسب باستعمال المعادلة ٥□٢

$V_0 = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} V_m \sin\omega t\, dt = \frac{V_m}{\pi} = 0.318 V_m$	٢-٣٤

حيث V_m هي القيمة القصوى لجهد المصدر. أما القيمة المتوسطة لتيار الحمل فهي

$I_0 = 0.318\,\frac{V_m}{R_L} = 0.318 I_m$	٢-٣٥



الشكل ٣٧□٢: الأشكال الموجية لدائرة المقوم نصف موجة

يتميز المقوم نصف الموجة بالبساطة حيث لايستعمل إلا ديود واحدة، ولكن قيمة جهد الحمل المستمر صغيرة مقارنة بالقيمة القصوى لجهد المصدر، وهذا راجع إلى كون المقوم لا يستغل إلا نصف الموجة الموجب لجهد المصدر.

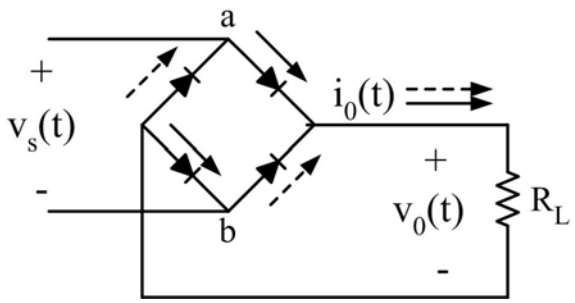
قنطرة التقويم الموجي الكامل

يبين الشكل ٣٨□٢ دائرة قنطرة التقويم الموجي الكامل، وتدل الأسهم ذات الخط المتواصل على اتجاه تيار الحمل عندما يكون الجهد موجبا في النقطة a بينما تدل الأسهم ذات الخط المتقطع على اتجاه التيار عندما يكون الجهد موجبا في النقطة b. وكما نرى فإن هذا المقوم أكثر تعقيدا من المقوم نصف

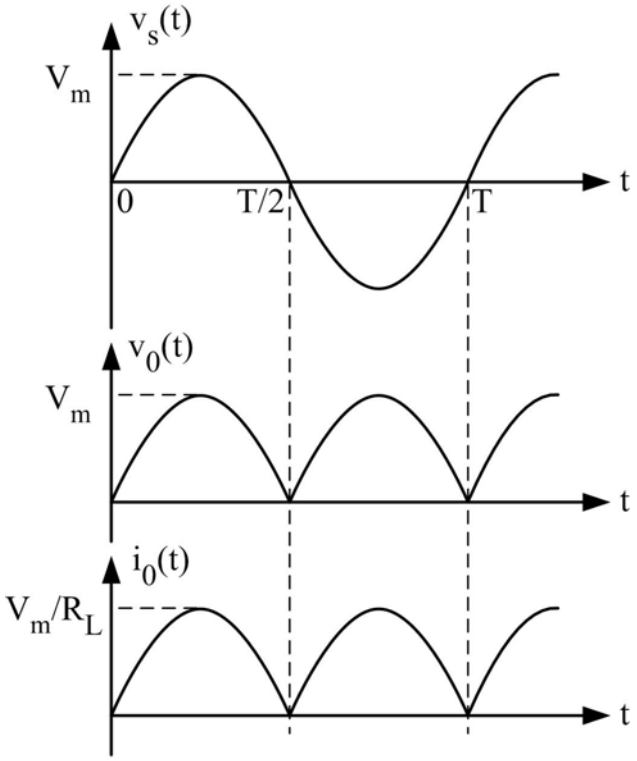
الموجه، حيث يستعمل أربعة ديودات على شكل قنطرة، ولكنه يستغل موجة جهد المصدر كلها مما يؤدي إلى الحصول على جهد مستمر ذي قيمة أعلى. ويوضح الشكل ٣٩□٢ الأشكال الموجية لجهدي المصدر والحمل ولتيار الحمل.

وتعطى القيم المتوسطة لجهد وتيار الحمل بالمعادلاتين

$V_0 = \frac{1}{T}\int_0^T V_m \sin\omega t \, dt = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m$	٢-٣٦
$I_0 = 0.636\,\frac{V_m}{R_L} = 0.636I_m$	٢-٣٧



الشكل ٣٨□٢: دائرة قنطرة التقويم الموجي الكامل



الشكل ٣٩□٢: الأشكال الموجية لدائرة قنطرة التقويم الموجي

الفصل الثالث

القدرة الكهربائية للتيار المتردد

عندما نغذي حملا معاوقته $\mathbf{Z} = Z\angle\theta$ بالجهد

$v(t)=V_m \sin\omega t = V\sqrt{2}\sin\omega t$	

فإن التيار

$i(t)=I_m \sin(\omega t-\theta)=I\sqrt{2}\sin(\omega t-\theta)$	

سيمر في هذا الحمل. وفي اللحظة t فإن القدرة الداخلة في الحمل هي

$p(t)=v(t)i(t)$	٢-٣٨

وتسمى القدرة اللحظية للحمل. وتكون هذه القدرة موجبة عندما تكون إشارة التيار تساوي إشارة الجهد، وفي هذه الحالة نقول أن الحمل يستهلك تلك القدرة. أما إذا اختلفت الإشارتان فإن القدرة تكون سالبة، وهنا يصبح 'الحمل' مصدرا للقدرة.

وبتعويض قيميي الجهد والتيار وبعد حسابات طفيفة نجد

$p(t)=VI\cos\theta - VI\cos\theta\cos 2\omega t + VI\sin\theta\sin 2\omega t$	٢-٣٩

وكما نلاحظ فإن القدرة اللحظية تتركب من ثلاثة أجزاء : جزء ثابت ويمثل القيمة المتوسطة، وجزءان يتذبذبان بتردد يساوي ضعف تردد الجهد (والتيار).

أما الشغل الكهربائي الذي يبذل في الحمل بين الفترتين الزمنيتين t_1 و t_2 فهو

$W=\int_{t_1}^{t_2} p(t)\,dt$	٢-٤٠

ووحدته الجول (Joule ورمزه J).

وفيما يلي تفاصيل لأنواع القدرة المستعملة في دوائر التيار المتردد.

القدرة الفعالة

نلاحظ أن القيمة المتوسطة للقدرة اللحظية هي

$P=\frac{1}{T}\int_0^T p(t)\,dt = VI\cos\theta$	٢-٤١

و نسميها القدرة الفعالة أو الحقيقية للحمل، وهي القدرة التي يستهلكها الحمل فعليا (التي تتحول إلى حرارة في مقاومة مثلا)، ووحدتها الواط (Watt ورمزه W).

ففي حالة حمل مادي مقاومته R فإن الجهد و التيار لهما نفس الطور وتكون الزاوية $\theta=0$ وبهذا فإن القدرة اللحظية تصبح

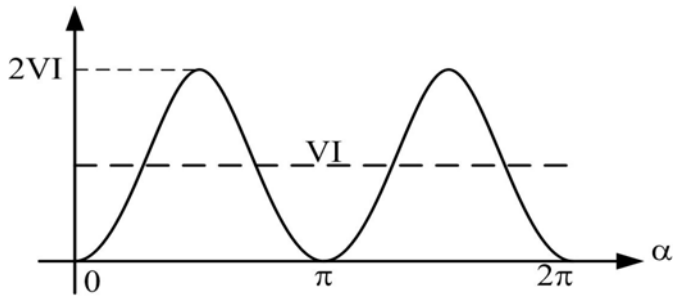
$p_R(t) = VI - VI\cos 2\omega t$	٢-٤٢

وهي مبينة في الشكل٤٠-٢. نلاحظ أن هذه القدرة موجبة في كل لحظة وهي متذبذبة حول قيمتها المتوسطة

$P = VI = RI^2 = V^2/R$	٢-٤٣

بتردد $2f$ حيث f هو تردد الجهد (والتيار). وهذا يعني أن الحمل المادي يستهلك كل القدرة التي تأتيه من المصدر. أما الشغل الكهربائي المستهلك في المقاومة خلال دورة تيار كاملة فهو

$W_R = \int_0^T p_R(t)\,dt = VIT = RI^2T = (V^2/R)T$	٢-٤٤



الشكل ٤٠-٢ : القدرة اللحظية في مقاومة

أما في حالة حمل حثي (سعوي) فإن الجهد يتقدم (يتأخر) على التيار بزاوية $\theta=90^o$ وبهذا فإن القدرة الفعالة تساوي الصفر، وعليه فإن كلا من الحمل الحثي والحمل السعوي لا يستهلكان أي قدرة فعليا وإنما يستعيرانها كما سنرى فيما بعد.

القدرة الظاهرية ومعامل القدرة

القدرة الظاهرية S في حمل معاوقته Z هي حاصل ضرب القيمة الفعالة للتيار المار في هذا الحمل والقيمة الفعالة للجهد بين طرفيه، ووحدتها الفولط إمبير (VA)، أي

$S = V\,I = Z\,I^2 = V^2 / Z$	٢-٤٥

ورغم أنها ليست هي القدرة المستهلكة فعليا في كل الحالات إلا أنها مهمة في تحديد القدرة القصوى (المتوفرة عندتيار وجهد معينين) لعدد من الأجهزة كالمحولات مثلا.

ومن المعادلتين ٢-٤١ و ٢-٤٥ نرى أن العلاقة بين القدرتين الظاهرية والفعالة هي

$P = S\cos\theta$	٢-٤٦

ونسمي النسبة

$\cos\theta = \frac{P}{S}$	٢-٤٧

معامل القدرة، لأنه يعطي نسبة القدرة المتوفرة التي تستهلك فعليا من طرف الحمل. فبالنسبة للحمل الذي على شكل مقاومة فإن $\theta=0$، وبهذا فإن كل القدرة الظاهرية الداخلة في المقاومة ستستهلك فعليا (تحول إلى حرارة). أما بالنسبة لحمل حثي أو سعوي فإن $\cos\theta=0$ ولن يستهلك هذا النوع من الأحمال أي جزء من القدرة الظاهرية فعليا.

وكلما كان معامل القدرة قريبا من الواحد، كلما كان استعمال القدرة المتوفرة أحسن. وفي الحالات التي يكون فيها هذا المعامل صغيرا، نلجأ إلى تحسينه أي الرفع من قيمته.

القدرة غير الفعالة

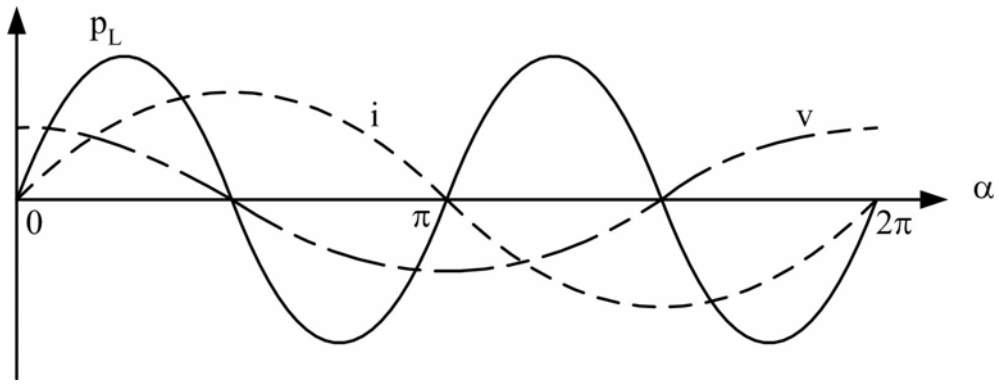
في حالة حمل حثي (ملف) نعوض الزاوية θ بـ 90^o في المعادلة ٢-٣٩، وبهذا تصبح القدرة اللحظية

$p_L(t) = V\,I\sin 2\omega t$	٢-٤٨

وكما نرى فإنها متذبذبة بتردد يساوي ضعف تردد التيار وبقيمة قصوى تساوي القدرة الظاهرية، كما أن قيمتها المتوسطة معدومة.

ويبين الشكل ٢-٤١ كلا من القدرة p_L وموجات الجهد والتيار في الحمل الحثي. وهنا فإن الحمل يستعير القدرة الظاهرية VI من المصدر (p_L موجبة) عندما تتساوى إشارة الجهد مع إشارة التيار، وعندئذ فإن الملف يحول طاقة المصدر إلى طاقة مغناطيسية تتخزن في مجاله المغناطيسي. وعندما تختلف إشارة الجهد

مع إشارة التيار فإن الطاقة المغناطيسية تتحول إلى طاقة كهربائية وترجع إلى المصدر. وهكذا فلن يستهلك الملف أي قدرة.



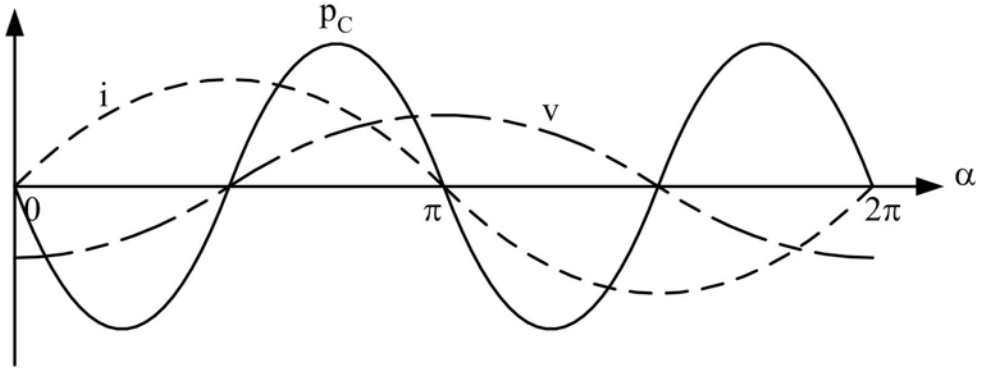
الشكل ٤١-٢ : القدرة اللحظية و الجهد والتيار في ملف

وفي حالة حمل سعوي (مكثفة) فإننا نعوض الزاوية θ بـ ٩٠° في المعادلة ٣٩-٢، وهكذا تصبح القدرة اللحظية

٤٩-٢	$p_C(t) = -V I \sin 2\omega t$

وكما نرى فإنها متذبذبة بتردد يساوي ضعف تردد التيار وبقيمة قصوى تساوي القدرة الظاهرية، كما أن قيمتها المتوسطة معدومة.

ويبين الشكل ٤٢-٢ كلا من القدرة p_C وموجات الجهد والتيار في الحمل السعوي. وهنا كذلك فإن الحمل يستعير القدرة الظاهرية VI من المصدر (p_C موجبة) عندما تتساوى إشارة الجهد وإشارة التيار، وعندئذ فإن المكثفة تخزن طاقة المصدر في مجالها الكهروستاتيكي. وعندما تختلف إشارة الجهد مع إشارة التيار فإن الطاقة المخزنة تسترجع إلى المصدر. وهكذا فلن تستهلك المكثفة أي قدرة.



الشكل ٤٢-٢ : القدرة اللحظية و الجهد والتيار في مكثفة

وعلى العموم نعرف القدرة غير الفعالة أو المفاعلة Q في أي حمل معاوقته $\mathbf{Z} = Z\angle\theta$ بالمعادلة

$Q = V\ I \sin\theta$	٢-٥٠

ووحدتها الفولط-إمبير مفاعل (volt-ampere reactive ورمزه VAR) وهي نسبة القدرة الظاهرية التي تستعار من طرف الحمل لإحداث مجال مغناطيسي (ملف) أو مجال كهروستاتيكي (مكثفة).

ففي ملف ممانعته X_L ، فإننا نرمز للقدرة المفاعلة التي يستعيرها بالرمز Q_L وهي تساوي

$Q_L = V\ I = X_L\ I^2 = V^2 / X_L$	٢-٥١

وكما نرى فإنها موجبة، ولهذا نقول أن الملف "يستهلك" القدرة المفاعلة.

وفي مكثفة ممانعتها X_C، فإننا نرمز للقدرة المفاعلة التي تستعيرها بالرمز Q_C وهي تساوي

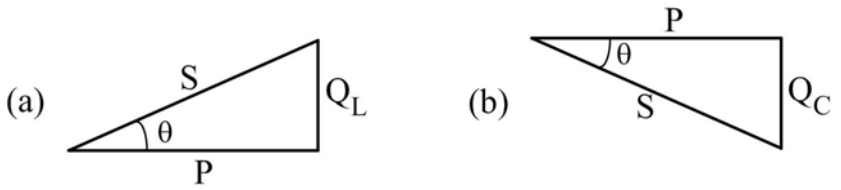
$Q_C = -V\ I = -X_C\ I^2 = -V^2 / X_C$	٢-٥٢

وهي سالبة، ولهذا السبب نقول أن المكثفة "تولد" القدرة المفاعلة.

مثلث القدرة

نستطيع تمثيل العلاقة بين أنواع القدرة الثلاثية باستعمال مثلث القدرة. فلو رسمنا مثلثا قائما تساوي قاعدته القدرة الفعالة، ويساوي ارتفاعه القدرة غير الفعالة، فإن الوتر سيساوي القدرة الظاهرية وذلك حسب المعادلات ٢-٤١ و ٢-٤٥ و ٢-٥٠.

ويبين الشكلان ٢-٤٣a و ٢-٤٣b مثلثي القدرة في حالة حمل مادي-حثي و في حالة حمل مادي-سعوي. وإذا كان الحمل يحتوي على مقاومة وملف ومكثفة فإن القدرة غير الفعالة Q تساوي مجموع Q_L و Q_C، حيث Q_L هي القدرة المفاعلة للملف و Q_C هي القدرة المفاعلة للمكثفة. فإذا كانت القدرة الأولى أكبر فإن Q تكون موجبة ويظهر الحمل كأنه مادي-حثي، وإذا كان العكس فإن الحمل يظهر كأنه مادي-سعوي. أما إذا تساوت Q_L و Q_C فإن الحمل يصبح مادي بحت .



الشكل ٢-٤٣ : مثلث القدرة في حمل مادي-حثي (a)، وفي حمل مادي-سعوي (b)

ونستطيع استعمال العلاقة

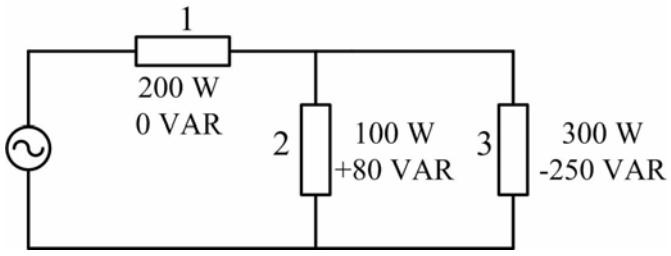
٢-٥٣	$S^2 = P^2 + Q^2$

لحساب إحدى القدرات عندما تكون القدرتان الأخرتان معلومتين.

في دائرة كهربائية مكونة من عدة عناصر نحسب القدرات الكلية و معامل القدرة الكلي حسب الطريقة الآتية:

- تساوي القدرة الفعالة الكلية P_T مجموع القدرات الفعالة لكل عنصر؛
- تساوي القدرة المفاعلة الكلية Q_T مجموع القدرات المفاعلة لكل عنصر؛
- تعطى القدرة الظاهرية الكلية S_T بالمعادلة $S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$. نلاحظ هنا أن القدرة الظاهرية الكلية لا تساوي مجموع القدرات الظاهرية لكل عنصر، فلننتبه لهذا.
- معامل القدرة الكلي هو : $\cos\theta_T = P_T / S_T$

مثال ١٨-٢: احسب القدرات الفعالة والمفاعلة والظاهرية الكلية وكذلك معامل القدرة الكلي للدائرة المبينة في الشكل ٤٤-٢، ثم ارسم مثلث القدرة. بين طبيعة كل حمل من الأحمال الثلاثة.



الشكل ٤٤-٢

الحل:

القدرة الفعالة الكلية: $P_T = P_1 + P_2 + P_3 = ٢٠٠ + ١٠٠ + ٣٠٠ = ٦٠٠ \text{ W}$

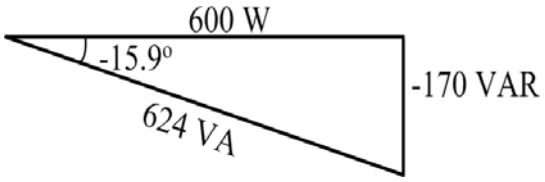
القدرة المفاعلة الكلية: $Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = ٠ + ٨٠ - ٢٥٠ = -١٧٠ \text{ VAR}$

نستنتج أن الحمل الكلي مادي- سعوي.

القدرة الظاهرية الكلية: $S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{(600)^2 + (-170)^2} = 624 \text{ VA}$

معامل القدرة الكلي : $\cos\theta_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{600}{624} = 0.96$

ويتقدم التيار الكلي على الجهد المؤثر بالزاوية $\theta_T = ١٥,٩^o$. ويبين الشكل ٤٥-٢ مثلث القدرة.



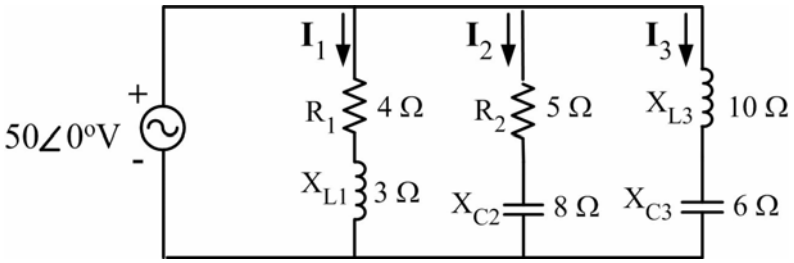
الشكل ٤٥-٢

طبيعة الأحمال: الحمل ١: مادي ، الحمل، ٢: مادي-حثي ، الحمل ٣: مادي-سعوي .

مثال ١٩□٢:

أ - احسب القدرات الفعالة والمفاعلة والظاهرية وكذلك معامل القدرة لكل فرع من فروع الدائرة المبينة في الشكل ٤٦-٢.

ب - احسب القدرات الفعالة والمفاعلة والظاهرية الكلية وكذلك معامل القدرة الكلي للدائرة.



الشكل ٤٦-٢

الحل:

أ -

الفرع ١:

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_1} = \frac{50\angle 0^\circ}{4+j3} = \frac{50\angle 0^\circ}{5\angle 36.9^\circ} = 10\angle -36.9^\circ \text{ A}$$

$$P_1 = R_1 I_1^2 = 4\times 10^2 = 400 \text{ W}$$

$$Q_1 = X_{L1} I_1^2 = 3\times 10^2 = 300 \text{ VAR}$$

$$S_1 = V I_1 = 50\times 10 = 500 \text{ VA}$$

$$\cos\theta_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{400}{500} = 0.8$$

الفرع ٢:

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_2} = \frac{50\angle 0^\circ}{5 - j8} = \frac{50\angle 0^\circ}{9.43\angle -58^\circ} = 5.3\angle 58^\circ \text{ A}$$

$$P_2 = R_2 I_2^2 = 5 \times 5.3^2 = 141 \text{W}$$

$$Q_2 = -X_{C2} I_2^2 = -8 \times 5.3^2 = -225 \text{VAR}$$

$$S_2 = V I_2 = 50 \times 5.3 = 265 \text{ VA}$$

$$\cos\theta_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{140.5}{265} = 0.53$$

الفرع ٣:

$$\mathbf{I}_3 = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}_3} = \frac{50\angle 0^\circ}{j10 - j6} = \frac{50\angle 0^\circ}{4\angle 90^\circ} = 12.5\angle -90^\circ \text{ A}$$

$$P_3 = 0 \text{W}$$

$$Q_3 = (X_{L3} - X_{C3})\, I_3^2 = (10 - 6)\, 12.5^2 = 625 \text{VAR}$$

$$S_3 = V I_3 = 50 \times 12.5 = 625 \text{VA}$$

$$\cos\theta_3 = \frac{P_3}{S_3} = 0$$

ب -

$$P_T = P_١ + P_٢ + P_٣ = ٤٠٠ + ١٤١ = ٥٤١ \text{ W}$$

$$Q_T = Q_١ + Q_٢ + Q_٣ = ٣٠٠ - ٢٢٥ + ٦٢٥ = ٧٠٠ \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{(541)^2 + (700)^2} = 885 \text{VA}$$

$$\cos\theta_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{541}{885} = 0.61$$

الفصل الرابع

دوائر التيار المتردد ثلاثي الأطوار

التيار المتردد الذي درسناه لحد الآن يعرف بالتيار أحادي الطور (أو أحادي الوجه). في الواقع معظم المولدات المستعملة في الشبكات تنتج التيار المتردد ثلاثي الأطوار (أو ثلاثي الأوجه)، وهو عبارة عن نظام ذي ثلاثة جهود (و تيارات) مرتبطة ببعضها البعض. ومن بين أسباب تفضيل هذا النظام كونه يسبب مفاقيد نحاس في خطوط النقل أقل من النظام أحادي الوجه وذلك لنفس القدرة المنقولة. ويكون النظام متماثلا (أو متزنا) عندما تتساوى فيه القيم الفعالة للجهود (والتيارات) الثلاثة وتتقدم زاوية جهد (وتيار) الطور الأول عن زاوية الثاني بـ 120° كما تتقدم هذه الأخيرة عن زاوية الثالث بنفس الزاوية 120°. والنظام المتماثل يؤدي إلى تشغيل مكونات الشبكة وأحمالها الثلاثية الأطوار بطريقة أحسن، ولهذا يتم تصميم الشبكات بحيث تكون في حالة قريبة من النظام المتماثل.

تمثيل التيار المتردد ثلاثي الأطوار

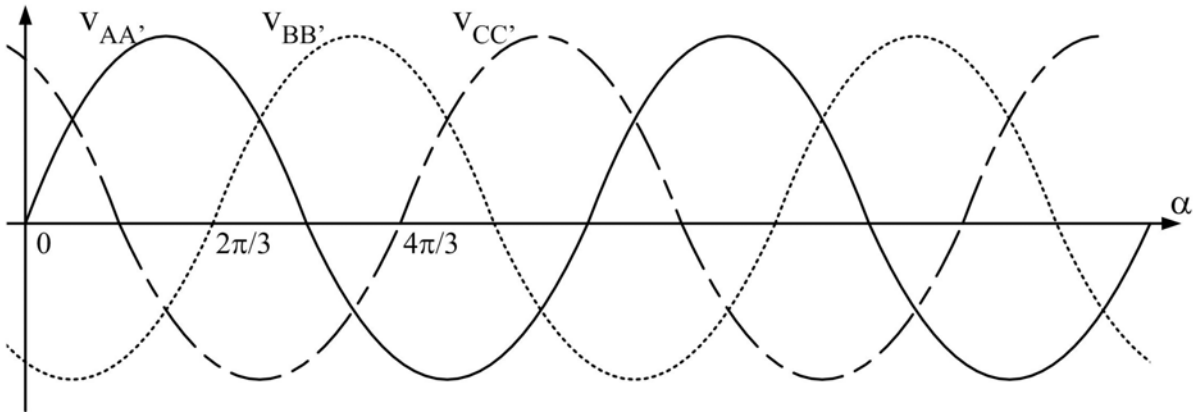
يحتوي مولد التيار ثلاثي الأوجه على ثلاثة ملفات متشابهة موضوعة بحيث تكون الزاوية بين محوري أي ملفين 120°. وتخضع هذه الملفات لمجال مغناطيسي دوار، وحسب قانون فاراداي فستتولد فيها قوى دافعة كهربائية أو جهود تأثيرية مترددة جيبية لها نفس التردد ونفس القيمة العظمى، وتختلف زوايا أطوارها بـ 120°. وتعطى هذه الجهود بالمعادلات

$v_{AA'} = V\sqrt{2}\sin\omega t$ $v_{BB'} = V\sqrt{2}\sin(\omega t - 120^\circ)$ $v_{CC'} = V\sqrt{2}\sin(\omega t - 240^\circ)$	٢-٥٤

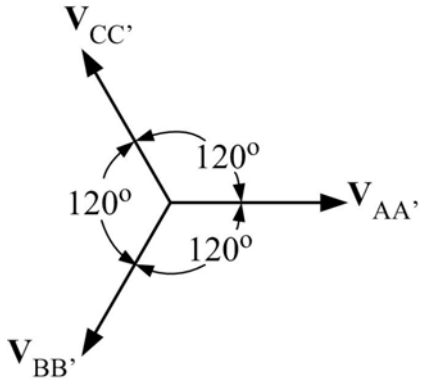
حيث A و 'A يمثلان طرفي الملف الأول (نفس الشيء بالنسبة لـ B و'B و C و'C)، و V هي القيمة الفعالة للجهود والتي تتساوى في الملفات الثلاثة. ويبين الشكل ٢□٤٧ موجات هذه الجهود، أما الشكل ٢□٤٨ فيبين الجهود المطاورة والتي تعطى بالمعادلات

$\mathbf{V}_{AA'} = V\angle 0^\circ$ $\mathbf{V}_{BB'} = V\angle -120^\circ$ $\mathbf{V}_{CC'} = V\angle -240^\circ = V\angle 120^\circ$	٢□٥٥

والأحمال المغذاة من طرف المولدات ثلاثية الأطوار تحتوي على ثلاثة فروع وتكون متزنة إذا تساوت معاوقات فروعها الثلاثة.



الشكل ٤٧-٢ : موجات جهود نظام ثلاثي الأطوار



الشكل ٤٨-٢ : الجهود المطاورة لنظام ثلاثي الأطوار

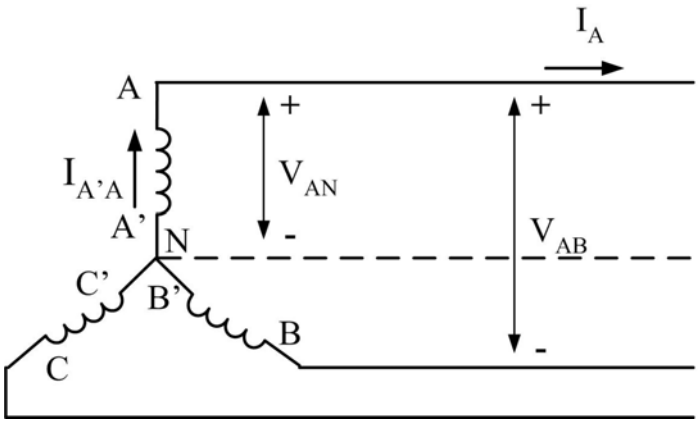
الترابط المتبادل بين الأطوار في توصيلات النجمة والدلتا

هناك طريقتان لتوصيل أطراف ملفات المولدات ببعضها البعض: توصيلة النجمة وتوصيلة الدلتا. وكلتا التوصيلتين تستعمل كذلك لربط الأحمال ثلاثية الأطوار. وفيما يلي ندرس تفاصيل التوصيلتين في حالة الإتزان.

مولد موصول بتوصيلة النجمة

في هذا النوع من التوصيلة نربط أطراف ملفات المولد 'A و 'B و 'C مع بعضها البعض، وتسمى النقطة الناتجة بالطرف المحايد أو المتعادل ويرمز لها بالرمز N (الشكل ٤٩-٢)، أما الأطراف A و B و

C فإنها توصل بالأحمال بموصلات تسمى الخطوط. ونسمي الجهد بين أي خط من الخطوط الثلاثة والحيادي بجهد الطور (مثلا الجهد v_{AN} بين الطور A و الحيادي والذي يساوي $v_{AA'}$ المعطى في المعادلة ٢-٥٤)، أما الجهد بين أي خطين فيعرف بجهد الخط (مثلا الجهد v_{AB} بين الطرف A والطرف B). ويسمى التيار المار في أحد ملفات المولد (مثلا $I_{A'A}$ المار في الملف AA') تيار الطور، كما يعرف التيار المار في أحد الخطوط (مثلا I_A المار في الخط الخارج من الطرف A) بتيار الخط. وهذه الجهود والتيارات مبينة في الشكل٤٩□٢، حيث لم نبين كل التيارات والجهود وذلك لتوضيح الشكل.



الشكل ٤٩-٢ : توصيلة النجمة في المولدات

وكما نرى فإن تيارات الأطوار تتساوى مع تيارات الخطوط، أما العلاقة بين جهود الأطوار وجهود الخطوط فنستنتجها كما يلي:

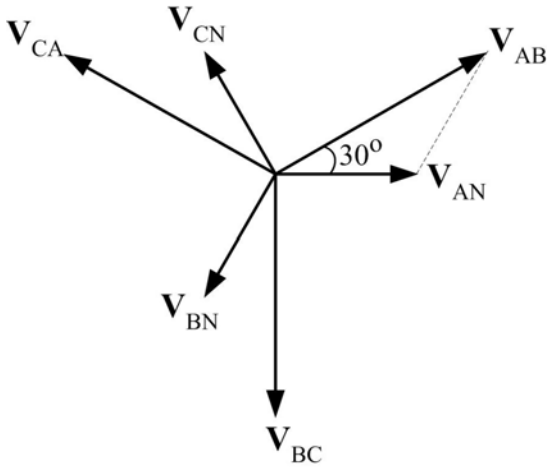
باستعمال المعادلات ٥٥-٢ نجد جهد الخط $\mathbf{V}_{AB}$

$\mathbf{V}_{AB} = \mathbf{V}_{AN} - \mathbf{V}_{BN}$ $= V\angle 0^\circ - V\angle -120^\circ$ $= V\sqrt{3}\ \angle 30^\circ$	٢□٥٦

وكما نلاحظ فإن القيمة الفعالة لجهد الخط V_L في توصيلة النجمة تساوي $\sqrt{3}$ مرة القيمة الفعالة لجهد الطور، أي

$V_L = V\sqrt{3}$	٢□٥٧

ويبين الشكل ٥٠-٢ الشكل المطاور لجهود الأطوار والخطوط، ونلاحظ أن زاوية أي من جهود الخط تختلف عن زاوية أي من جهود الطور. كما نلاحظ أن مجموع جهود الخط يساوي الصفر وكذلك مجموع جهود الطور.



الشكل ٢-٥٠ : الشكل المطاور لجهود الأطوار والخطوط

مولد موصول بتوصيلة الدلتا

كما هو موضح في الشكل ٢-٥١، عند ربط أطراف ملفات المولد A مع 'C و B مع 'A و C مع 'B، وربط الخطوط الخارجة بالأطراف A و B و C ، نحصل على توصيلة الدلتا. وعلى العكس من توصيلة النجمة، فإن في هذا النوع من التوصيلة لايوجد طرف محايد كما أنه يتساوى جهد الطور مع جهد الخط.

ولإيجاد العلاقة بين تيارات الأطوار وتيارات الخطوط نفترض ما يلي:

$\mathbf{I}_{AB} = I\angle 0^\circ$ $\mathbf{I}_{BC} = I\angle -120^\circ$ $\mathbf{I}_{CA} = I\angle -240^\circ = I\angle 120^\circ$	٢-٥٨

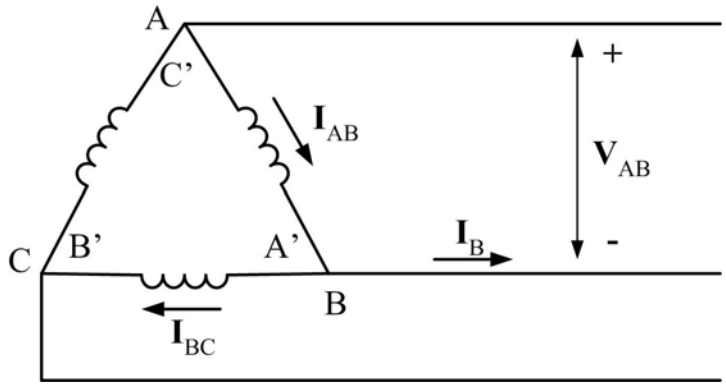
حيث I هي القيمة الفعالة لتيار الطور. وباستعمال قانون كيرشوف نحصل على المعادلة

$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_{AB} - \mathbf{I}_{BC}$ $= I\angle 0^\circ - I\angle -120^\circ$ $= I\sqrt{3}\ \angle 30^\circ$	٢-٥٩

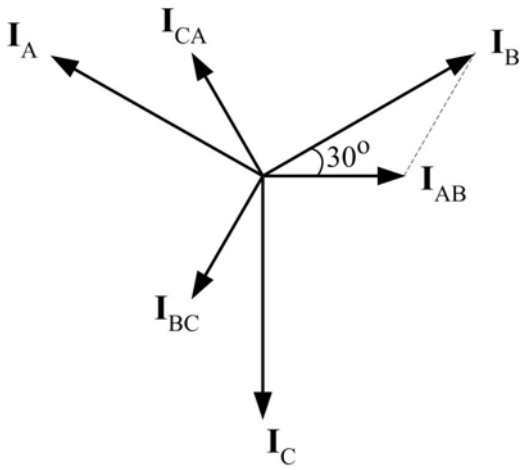
وكما نلاحظ فإن القيمة الفعالة لتيار الخط I_L تساوي $\sqrt{3}$ مرة القيمة الفعالة لتيار الطور، أي

$I_L = I\sqrt{3}$	٢-٦٠

ويبين الشكل ٢-٥٢ الشكل المطاور لتيارات الأطوار والخطوط، وهنا كذلك نلاحظ أن زاوية أي من تيارات الخط تختلف عن زاوية أي من تيارات الطور. كما نلاحظ أن مجموع تيارات الخط يساوي الصفر وكذلك مجموع تيارات الطور.



الشكل ٢-٥١ : توصيلة الدلتا في المولدات



الشكل ٢-٥٢ : الشكل المطاور لتيارات الأطوار والخطوط

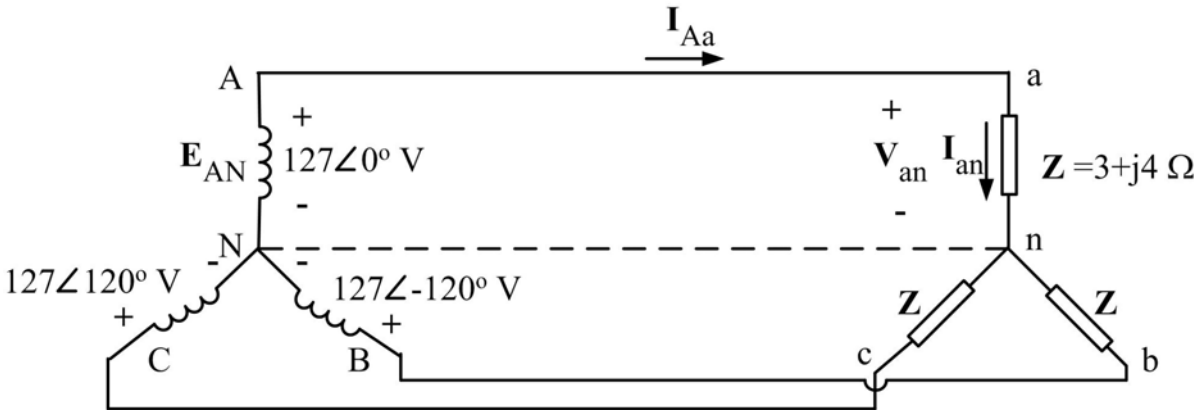
توصيلات الأحمال

نستطيع توصيل العناصر الثلاثة الممثلة للحمل على هيئة النجمة أو الدلتا. ولتحقيق الاتزان يجب أن تكون معاوقات الفروع الثلاثة متساوية. وفي توصيلة النجمة فإن التيار المار في الحيادي يكون معدوما في حالة الاتزان لأنه يساوي مجموع تيارات الخطوط، وهذه التيارات متساوية في القيمة الفعالة وتختلف زوايا أطوارها بـ^{o}١٢٠، أي

$\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C = 0$	٢-٦١

وبذلك يمكن إزالة الموصل الحيادي دون أي تأثير على النظام، وستؤدي هذه الإزالة إلى كابلات تحتوي على ثلاثة أسلاك عوضا عن أربعة. في الواقع كثير من الأحمال ليست متزنة وتبقى الحاجة إلى الموصل الحيادي قائمة.

مثال ٢٠□٢: يغذي مولد حملين كلاهما ثلاثي الأطوار وموصول بتوصيلة نجمة كما هو موضح في الشكل ٥٣□٢. احسب القيمة الفعالة لجهد الخط وتيارات الخطوط المطاورة ، وبين أن تيار الحيادي معدوم.



الشكل ٥٣-٢

الحل :

القيمة الفعالة لجهد الخط :

$$V_L = \sqrt{3}\,V = \sqrt{3}\times 127 = 220\,V$$

تيارات الأطوار :

$$\mathbf{I}_{an} = \frac{\mathbf{V}_{an}}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{E}_{AN}}{\mathbf{Z}} = \frac{127\angle 0^\circ}{3+j4} = \frac{127\angle 0^\circ}{5\angle 53.1^\circ} = 25.4\angle -53.1^\circ\ A$$

$$\mathbf{I}_{bn} = \frac{\mathbf{V}_{bn}}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{E}_{BN}}{\mathbf{Z}} = \frac{127\angle -120^\circ}{5\angle 53.1^\circ} = 25.4\angle -173.1^\circ\ A$$

$$\mathbf{I}_{cn} = \frac{\mathbf{V}_{cn}}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{E}_{CN}}{\mathbf{Z}} = \frac{127\angle 120^\circ}{5\angle 53.1^\circ} = 25.4\angle 66.9^\circ\ A$$

وبما أن التوصيلة نجمة فإن تيارات الخط تساوي تيارات الطور:

$$\mathbf{I}_{Aa} = \mathbf{I}_{an} = 25.4\angle -53.1^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{Bb} = \mathbf{I}_{bn} = 25.4\angle -173.1^\circ \text{ A}$$

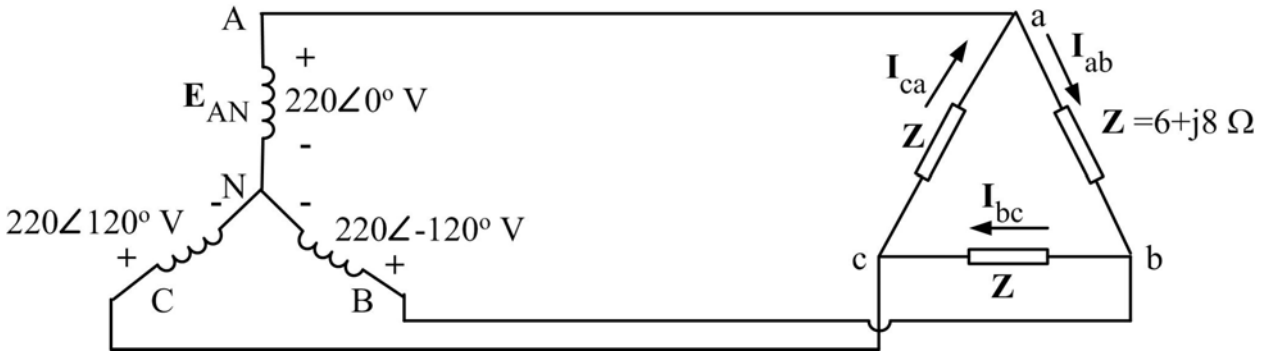
$$\mathbf{I}_{Cc} = \mathbf{I}_{cn} = 25.4\angle 66.9^\circ \text{ A}$$

التيار في الحيادي:

$$\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_{Aa} + \mathbf{I}_{Bb} + \mathbf{I}_{Cc}$$
$$= 25.4\angle -53.1^\circ + 25.4\angle -173.1^\circ + 25.4\angle 66.9^\circ$$
$$= (15.25 - j20.31) + (-25.22 - j3.05) + (9.97 + j23.36) = 0$$

وهذا طبيعي لأن الحمل متزن.

مثال ٢١□٢: وصل حمل ثلاثي الأطوار توصيلة دلتا بمولد ذي توصيلة نجمة كما هو مبين في الشكل ٥٤□٢. احسب تيار كل طور من الحمل وكذلك القيمة الفعالة لتيار الخط.



الشكل ٥٤-٢

الحل :

تيارات الاطور :

$$\mathbf{I}_{ab} = \frac{\mathbf{V}_{ab}}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{V}_{AB}}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{V}_{AN} - \mathbf{V}_{BN}}{\mathbf{Z}}$$
$$= \frac{220\angle 0^\circ - 220\angle -120^\circ}{6 + j8} = \frac{380\angle 30^\circ}{10\angle 53.1^\circ} = 38\angle -23.1^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{bc}=\frac{\mathbf{V}_{bc}}{\mathbf{Z}}=\frac{\mathbf{V}_{BC}}{\mathbf{Z}}=\frac{\mathbf{V}_{BN}-\mathbf{V}_{CN}}{\mathbf{Z}}$$

$$=\frac{220\angle -120^\circ -220\angle 120^\circ}{6+j8}=\frac{380\angle -90^\circ}{10\angle 53.1^\circ}=38\angle -143.1^\circ\ A$$

$$\mathbf{I}_{ca}=\frac{\mathbf{V}_{ca}}{\mathbf{Z}}=\frac{\mathbf{V}_{CA}}{\mathbf{Z}}=\frac{\mathbf{V}_{CN}-\mathbf{V}_{AN}}{\mathbf{Z}}$$

$$=\frac{220\angle 120^\circ -220\angle 0^\circ}{6+j8}=\frac{380\angle 150^\circ}{10\angle 53.1^\circ}=38\angle 96.9^\circ\ A$$

القيمة الفعالة لتيار الخط :

$$I_L=\sqrt{3}\,I=\sqrt{3}\times 38=65.8\,A$$

القدرة في دائرة التيار المتردد ثلاثي الأطوار

كما في دوائر التيار المتردد أحادي الطور، نقسم القدرة إلى فعالة ومفاعلة وظاهرية. والقدرة الفعالة الكلية التي يستهلكها الحمل ثلاثي الأطوار هي مجموع القدرات الفعالة التي يستهلكها كل طور (نفس الشيء بالنسبة للقدرة المفاعلة والقدرة الظاهرية)، وإذا كان الحمل متزنا فإن هذه القدرة الكلية هي ثلاثة أضعاف قدرة كل طور. وفيما يلي نحسب هذه القدرات في توصيلتي النجمة والدلتا في حالة الإتزان وبدلالة كميات الخط (تيار الخط وجهد الخط) لأنها أكثر استعمالا من كميات الطور.

تعطى القدرة الفعالة التي يستهلكها طور واحد بالمعادلة:

$P=V\,I\cos\theta$	

حيث θ هي الزاوية بين تيار الطور I وجهد الطور V. والقدرة الفعالة الكلية للحمل هي

$P_T = ٣\ P$	

وفي كلتا التوصيلتين (النجمة والدلتا) نستنتج

$P_T=\sqrt{3}\,V_L\,I_L\cos\theta$	٢-٦٢

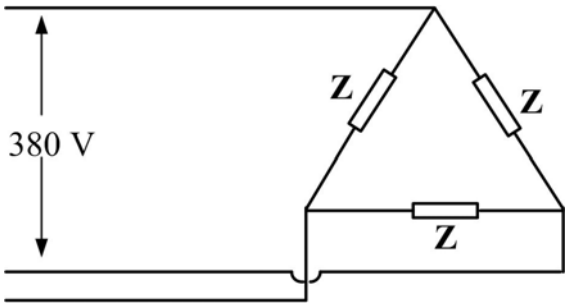
وبنفس الطريقة نحصل على القدرة غير الفعالة الكلية للحمل

$Q_T=\sqrt{3}\,V_L\,I_L\sin\theta$	٢-٦٣

أما القدرة الظاهرية الكلية فهي

$S_T=\sqrt{3}\,V_L\,I_L$	٢-٦٤

مثال ٢٢□٢: احسب القدرات الفعالة والمفاعلة والظاهرية التي يستهلكها الحمل الموضح في الشكل□٢ ٥٥ ، علما أن النظام متزن وأن $\mathbf{Z} = ٦ - j\ ٨\ \Omega$.



الشكل ٥٥-٢

الحل:

$$Z = 6 - j8\ \Omega = 10\angle -53.1^\circ\ \Omega$$

$$I = \frac{V_L}{Z} = \frac{380}{10} = 38\,A$$

$$I_L = \sqrt{3}\,I = \sqrt{3} \times 38 = 65.8\,A$$

$$P_T = \sqrt{3}\,V_L\,I_L \cos\theta = \sqrt{3} \times 380 \times 65.8 \times \cos(-53.1^\circ) = 26\,kW$$

$$Q_T = \sqrt{3}\,V_L\,I_L \sin\theta = \sqrt{3} \times 380 \times 65.8 \times \sin(-53.1^\circ) = -34.6\,kVAR$$

$$P_T = \sqrt{3}\,V_L\,I_L = \sqrt{3} \times 380 \times 65.8 = 43.3\,kVA$$

مسائل إضافية

٢-١ احسب دورة موجة مترددة جيبية تكمل ١٠٠ دورة في زمن قدره ٣٠ ms.

٢-٢ ما هو الزمن اللازم لموجة جيبية لتكمل ٦ دورات إذا كان ترددها يساوي ٦٠ Hz ؟

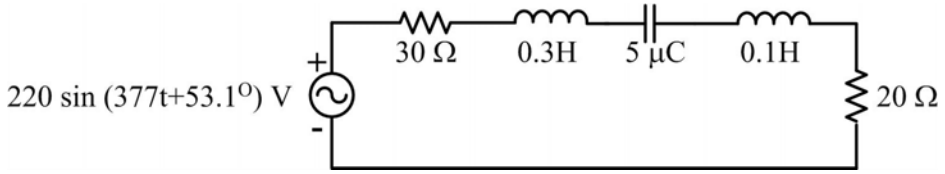
٢-٣ احسب القيمة القصوى و التردد وكذلك الطور في بداية الزمن للموجات الآتية:
$50 \sin(314\,t + 30^o)$ ؛ $30 \sin 942\,t$ ، $100 \cos(754\,t + 45^o)$ ؛ $8{,}4 \sin 10000\,t$

٢-٤ إذا كانت موجات المسألة ٢-٣ تمثل جهودا، احسب القيمة الفعالة لكل منها.

٢-٥ إذا كان التيار المار في حمل معين $i(t)=6\sin(377t+30^o)A$، وكان الجهد بين طرفيه $v(t)=220\sin(377t+60^o)V$ ، أوجد التيار المطاور والجهد المطاور وكذلك المعاوقة المركبة للحمل، ثم ارسم الشكل المطاور.

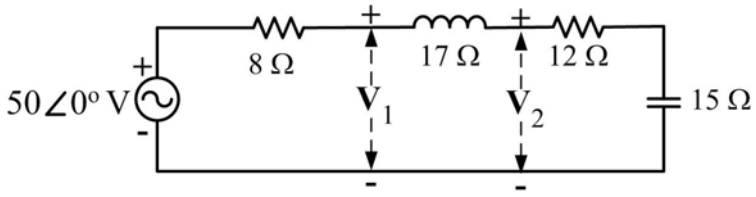
٢-٦ أعد المسألة ٢-٥ إذا كان التيار $i(t)=10\sin(377t)A$، وكان الجهد $v(t)=380\cos(377t+60^o)V$.

٢-٧ احسب المعاوقة المكافئة للدائرة المبينة في الشكل ٢-٤٠ وارسم شكلها، ثم احسب التيار المار في الدائرة والجهد بين طرفي كل عنصر ، وارسم الشكل المطاور للتيار والجهود.



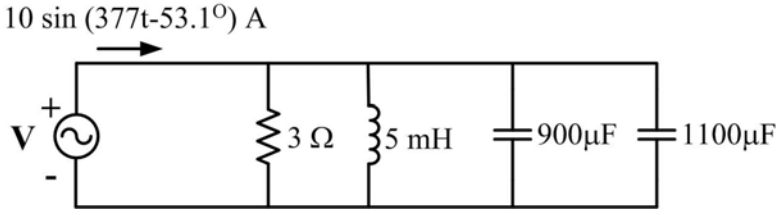
الشكل ٢-٤٠

٢-٨ احسب الجهدين $\mathbf{V}_1$ و $\mathbf{V}_2$ في الدائرة المبينة في الشكل ٢-٤١، وذلك باستعمال قانون توزيع الجهد.



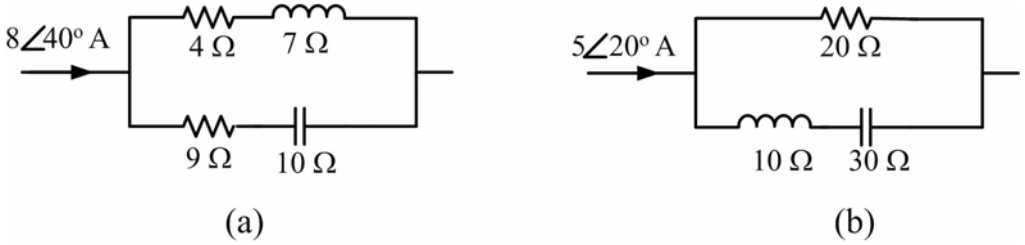
الشكل ٢-٤١

٢-٩ احسب السماحية المكافئة للدائرة المبينة في الشكل ٢-٤٢ وارسم شكلها، ثم احسب الجهد المؤثر وارسم الشكل المطاور للتيارات والجهد المؤثر.



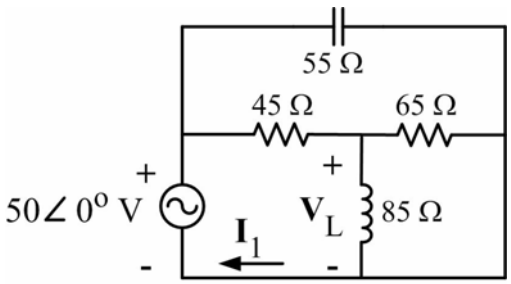
الشكل ٢-٤٢

٢-١٠ احسب التيار في كل فرع من الدائرتين a و b المبينتين في الشكل ٢-٤٣ باستعمال قانون توزيع التيار.



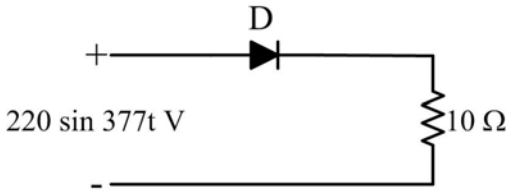
الشكل ٢-٤٣

٢-١١ في الدائرة الموضحة في الشكل ٢-٤٤، احسب التيار $\mathbf{I}_1$ والجهد $\mathbf{V}_L$؛



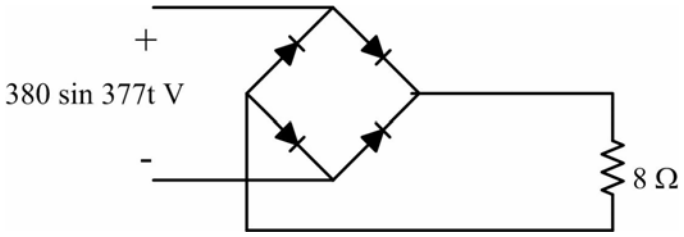
الشكل ٢-٤٤

٢-١٢ في دائرة التقويم نصف موجة المبينة في الشكل ٢-٤٥، احسب القيم المتوسطة للجهد بين طرفي الحمل وللتيار المار فيه.



الشكل ٤٥-٢

٢-١٣ أعد المسألة ١٢-٢ بالنسبة لدائرة التقويم الموجي الكامل المبينة في الشكل ٤٦-٢ .

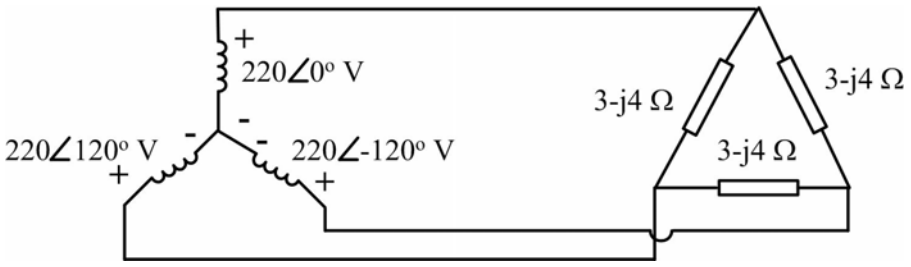


الشكل ٤٦-٢

٢-١٤ احسب القدرات الفعالة والمفاعلة والظاهرية التي يوفرها مصدر الدائرة المبينة في الشكل ٤٠-٢ أعلاه، ثم احسب معامل القدرة الكلي للدائرة.

٢-١٥ احسب القدرة غير الفعالة التي يستهلكها ملف الدائرة المبينة في الشكل ٤٤-٢ أعلاه.

٢-١٦ احسب تيار الخط للحمل ثلاثي الأطوار المبين في الشكل ٤٧-٢ ، وكذلك القدرة الحقيقية والقدرة غير الفعالة المستهلكة من طرف الحمل.



الشكل ٤٧-٢

دوائر وقياسات كهربائية – ٢

قياسات التيار المتردد

جميع الحقوق محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

الجدارة: معرفة الأجهزة المستعملة لقياس كميات التيار المتردد.

الأهداف:

بعد دراسة هذه الوحدة يكون للطالب القدرة على معرفة:

- أساسيات وأجهزة قياس التيار والجهد المترددين .
- أساسيات وأجهزة قياس القدرة والطاقة ومعامل القدرة .
- قياس التردد .
- القناطر الكهربائية واستعمالها لقياس عناصر المعاوقات.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان هذه الوحدة بنسبة ٨٠٪

الوقت المتوقع للتدريب: ثلاث ساعات للفصل الأول، وثلاث ساعات للفصل الثاني، وساعتان للفصل الثالث، بحيث يكون الوقت الكلي ثماني ساعات.

الفصل الأول

قياس التيار المتردد والجهد المتردد

رأينا في مادة دوائر وقياسات كهربائية -١ أن كثيرا من أجهزة قياس التيار المستمر تعتمد في تشغيلها على إنتاج عزم دوران في ملف يمر فيه تيار وموضوع في مجال مغناطيسي ينتجه مغناطيس دائم (جهاز دي أرسنفال d'Arsonval meter). لو مررنا تيارا مترددا في ملف جهاز دي أرسنفال فإن العزم يغير اتجاهه في كل دورة ، وإذا كان التردد عاليا نسبيا (٥٠Hz أو ٦٠Hz مثلا) فإن القصور الذاتي للملف لن يسمح له بمتابعة تغير التيار وبهذا فلن يتحرك (بمعنى آخر القيمة المتوسطة لعزم الدوران تساوي الصفر). ولإجراء القياسات للتيار المتردد نستطيع تقويم التيار المتردد قبل تمريره في جهاز دي أرسنفال ، كما نستعمل أجهزة أخرى، وفيما يلي تفصيل لبعض أجهزة قياس التيار المتردد.

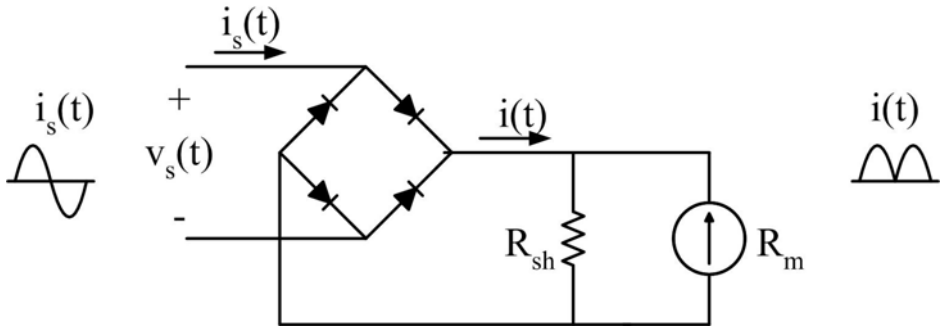
أجهزة الملف المتحرك المزود بمقوم

نستطيع استعمال جهاز الملف المتحرك (جهاز دي أرسنفال) لقياس التيار و الجهد المترددين وذلك بتمرير التيار المتردد على مقوم قبل تسليطه على الجهاز، حيث يؤدي التأثير المتبادل بين المجال المغناطيسي الناتج عن التيار المستمر ومجال المغناطيس الدائم إلى توليد عزم دوران ذي اتجاه واحد. ونظرا للخصائص الجيدة والحساسية العالية لجهاز الملف المتحرك، فإن تزويد هذا الجهاز بمقوم يمكننا من قياس الكميات المترددة بحساسية أعلى من حساسية بعض الأجهزة الأخرى المستعملة (مثل جهازي الديناموميتر و الحديدة المتحركة اللذين سندرسها فيما بعد).

ونستطيع استعمال مقوم نصف موجة أو قنطرة التقويم الموجي الكامل. ويعطي التيار المستمر الناتج انحرافا يتناسب مع قيمته المتوسطة ، وهي I_m ٠,٣١٨ بالنسبة لمقوم نصف موجة وI_m ٠,٦٣٦ بالنسبة لقنطرة التقويم الموجي الكامل، حيث I_m هي القيمة العظمى للتيار المتردد (المعادلتان ٣٥-٢ و ٣٧-٢).

استعمال الجهاز لقياس التيار (جهاز آميتر)

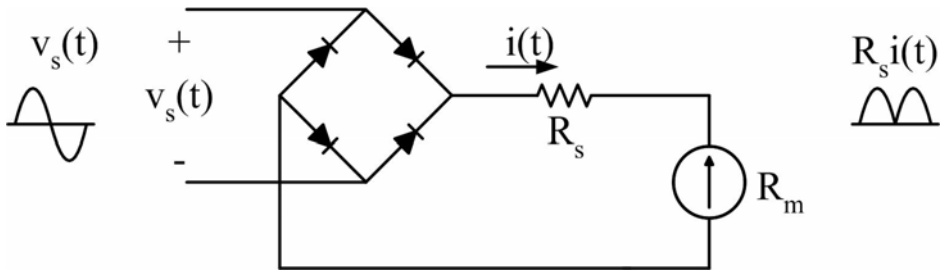
يبين الشكل ١-٣ الدائرة الأساسية لقياس التيار باستعمال جهاز الملف المتحرك وقنطرة التقويم الموجي الكامل. وتتكون المقاومة الداخلية للجهاز من مقاومة الملف R_m والمقاومة الموصولة على التوازي R_{sh} (Shunt Resistor)، وتستعمل مقاومة التوازي لقياس تيار يفوق أقصى تيار يقيسه ملف الجهاز.



الشكل ١-٣: الدائرة الأساسية لقياس التيار بجهاز ملف متحرك مزود بمقوم

استعمال الجهاز لقياس الجهد (جهاز فولتميتر)

يبين الشكل ٢-٣ الدائرة الأساسية لقياس الجهد باستعمال جهاز الملف المتحرك وقنطرة التقويم الموجي الكامل. وتتكون المقاومة الداخلية للجهاز من مقاومة الملف R_m على التوالي مع المقاومة R_s ذات القيمة العالية مقارنة بقيمة R_m والمعروفة بالمقاومة الضاربة ، وبتغيير R_s نستطيع إطالة مدى القياس.



الشكل ٢-٣: الدائرة الأساسية لقياس الجهد بجهاز ملف متحرك مزود بمقوم

مثال ١-٣: أوجد قيمة المقاومة الضاربة R_S الضرورية لإطالة مدى القيمة الفعالة للجهد v_s إلى V=١٠V للفولتميتر الموضح في الشكل ٢-٣، علما أن R_m=٣٠٠Ω وI_{fs}=١mA حيث إن I_{fs} هو التيار المستمر الذي يسبب الإنحراف الأقصى (full scale deviation) لجهاز الملف المتحرك. ما هو مدى القياس بدون المقاومة الضاربة ؟

الحل :

القيمة المتوسطة للجهد V_{av} (الجهد المستمر) الذي يسبب الإنحراف الأقصى للجهاز تعطى بقانون أوم:

$$V_{av} = (R_m + R_s)\, I_{fs}$$

وبالنسبة لمقوم موجة كاملة فإن $V_{av} = ٠,٦٣٦\ V_m = ١,١V$

وبالتعويض في المعادلة الأولى نستنتج

$$R_m = \frac{1.1\ V}{I_{fs}} - R_m$$
$$= \frac{1.1 \times 10}{10^{-3}} - 300 = 9.7\,k\Omega$$

بدون المقاومة المضاعفة فإن $V_{av} = R_m I_{fs} = ١,١\ V \Rightarrow V = R_m I_{fs} / ١,١ = ٠,٢٧\ V$

الديناموميتر

هو جهاز كهروديناميكي ذو ملف متحرك داخل مجال مغناطيسي ، ولكن خلافا لجهاز دي أرسنفال، فإن المجال المغناطيسي ينتجه ملف ثابت مكون من جزأين ويمر فيه نفس التيار الذي يمر في الملف المتحرك أو تيار يتناسب معه. وفي هذه الحالة يتغير اتجاه التيار واتجاه المجال المغناطيسي بطريقة تزامنية ويحتفظ العزم باتجاهه ويتحرك الملف في اتجاه واحد. ويبين الشكل ٣□٣ الأجزاء المكونة للديناموميتر.

ونحسب زاوية انحراف المؤشر θ كما يلي :

عند مرور التيار المتردد i في الملف المتحرك الذي يوجد داخل الفيض المغناطيسي ذي الكثافة B، يتولد عزم T يحاول تحريك الملف حول محور الحركة ويتناسب مع التيار ومع كثافة الفيض، أي

$T = k\,i\,B$	٣□١

حيث k ثابت. ويتناسب الحث B مع التيار 'i الذي ولده والمار في الملف الساكن، كما يتناسب التيار 'i مع التيار i . وبناء على ذلك فإن العزم يساوي

$T = k\,k_1\,i^2 = k'i^2$	٣-٢

حيث k_1 هو ثابت التناسب بين B و i. وكما نرى فإن عزم الدوران T يتناسب مع مربع القيمة اللحظية للتيار. وبما أنه متذبذب فسيتحرك الملف نتيجة للقيمة المتوسطة للعزم والتي تساوي (انظر المعادلة ٥□٢)

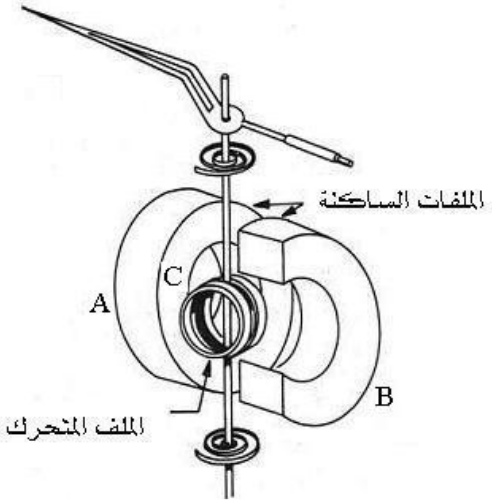
$T_{av} = k'I^2$	٣-٣

حيث I هي القيمة الفعالة للتيار i.

ويحتوي الجهاز على نابض يولد عزم ارجاع T_r معاكس للعزم الأصلي و يتناسب مع الزاوية θ، أي

$T_r = k''\,\theta$	٣-٤

حيث "k هو ثابت النابض.



الشكل ٣-٣ : جهاز

وعند الإتزان يتساوى العزمان T_{av} و T_r ،ونحصل على

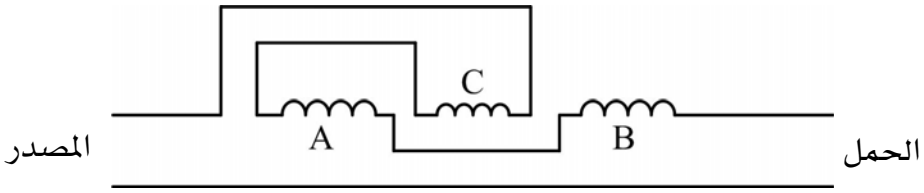
٣-٥	$\theta=\frac{k'}{k''}I^2=k_2 I^2$

والثابت k_2 يأخذ بعين الاعتبار مقاييس عناصر الجهاز ومنها الملفات والنابض. وكما نرى فإن زاوية الإنحراف تتناسب مع مربع القيمة الفعالة للتيار. ويمكننا تغيير التدريج وجعله يتناسب مع جذر مربع التيار، وهذا يعني أننا نستطيع قياس القيمة الفعالة للتيار (أو الجهد).

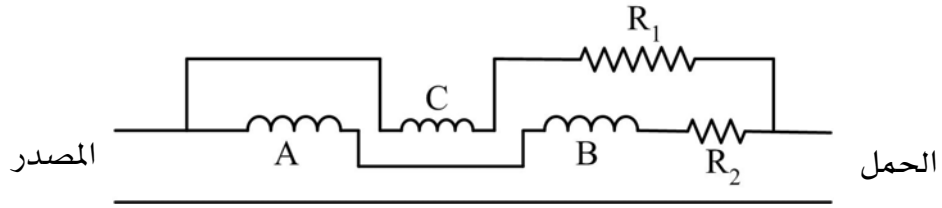
ومن عيوب هذا الجهاز أنه يستهلك قدرة أكبر من جهاز الملف المتحرك المزود بمقوم وذلك لأن تيار القياس يؤدي وظيفتين هما توليد المجال المغناطيسي (عبر مروره في الملف الثابت) وتكوين عزم الدوران.

استعمال الجهاز لقياس التيار

ويستعمل هذا الجهاز وحده دون أي ملحق كآميتر لقياس التيارات التي تتراوح شدتها بين ٠,١A و ٠,٥A وفي هذه الحالة، نوصل الملف المتحرك C على التوالي مع جزئي الملف الساكن A وB كما هو موضح في الشكل ٣-٤، وكما نرى هنا فإن التيار المراد قياسه هو نفسه المار في الملفات الساكنة والملف المتحرك. أما إذا أردنا استعمال هذا الجهاز لقياس تيارات أعلى فيجب توصيل الملفات الثابتة على التوازي مع الملف المتحرك كما في الشكل ٣-٥، وفي هذه الحالة فإن التيار المار في الملفات الساكنة يتناسب مع التيار المار في الملف المتحرك، وكلاهما يتناسب مع التيار المراد قياسه.



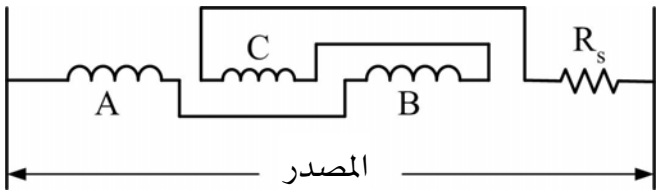
الشكل ٤□٣ : توصيل الملفات الساكنة مع الملف المتحرك على التوالي



الشكل ٥□٣ : توصيل ملفات الديناموميتر لقياس التيارات العالية

استعمال الجهاز لقياس الجهد

في حالة استخدام الجهاز كفولتميتر، توصل مقاومة عالية (مقاومة مضاعفة) على التوالي مع ملفات الديناموميتر لزيادة مدى القياس. ويبين الشكل ٦-٣ طريقة التوصيل.



الشكل ٦□٣ : توصيل ملفات الديناموميتر لقياس الجهد

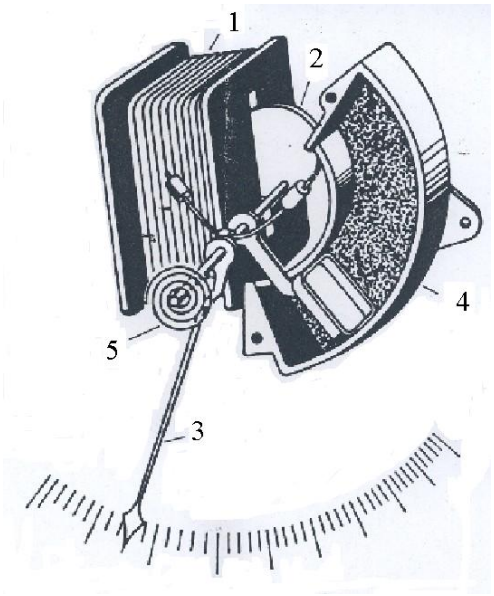
أجهزة الحديدة المتحركة

يعتمد مبدأ تشغيل هذه الأجهزة على القوى الميكانيكية الناتجة عن التأثير المتبادل بين مجالين مغناطيسيين . وهناك نوعان من هذه الأجهزة هما النوع التجاذبي والنوع التنافري.

النوع التجاذبي

لو ثبتنا قطعة من حديد مطاوع من أحد أطرافها قرب ملف يمر فيه تيار وتركنا الأطراف الأخرى حرة الحركة نلاحظ أن القطعة تنجذب إلى داخل الملف، وذلك مهما كان اتجاه التيار. وتنتج قوة التجاذب هذه بين مجالين مغناطيسيين، أحدهما ناتج عن مرور التيار المراد قياسه في الملف، والآخر ناتج عن المغناطيس المستحث في القطعة الحديدية، وبما أن المغناطيس المستحث يواجه دائما المجال الأصلي

بقطب معاكس، فإن القوة تكون دائما تجاذبية. وتتناسب قيمة القوة مع مربع التيار المار في الملف، وبما أن التيار متردد فإن القوة متذبذبة، ولذلك فإن التأثير على القطعة الحديدية يرجع إلى القيمة المتوسطة للقوة. وبطريقة مماثلة لحساب القيمة المتوسطة لعزم الدوران في الديناموميز، نستنتج أن القيمة المتوسطة للقوة تتناسب مع مربع القيمة الفعالة للتيار. وبإضافة نابض سيطرة وتدريج مصمم بحيث يتناسب مع جذر مربع التيار يمكن الحصول على جهاز قياس متكامل. وكما هو مبين في الشكل ٧-٣، فإن الجهاز يتكون من: (١) ملف مفلطح مستطيل الشكل ؛ (٢)قطعة من الحديد المطاوع تتحرك داخل إطار الملف ومثبتة من أحد أطرافها بمحور قابل للدوران؛ (٣)مؤشر مثبت بالمحور، ومكونات أخرى كوسائل تخميد الحركة(٤) والأسلاك الزنبركية (٥).

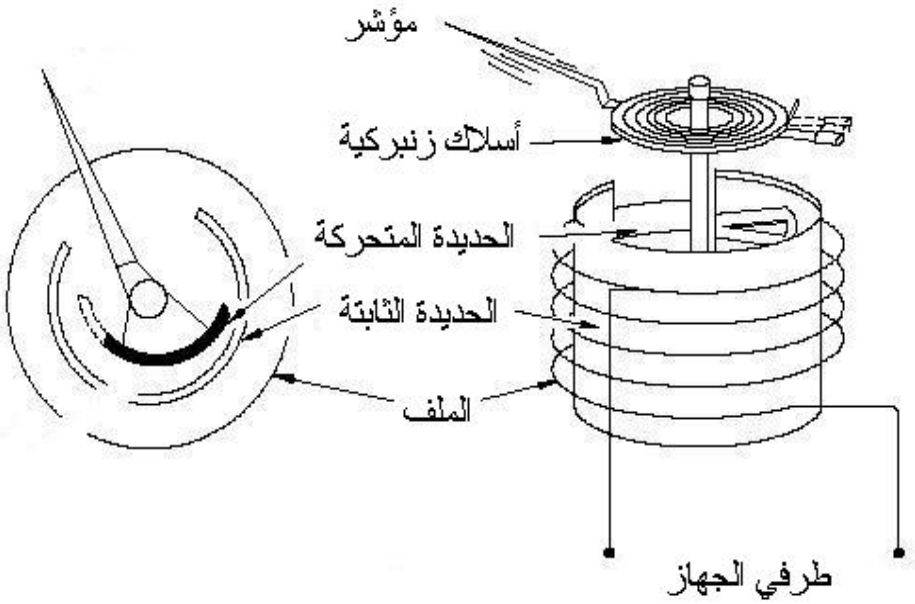


الشكل ٧□٣ : جهاز قياس بحديدة متحركة من النوع التجاذبي

النوع التنافري

إذا وضعنا قطعتين حديديتين داخل ملف إحداهما ثابتة والأخرى متحركة، ومررنا التيار المراد قياسه في الملف، فستتمغنط القطعتان بحيث تنشأ نفس القطبية لجميع النقاط المتقابلة للقطعتين، وبهذا تتنافر القطعتان مهما كان اتجاه التيار. وهنا كذلك فإن قوة التنافر تتناسب مع مربع التيار. ويبين الشكل ٨□٣ الأجزاء التفصيلية لجهاز الحديدة المتحركة من النوع التنافري. ويتكون الجهاز من: ملف أسطواني يمر فيه التيار المراد قياسه، قطعة حديدية ثابتة موضوعة داخل الملف، قطعة حديدية

متحركة موضوعة داخل القطعة الساكنة ومثبتة بمحور الدوران ، أسلاك زنبركية تنتج عزم إرجاع، مؤشر مثبت على المحور.



الشكل ٨□٣ : جهاز قياس بحديدة متحركة من النوع التنافري

ومن مزايا أجهزة الحديدة المتحركة نذكر: بساطة وسهولة التركيب، قلة التكليف، تحمل التيارات الزائدة، كون التيار لايمر في الأجزاء المتحركة. وهذه المزايا تؤهل هذه الأجهزة للاستعمال بكثرة لقياس الجهد والتيار المترددين.

ومن عيوب هذه الأجهزة نذكر: تأثرها بالمجالات المغناطيسية الشاردة؛ الدقة المنخفضة التي تساوي عادة ٠,٥ ، استهلاكها الكبير للقدرة مقارنة بأجهزة الملف المتحرك بسبب مقاومتها المغناطيسية العالية، وهذا العيب لايسمح باستعمال هذا الجهاز في الدوائر ذات المقاومة العالية والقدرة المنخفضة.

استعمال الجهاز لقياس التيار

في حالة استعمال جهاز الحديدة المتحركة كآميتر يكون عدد لفات الملف قليل نسبيا وتكون مساحة مقطع سلك الملف كبيرة لتحمل التيار المقنن ولتخفيض المقاومة الداخلية للجهاز.

استعمال الجهاز لقياس التيار

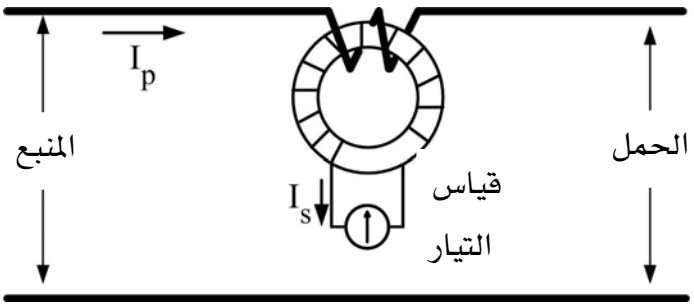
عندما نستعمل جهاز الحديدة المتحركة كفولتميتر نستعمل ملف يحتوي على عدد كبير من اللفات وسلك مساحة مقطعة صغيرة وذلك للرفع من المقاومة الداخلية للجهاز. وتحتوي بعض الأجهزة (المحمولة) على مقاومة مضاعفة داخلية، ونستطيع إضافة مقاومات مضاعفة خارجية لإطالة مدى القياس.

محولات القياس

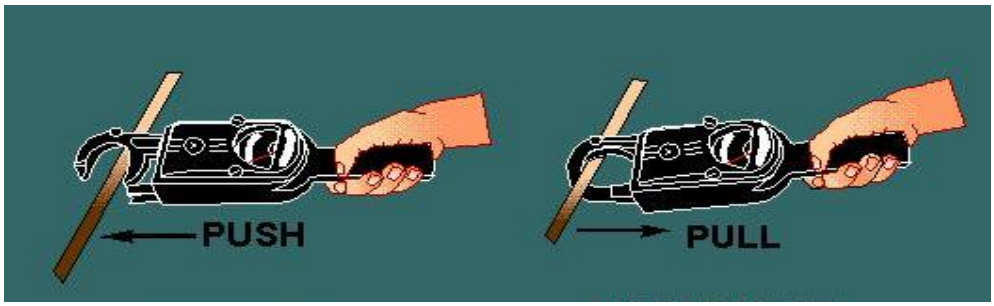
تستعمل محولات التيار ومحولات الجهد في أنظمة القدرة الكهربائية العالية لإطالة مدى القياس لبعض أجهزة قياس التيار وقياس الجهد (وكميات أخرى كالقدرة)، كما تستعمل لعزل دوائر أجهزة القياس عن أسلاك الجهد العالي. وهي محولات تشتغل بنفس المبدأ الذي تشتغل به محولات القدرة إلا أن القدرة الخارجة من الثانوي هي نسبة صغيرة جدا من القدرة المتوفرة في الابتدائي، فمحولات التيار تشتغل بثانوي قريب من قصر الدائرة، ومحولات الجهد تشتغل بثانوي قريب من الدائرة المفتوحة. ويجب عزل الملف الثانوي لهذه المحولات عن الابتدائي عزلا جيدا كما يحسن تأريضه لأغراض الأمان.

محولات التيار

تستعمل لقياس التيار المار في الخط في منظومة القدرة العالية، كما تستخدم لتشغيل المرحلات المستعملة في أنظمة الحماية. ويربط الملف الابتدائي على التوالي مع سلك الخط أما الثانوي فيربط مع أجهزة قياس التيار أومع ملفات التيار في أجهزة قياس القدرة، و يبين الشكل ٩□٣ رسما تخطيطيا لدائرة توصيل المحول. وفي حالة استعمال عدة أجهزة قياس مع محول واحد فإن هذه الأجهزة تربط على التوالي مع بعضها ثم توصل مع طرفي الثانوي للمحول. ويتكون الابتدائي من ملف ذي عدد قليل من اللفات، أو من لفة واحدة هي عبارة عن مرور سلك الخط عبر القلب الحديدي ذي الشكل الحلقي. وفي بعض الحالات يكون القلب الحديدي مشطورا يمكن فتحه ليحيط بالخط الذي نريد قياس التيار المار فيه، كما هو مبين في الشكل ١٠□٣.



الشكل ٩□٣ : دائرة توصيل محول



الشكل ١٠□٣ : محول التيار ذو القلب الحديدي المشطور مزود بآميتر

وبما أن معاوقات أجهزة قياس التيار صغيرة جدا فإن الملف الثانوي يكون في حالة قريبة من قصر الدائرة، وهكذا فإن الجهد والقدرة في الثانوي صغيران نسبيا. ويعتمد التيار الثانوي على التيار الابتدائي وليس على معاوقة الدائرة الثانوية كما هو الحال في محولات القدرة. وبما أن التيار الابتدائي مفروض من طرف المنظومة، فإن فتح الثانوي يعني أن كل التيار الابتدائي يصبح هو تيار المغنطة (الذي يحدد القوة الدافعة الكهربائية) وهذا يؤدي إلى ظهور جهود عالية وخطيرة في الثانوي، ولذلك يجب توصيل طرفي الملف الثانوي ببعضها قبل فتح الدائرة الثانوية.

وهناك خطآن في القياس هما الخطأ في نسبة التحويل والخطأ في زاوية الطور. ونعرف الخطأ في نسبة التحويل ε بالعلاقة

$\varepsilon = 100\frac{k I_s - I_p}{I_p}$	٣□٦

وهذا يعني أن التيار الابتدائي I_p لايساوي حاصل ضرب نسبة التحويل الاسمية k في شدة التيار الثانوي I_s. ويرجع سببه إلى كون نسبة التحويل الحقيقية تعتمد على مقاومة وممانعة ملفي المحول وعلى طبيعة وقيمة الحمل.

أما الخطأ في زاوية الطور فتعرف بالزاوية بين متجه التيار الابتدائي ومقلوب متجه التيار الثانوي.

ونخصص محولات التيار بدرجة دقتها و بحملها المقنن، وهو الحمل الثانوي بالفولط-آمبير.

مثال ٢□٣: إذا كانت شدة التيار المار في دائرة الجهد العالي والمطلوب قياسه هو ٦٠٠A، وكان مدى قياس جهاز الآميتر هو ٥A، احسب عدد لفات محول التيار الثانوية إذا كان الابتدائي يحتوي على لفة واحدة.

الحل:

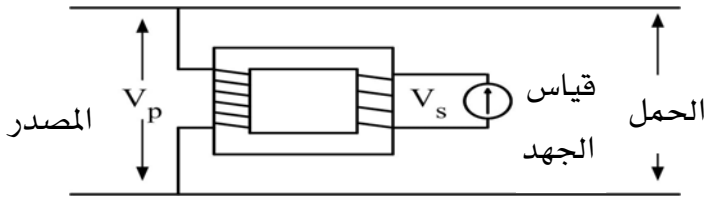
إذا اعتبر المحول مثاليا فإن نسبة التحويل هي:

$$k=\frac{N_s}{N_p}=\frac{I_p}{I_s}=\frac{600}{5}=120$$

بما أن عدد لفات الابتدائي N_p = ١ ، فإن عدد لفات الثانوي N_s = ١٢٠.

محولات الجهد

تستعمل لتشغيل أجهزة قياس الجهد أو القدرة كما تستعمل لتغذية ملفات الجهد في المرحلات، وفي جميع الحالات يساوي الجهد الثانوي جزءا صغيرا من الجهد الإبتدائي. ويوضح الشكل ١١-٣ دائرة توصيل محول الجهد. وبما أن معاوقات الأجهزة المربوطة مع الملف الثانوي كبيرة جدا فإن دائرة الثانوي تكون في حالة قريبة من الدائرة المفتوحة، وهكذا فإن التيار والقدرة في الثانوي صغيران نسبيا. وبهذا يمكن اعتبار القوى الدافعة الكهربائية مساوية للجهود في الأطراف كما في المحول المثالي.



الشكل ١١-٣ : دائرة توصيل محول الجهد

وكما في محولات التيار فإن هناك خطآن في القياس هما الخطأ في نسبة التحويل والخطأ في زاوية الطور. ويعطى الخطأ في نسبة التحويل بالمعادلة

٣-٧	$\varepsilon=100\frac{k V_s - V_p}{V_p}$

حيث k هي نسبة التحويل الإسمية، V_p هو الجهد الابتدائي الفعلي، و V_s هو الجهد الثانوي الفعلي.

مثال ٣-٣: إذا أردنا قياس جهد قيمته ١١kV باستخدام فولتميتر مدى قياسه ٢٠٠V ، احسب عدد لفات محول الجهد الإبتدائية N_p إذا كان عدد لفات الثانوي N_s = ١٠٠ .

الحل:

نعتبر أن المحول مثالي: $k=\frac{N_p}{N_s}=\frac{V_p}{V_s}=\frac{11000}{200}=55 \Rightarrow N_p=55N_s=55\times100=5500$

الفصل الثاني

قياس القدرة والطاقة ومعامل القدرة

قياس القدرة في دوائر التيار المتردد أكثر تعقيدا من قياسها في دوائر التيار المستمر وذلك لتنوع القدرة في دوائر التيار المتردد كما رأينا في الفصل الثالث من الوحدة الثانية. وعلى العموم نستعمل الأجهزة التالية :

- الفولتميتر و الآميتر لقياس القدرة الظاهرية.
- الواطميتر لقياس القدرة الفعالة.
- جهازين واطميتر لقياس القدرة الفعالة للدوائر ثلاثية الأطوار ذات ثلاثة أسلاك.
- العداد لقياس الطاقة الكهربائية

وفيما يلي سنشرح طريقة تشغيل أهم هذه الأجهزة .

جهاز الواطميتر وقياس القدرة الفعالة

هناك عدة أنواع من الواطميترات، وهي تحتوي على ملفات للتيار وملفات للجهد ، وتعتمد قراءتها على زاوية الطور بينهما. وفيما يلي ندرس بإيجاز نوعين من الواطميترات المستعملة وهما الواطميتر الكهرديناميكي و الواطميتر الحثي قبل أن ندرس طرق قياس القدرة في دوائر التيارالمتردد أحادي الطور وفي دوائر التيار المتردد ثلاثي الأطوار.

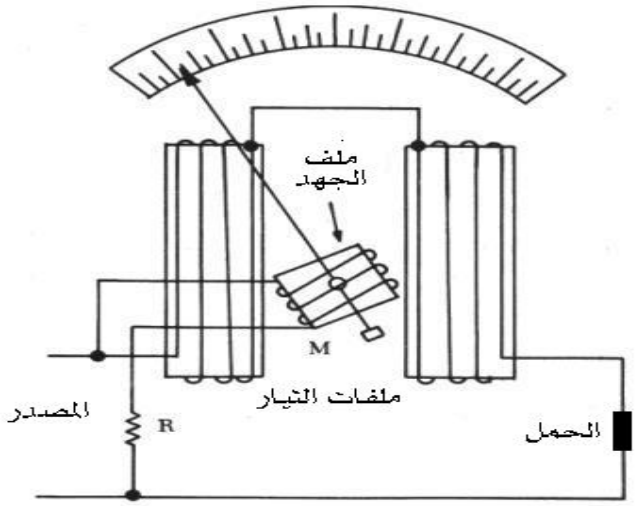
الواطميتر الكهرديناميكي

يبين الشكل ١٢□٣ رسم تخطيطي لجهاز الواطميتر الكهرديناميكي، وكما نرى فإن ملف الجهد M (الملف المتحرك) يوصل على التوالي مع مقاومة R تستعمل لإطالة مدى قياس الواطميتر ولحمايته من التيارات الزائدة، أما ملف التيار فإنه يتكون من نصفين متماثلين تماما وموصلين على التوالي (الملفات الثابتة). وينتج عزم الدوران نتيجة للتأثير المتبادل بين المجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار في ملف الجهد يتناسب مع الجهد بين أطراف الحمل، والمجال المغناطيسي الناتج عن مرور تيار الحمل في ملفات التيار. وهذا يعني أن القيمة اللحظية للعزم تتناسب مع حاصل ضرب القيم اللحظية للجهد بين طرفي الحمل والتيار المار فيه. وتتناسب زاوية الإنحراف مع القيمة المتوسطة للعزم الذي يعطى بالمعادلة

$T_{av} = k\frac{1}{T}\int_0^T v(t)\, i(t)\, dt = \frac{1}{T}\int_0^T V\sqrt{2}\sin(\omega t)\, I\sqrt{2}\sin(\omega t-\theta)\, dt$ $= k\, V I \cos\theta = k\, P$	٣□٨

حيث V و I هما القيم الفعالة للجهد والتيار وθ هي زاوية الطور بينهما k ثابت.

وكما نرى فإن زاوية الإنحراف تتناسب مع القدرة الفعالة P التي يستهلكها الحمل، وهذا هو المطلوب من الجهاز.



الشكل ١٢□٣ : رسم تخطيطي لجهاز الواطميتر الكهرديناميكي

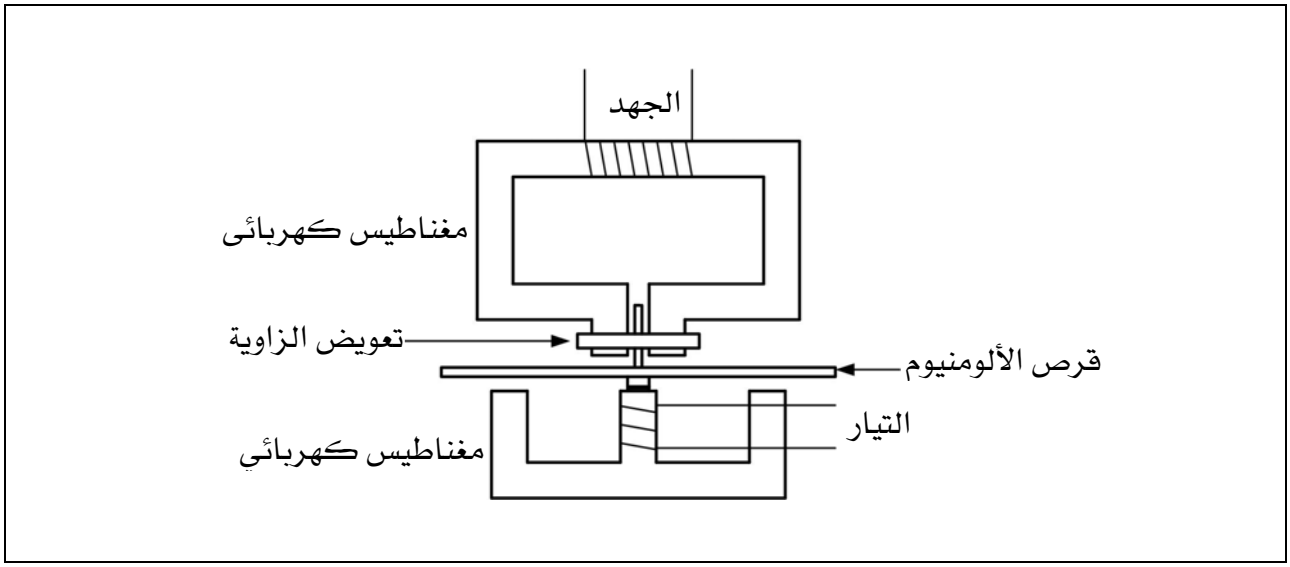
ونلاحظ أنه إذا عكسنا توصيل ملف التيار أو ملف الجهد فإن زاوية الطور θ ستتحول إلى θ-π، وبهذا فإن المؤشر سينحرف إلى الخلف بدلا من الأمام.

وتتميز هذه الأجهزة بإمكانية تصنيعها بمرتبة دقة عالية لأغراض المعايرة. ومن عيوبها نذكر تأثرها بالمجالات الشاردة، واستهلاكها للقدرة مما يسبب أخطاء القياس، وسندرس فيما بعد هذه الأخطاء وكيف نقلل منها.

الواطميتر الحثي

كما هو مبين في الشكل ١٣□٣ فإن الواطميتر الحثي يحتوي علىمغناطيسين كهربائيين ، يغذى ملف أحدهما بتيار الحمل ويعرف هذا الملف بملف التيار، أما الملف الآخر والمعروف بملف الجهد فإنه يغذى بتيار يتناسب مع الجهد بين طرفي الحمل. ويوضع قرص من الألومنيوم في الثغرة الهوائية الموجودة بين المغناطيسين الكهربائيين. وتنتج تيارات دوامية (Eddy currents) في القرص نتيجة للمجالين المغناطيسيين المترددين الناتجين عن المغناطيسين، ويؤدي التأثير المتبادل بين التيارات الدوامية الناتجة عن أحد المجالين والمجال الآخر إلى توليد عزم دوران يعمل على إدارة القرص حول محوره. ولكي يتناسب العزم مع القدرة الفعالة التي يستهلكها الحمل يجب تحقيق الشروط الآتية :

- يصنع ملف الجهد من عدد كبير من اللفات، بحيث يكون حثيا قدر الإمكان.
- يصنع ملف التيار من عدد قليل من اللفات، وتكون مقاومته كبيرة جدا مقارنة بممانعته.
- تثبت حلقة نحاسية حول أقطاب مغناطيس ملف الجهد، تؤدي إلى تخلف الفيض الناتج بزاوية 90^{o} عن الجهد المسلط.



الشكل ١٣□٣: الواطميتر الحثى

ومن مزايا الجهاز نذكر: عزم دوران كبير وقوة تخميد ممتازة، القدرة على تحمل التيارات والجهود العالية، عدم التأثر بالمجالات الشاردة.

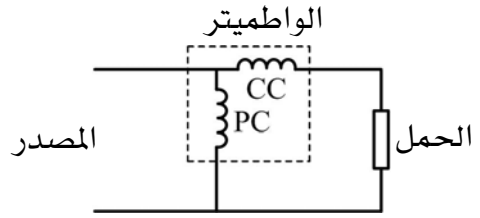
ومن عيوب الجهاز نذكر: زيادة الخطأ في الأحمال الضعيفة، زيادة القدرة المفقودة .

قياس القدرة

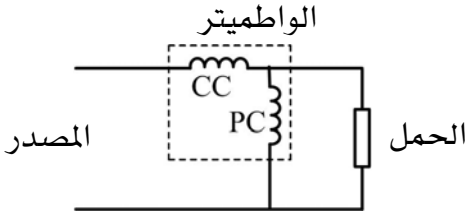
هناك طريقتان لتوصيل جهاز الواطميتر لقياس القدرة التي يستهلكها حمل معين :

ففي الطريقة الأولى المبينة في الشكل ١٤□٣، نوصل ملف التيار (CC في الشكل) على التوالي مع الحمل، أما ملف الجهد (PC في الشكل) فإنه يوصل عبر ملف التيار والحمل معا. وهنا فإن القدرة المقاسة أكبر من القدرة التي يستهلكها الحمل لأننا نقيس كذلك القدرة المفقودة في ملف التيار.

وفي الطريقة الثانية المبينة في الشكل ١٥□٣، فإننا نوصل ملف الجهد PC عبر أطراف الحمل فقط، وهنا فإن التيار المار في ملف التيار CC يساوي مجموع قيمتي التيار المار في الحمل والتيار المار في ملف الجهد، وعلى ذلك فإن القدرة المقاسة تساوي مجموع القدرة الحقيقية والقدرة المستهلكة في ملف الجهد.



الشكل ١٤□٣: الطريقة الأولى لتوصيل الواطميتر



الشكل ١٥□٣: الطريقة الثانية لتوصيل الواطميتر

وتعتمد طريقة توصيل الواطميتر على نوع الحمل المراد قياسه. فعندما يكون الحمل صغيرا يستحسن استعمال الطريقة الأولى لأن في هذه الحالة يكون هبوط الجهد عبر ملف التيار (ذي المقاومة الصغيرة) صغيرا يمكن إهماله. أما إذا كان الحمل كبيرا، فمن الأفضل استعمال الطريقة الثانية لأن قيمة التيار المار في ملف الجهد (ذي المقاومة الكبيرة) صغيرة في هذه الحالة.

وتزود كثير من الواطميترات بملفات خاصة لتعويض الخطأ الناتج عن فقد القدرة في أحد ملفي الجهاز.

مثال ٤□٣: إذا كانت القيمة الفعالة للجهد بين طرفي حمل $V=٢٢٠V$، وكانت القيمة الفعالة للتيار المار فيه $I=٣A$ ، وكان معامل قدرته $\cos\theta=٠,٨$، احسب القدرة التي يقيسها واطميتر كهرديناميكي حسب الطريقتين، علما أن مقاومة ملف الجهد للجهاز $R_V=٢٠٠٠\Omega$، ومقاومة ملف التيار للجهاز $R_i=٣\Omega$.

الحل:

القدرة الحقيقية التي يستهلكها الحمل: $P = V\ I\ \cos\theta = ٢٢٠\times٣\times٠,٨ = ٥٢٨\ W$

حسب الطريقة الأولى:

القدرة المستهلكة في ملف التيار: $P_i = R_i\ I^٢ = ٣\times٣^٢ = ٢٧\ W$

القدرة التي يقيسها الجهاز : $P_T = P + P_i = ٥٢٨ + ٢٧ = ٥٥٥\ W$

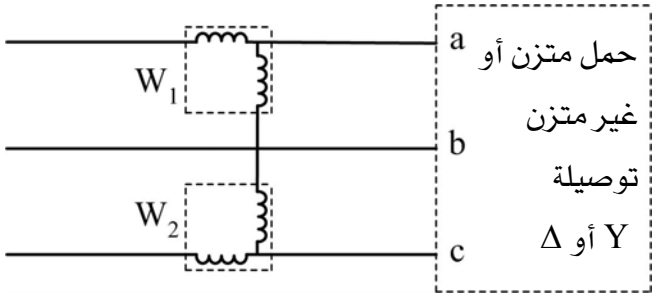
حسب الطريقة الثانية:

القدرة المستهلكة في ملف الجهد: $P_v = V^٢/ R_v = ٢٢٠^٢/٢٠٠٠ = ٢٤,٢\ W$

القدرة التي يقيسها الجهاز : $P_T = P + P_v = ٥٢٨ + ٢٤,٢ = ٥٥٢,٢\ W$

قياس القدرة في دوائر التيار المتردد ثلاثي الأطوار

نستطيع قياس القدرة التي يستهلكها حمل ثلاثي الأطوار باستعمال ثلاثة واطميترات، ولكن في نظام ذي ثلاثة أسلاك، نستعمل غالبا طريقة الواطمترين الموضحة في الشكل ١٦□٣ والتي تصلح سواء كان الحمل بتوصيلة نجمة أو دلتا وسواء كان متزنا أم لا. وفي هذه الطريقة نوصل ملف تيار الواطميتر $W_١$ على التوالي مع الطور a وملف تيار الواطميتر $W_٢$ على التوالي مع الطور c، أما ملفي الجهد للجهازين فإنها تقيس جهدي الخط V_{ac} و V_{cb}.



الشكل ١٦□٣: طريقة الواطمترين

وتساوي القدرة المستهلكة من طرف الحمل P مجموع قراءتي الواطمترين $W_١$ و $W_٢$.

ولكن إذا كان الحمل متزنا فإن القدرة المستهلكة من طرف الحمل ترتبط بقراءتي الجهازين حسب معامل قدرة الحمل كما يلي:

- إذا كان معامل القدرة أكبر من ٠,٥ (سواء كان مادي -حثي أو مادي -سعوي) فإن : $P=W_1+W_2$. وإذا كان الحمل مادي نقي فإن $W_1=W_2$.
- إذا كان معامل القدرة أصغر من ٠,٥ (سواء كان مادي -حثي أو مادي -سعوي) فإن أحد الجهازين (مثلا W_2) سيعطي قراءة سالبة وسيحاول مؤشره الدوران إلى الخلف، وللحصول على قراءة في هذا الجهاز يجب عكس التيار المار في أحد ملفيه. وهنا فإن $P=W_1-W_2$.
- إذا كان معامل القدرة ٠,٥ (سواء كان مادي -حثي أو مادي -سعوي) تكون قراءة أحد الجهازين صفرا وتعطى القدرة المستهلكة من طرف الحمل بقراءة الواطميتر الآخر.

مثال ٥□٣: عند قياس القدرة المستهلكة من طرف حمل ثلاثي الأطوار باستعمال طريقة الواطمترين، كانت قراءة أحد الجهازين ٦kW ، بينما كانت قراءة الآخر بعد عكس توصيل ملف تياره ٢kW. احسب القدرة المستهلكة.

الحل:

معامل قدرة الحمل أقل من ٠,٥ لأن أحد الواطمترين أعطى قراءة سالبة. أما القدرة المستهلكة فهي:

$$P = W_1 - W_2 = ٦ - ٢ = ٤\ kW$$

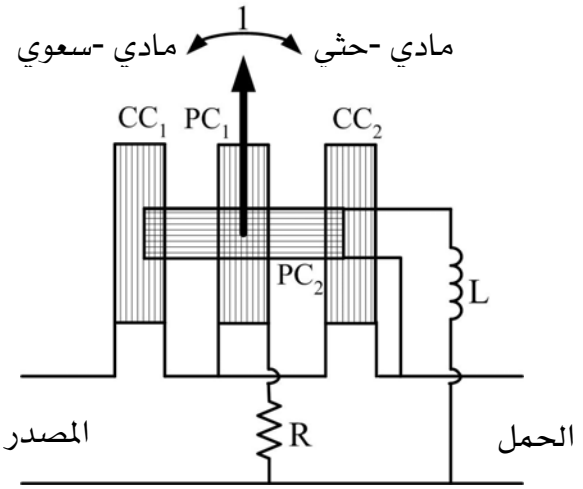
قياس معامل القدرة

تقيس أجهزة قياس معامل القدرة النسبة بين القدرة الفعالة والقدرة الظاهرية، ولأنها لا تقيس كمية معينة فإن درجة دقتها ليست عالية. ومن بين هذه الأجهزة نذكر الجهاز الكهرديناميكي الموضح في الشكل ١٧□٣، وهو يتكون من ملفين متحركين متماثلين للجهد (PC_1 وPC_2) ومن ملفين ثابتين متماثلين للتيار (CC_1 وCC_2). ويثبت الملفان PC_1 وPC_2 بحيث يكونان متعامدين ويركبان على عمود دوران مشترك، ويثبت مؤشر بعمود الدوران. وتكون تداريج المقياس بحيث تكون قراءة معامل القدرة واحد في منتصف المقياس، بينما ينحرف المؤشر إلى اليمين في حالة حمل ذي ممانعة حثية، وينحرف إلى اليسار في حالة حمل ذي ممانعة سعوية. وتوصل مقاومة مادية R على التوالي مع الملف PC_1 بينما يوصل ملف نقي ذو حثية L على التوالي مع الملف PC_2 .

وهناك ثلاث مجالات مغناطيسية في الجهاز :

- مجال Φ_i ينشئه تيار يتناسب مع تيار الحمل والمار في ملفي التيار CC_1 وCC_2. وهذا المجال له نفس طور تيار الحمل.

- مجال Φ_{V1} ينشئه تيار يمر في ملف الجهد PC_1، ويتناسب هذا التيار مع الجهد بين طرفي الحمل بسبب المقاومة العالية R. وبهذا فإن هذا المجال له نفس طور الجهد بين طرفي الحمل.
- مجال Φ_{V2} ينشئه تيار يمر في ملف الجهد PC_2، ويتأخر هذا التيار على الجهد بين طرفي الحمل بـ 90^o بسبب الحثية L. وبهذا فإن طور هذا المجال يتأخر عن طور الجهد بين طرفي الحمل بـ 90^o.



الشكل ١٧-٣: جهاز قياس معامل قدرة كهروديناميكي

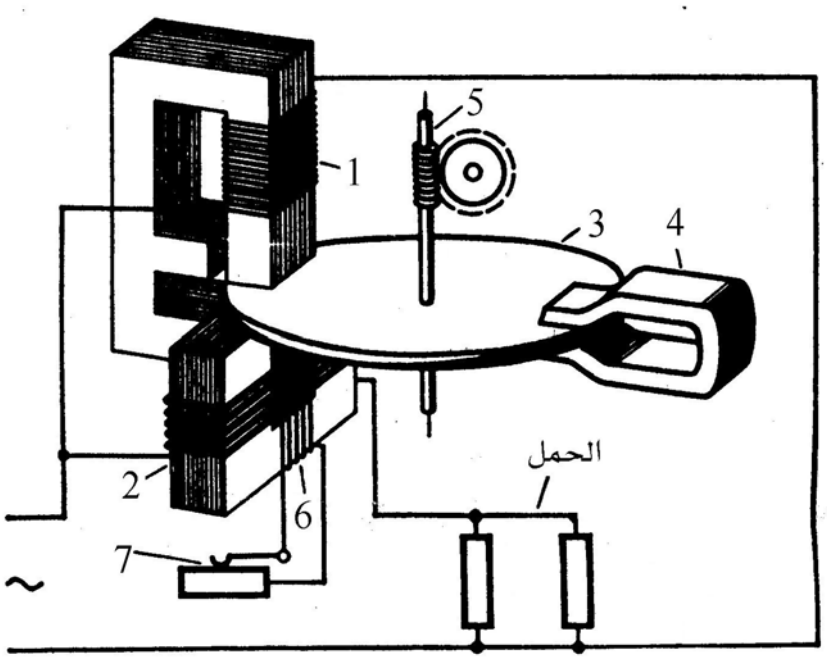
فإذا كان الحمل مادي (معامل القدرة واحد صحيح) يكون الجهد متحد الطور مع التيار وفي هذه الحالة فإن عزم الدوران سينتج عن التأثير المتبادل بين Φ_i وΦ_{V1}، وبهذا فسينطبق المجالان على نفس الخط ويبين المؤشر معامل القدرة واحدا صحيحا. أما إذا كان معامل القدرة صفرا فإن العزم سينتج عن التأثير المتبادل بين Φ_i وΦ_{V2}، وعندئذ فسينطبق المجالان على نفس الخط وينحرف المؤشر إلى اليمين (حمل حثي) أو إلى اليسار (حمل سعوي) ليبين معامل قدرة معدوم. وفي الأحوال التي تكون فيها الزاوية بين الجهد والتيار محصورة بين 0^o و 90^o، فإن الجزء المتحرك يأخذ وضعا متناسبا مع زاوية معاوقة الحمل.
وفي الأجهزة المستعملة في الأنظمة ثلاثية الأطوار نستخدم ثلاثة ملفات للتيار، وثلاثة ملفات للجهد توضع على نفس العضو الدوار، بحيث تكون الزاوية بين ملفات كل طور والآخر تساوي 120^o.

قياس الطاقة – العداد الكهربائي

نقيس الطاقة الكهربائية بالعدادات، وهي أجهزة ذات أهمية كبيرة يعتمد عليها لمحاسبة المستهلكين على كمية الطاقة المستهلكة في فترة زمنية محددة، ولهذا يجب أن تكون ذات دقة عالية.

وتعطي قيمة الطاقة غالبا بالكيلو واط-ساعة (kWh) حيث إن ١kWh هي الطاقة التي يستهلكها حمل قدرته ١kW خلال ساعة من الزمن. وهناك أنواع مختلفة من العدادات، وأكثر هذه الأنواع شيوعا واستعمالا هي العدادات الحثية.

وكما هو موضح في الشكل ١٨□٣، فإن العداد الحثي يشبه جهاز قياس القدرة الحثي وهو يتكون من : (١) مجموعة الجهد وهي تتكون من ملف مكون من عدد كبير من اللفات ملفوفة حول قلب حديدي على هيئة الحرف E. (٢) مجموعة التيار وهي تتكون من ملف يحتوي على عدد قليل من اللفات ملفوفة حول قلب حديدي على هيئة الحرف U. (٣) قرص من الألومنيوم مثبت بعمود الدوران ويدور داخل الثغرة الهوائية الموجودة بين مغناطيسي الجهد والتيار. (٤) مغناطيس دائم مثبت بالجانب المقابل لمغناطيسي الجهد والتيار لتوليد عزم التحكم في دوران القرص ؛ (٥) ترس لنقل الحركة إلى المسجل. (٦) ملفات مساعدة. (٧) منظم الحمل الحثي.



الشكل ١٨□٣: عداد الطاقة الكهربائية من النوع الحثى

ويتولد عزم الدوران نتيجة للتأثير المتبادل بين التيارات الدوامية الناتجة عن مجال أحد المغناطيسين (مغناطيس التيار أو الجهد) ومجال المغناطيس الآخر، كما في جهاز قياس القدرة. وتنقل حركة القرص عبر ترس إلى المسجل، وهو جهاز يقوم بحساب عدد الدورات وتحويلها إلى قيم مناظرة بالكيلو واط-ساعة أو مضاعفات هذه الوحدة أو كسورها.

ولكي نحصل على أكبر عزم للدوران يجب أن تكون الزاوية بين المجال المغناطيسي الناتج عن مجموعة الجهد والمجال المغناطيسي الناتج عن مجموعة التيار تساوي ٩٠^{o}، وأي اختلاف عن ٩٠^{o} بين المجالين يؤدي إلى خطأ في قراءة العداد خاصة في الأحمال الحثية، ولهذا تزود العدادات الحثية بوسيلة لضبط هذه الزاوية.

والعلاقة بين عدد الدورات التي يتمها القرص الدوار وكمية الطاقة التي يبينها المسجل يعبر عنها بقيمة عددية ثابتة تسمى ثابت العداد، وتختلف قيمتها على حسب تصميم العدادات.

مثال ٦□٣: عداد كهربائي ٢٢٠V، ٣٠A، ثابت العداد فيه ٦٠٠ لفة لكل كيلو واط-ساعة، استعمل لقياس الطاقة التي استهلكها حمل قدرته ٣٠٠٠W لمدة ٣٠ دقيقة. احسب عدد لفات القرص .

الحل:

القدرة بالكيلو واط = ٣ kW

زمن الإستهلاك بالساعة = ٠,٥

الطاقة المستهلكة بالكيلو واط-ساعة: $W = ٣ \times ٠,٥ = ١,٥ \text{ kWh}$

عدد لفات القرص = ثابت العداد × الطاقة بالكيلو واط-ساعة = ٦٠٠ × ١,٥ = ٩٠٠ لفة.

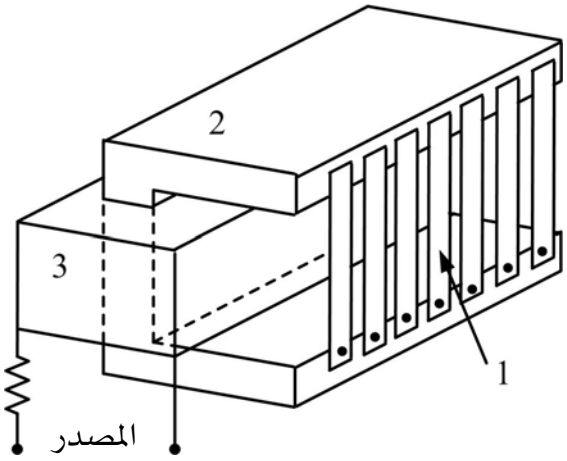
الفصل الثالث

قياس التردد وقياس المعاوقات

في هذا الفصل الأخير سنشرح كيفية قياس التردد باستعمال جهاز الريشة المهتزة ، كما نتطرق إلى طريقة دقيقة لقياس عناصر المعاوقات ألا وهي طريقة القناطر الكهربائية وسنستعمل قنطرة ماكسويل كمثال.

قياس التردد

هناك عدة أجهزة لقياس التردد تختلف في طرق تشغيلها ، ومن أهمها أجهزة القياس بريشة مهتزة المبينة في الشكل ١٩□٣ ويتكون الجهاز من مجموعة من الريش (١ في الشكل)مصنوعة من الحديد الصلب ومثبتة من أحد طرفيها. وتوضع هذه المجموعة بجوار بعضها البعض تحت أحد قطبي مغناطيس كهربائي (٢) ملفه (٣) مكون من عدد كبير من اللفات وموصل بالمصدر عبر مقاومة كبيرة القيمة. ويتم ترتيب الريش حسب درجة مرونتها. وعند توصيل ملف المغناطيسي بالمصدر المراد قياس تردده، ينشأ مجال مغناطيسي متردد يجذب الأطراف الحرة للريش الممغنطة مرة واحدة في كل دورة. وتهتز الريشة الحديدية التي يكون ترددها الطبيعي مساو لتردد المصدر بشدة أكثر من غيرها من الريش. ويمكن قراءة التردد مباشرة من مقاس مدرج موضوع أمام الريش ومرقم بالتردد الطبيعي لكل ريشة.

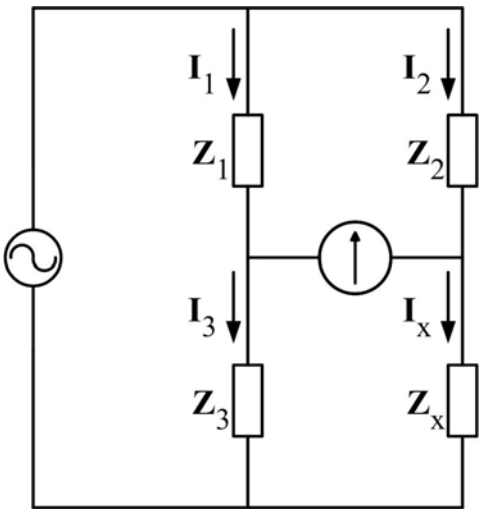


الشكل ١٩□٣ : جهاز قياس التردد بريشة

قياس المعاوقات – القناطر الكهربائية

تستخدم القناطر الكهربائية لقياس قيم العناصر الكهربائية كقيم المقاومات ، سعة المكثفات، وحثية الملفات. وكما رأينا في مادة دوائر وقياسات كهربائية-١ فإن القناطر نوع من أنواع أجهزة القياس بالمقارنة ولا تعتمد القراءة فيها على معايرة جهاز القياس ، مما يمكننا من الحصول على درجة عالية من الدقة.

ويمكن أن نمثل قنطرة تيار متردد عامة بالشكل ٢٠-٣ حيث إن مكونات المعاوقة $\mathbf{Z_X}$ هي العناصر المراد قياسها و قيم المعاوقات الأخرى معروفة وبعضها متغيرة. و هذه القنطرة شبيهة بقنطرة ويتستون ، إلا أن الأذرعة تحوي معاوقات عوضا عن مقاومات وتتم تغذية هذه المعاوقات بمصدر تيار متردد بدلا من مصدر تيار مستمر كما يتم تغيير الجلفانوميتر بكاشف تيار متردد (كاشف ac).



الشكل ٢٠□٣ : قنطرة تيار متردد عامة

ويتم تعديل إحدى المعاوقات المتغيرة حتى اتزان القنطرة ، وحينئذ تتساوى الجهود في $\mathbf{Z_1}$ و$\mathbf{Z_2}$ وكذلك الجهود في $\mathbf{Z_X}$ و $\mathbf{Z_3}$ ، أي

$\mathbf{Z_1 I_1 = Z_2 I_2}$	٣-٩
$\mathbf{Z_3 I_3 = Z_X I_X}$	٣-١٠

كما أنه لا يمر أي تيار في الكاشف

	$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_3$ $\mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_x$

و باستعمال المعادلتين الأخيرتين في المعادلة ١٠-٣ نحصل على

	$\mathbf{Z}_3\,\mathbf{I}_1 = \mathbf{Z}_x\,\mathbf{I}_2$

وبقسمة هذه الأخيرة على المعادلة ٩-٣ نستنتج المعادلة

	$\frac{\mathbf{Z}_3}{\mathbf{Z}_1} = \frac{\mathbf{Z}_x}{\mathbf{Z}_2}$

أي

٣-١١	$\mathbf{Z}_x\,\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2\,\mathbf{Z}_3$

وهناك عدة قناطر حسب اختيار نوع المعاوقات ، وفيما يلي ندرس قنطرة ماكسويل التي تستعمل كثيرا في قياس حثية ومقاومة الملفات.

قنطرة ماكسويل

كما هو مبين في الشكل ٢١-٣ فإن هذه القنطرة تمكننا من قياس حثية ومقاومة ملف ، حيث تستعمل مقاومة ومكثف متغيرتين لتحقيق الاتزان. ولو قارنها بالشكل العام ٢٠-٣ ، نستنتج أن

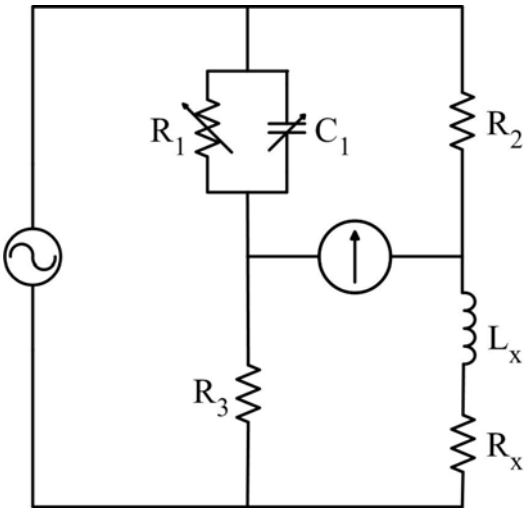
	$\mathbf{Z}_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1}$ $\mathbf{Z}_2 = R_2$ $\mathbf{Z}_3 = R_3$ $\mathbf{Z}_x = R_x + j\omega L_x$

وبالتعويض في المعادلة ١١□٣ (عند الاتزان) نحصل على

	$\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1}(R_x + j\omega L_x) = R_2\,R_3$ $R_x + j\omega L_x = \frac{R_2\,R_3}{R_1} + j\omega R_2\,R_3 C_1$

وتعطى عناصر الملف بالمعادلتين

٣-١٢	$R_x = \frac{R_2\,R_3}{R_1}$ $L_x = R_2\,R_3 C_1$



الشكل ٢١□٣ : قنطرة ماكسويل

مثال ٧□٣: أوجد قيمة الحثية والمقاومة الموصولتين على التوالي في قنطرة ماكسويل إذا كانت قيم عناصر القنطرة عند الاتزان كما يلي:

$C_1 = ٠,٠١\ \mu F$, $R_1 = ٤٧٠\ k\Omega$, $R_2 = ١٠٠\ k\Omega$, $R_3 = ٥\ k\Omega$.

الحل :

$$R_X = \frac{R_2 R_3}{R_1} = \frac{(100\times10^3)(5\times10^3)}{(470\times10^3)} = 1.06\,k\Omega$$

$$L_X = R_2 R_3 C_1 = (100\times10^3)(5\times10^3)(0.01\times10^{-6}) = 5H$$

مسائل إضافية

١□٣: لماذا لا نستطيع استعمال جهاز دي أرسنفال لقياس التيار المتردد ؟

٣-٢: أوجد قيمة المقاومة الضارية R_S الضرورية لإطالة مدى القيمة الفعالة للجهد v_S إلى $V=٢٠V$ لجهاز الملف المتحرك المزود بمعدل نصف موجة ، علما أن $R_m=٣٠٠\Omega$ و$I_{fs}=١mA$ حيث إن I_{fs} هو التيار المستمر الذي يسبب الانحراف الأقصى (full scale deviation) لجهاز الملف المتحرك.

٣-٣: لماذا تكون القوة تجاذبية مهما كان اتجاه التيار في جهاز الحديدة المتحركة من النوع التجاذبي، ولماذا هي تنافرية في الجهاز من النوع التنافري ؟

٣-٤: لماذا لا نستطيع قياس القدرة الفعالة في دوائر التيار المتردد باستعمال جهازي فولطميتر وآميتر فقط ؟

٣-٥: إذا كانت القيمة الفعالة للجهد بين طرفي حمل $V=١٢٧V$ ، وكانت القيمة الفعالة للتيار المار فيه $I=٦A$ ، وكان معامل قدرته $\cos\theta=٠,٨٥$ ، احسب القدرة التي يقيسها واطميتر كهرديناميكي حسب طريقة التوصيل المبينة في الشكل ١٤□٣، علما أن مقاومة ملف الجهد للجهاز $R_V=١٥٠٠\Omega$ ، ومقاومة ملف التيار للجهاز $R_i=٢\Omega$.

٣-٦: عند قياس القدرة المستهلكة من طرف حمل ثلاثي الأطوار متزن باستعمال طريقة الواطمترين، كانت قراءة أحد الجهازين ٤kW. احسب القدرة المستهلكة علما أن معامل قدرة الحمل واحد صحيح.

٣-٧: أوجد قيمة الحثية والمقاومة الموصولتين على التوالي في قنطرة ماكسويل المبينة في الشكل٢١-٣، إذا كانت قيم عناصر القنطرة عند الاتزان كما يلي:

$$C_١ = ٠,٠٢\ \mu F \ , \ R_١ = ٥٠٠\ k\Omega \ , \ R_٢ = ٥٠\ k\Omega \ , \ R_٣ = ٦\ k\Omega.$$

المراجع

- أساسيات الهندسة الكهربائية، الجزء الأول، هاينز جراف، ترجمة: م/إدوار قاضي و م/أمين سليم، مؤسسة الأهرام بالقاهرة
- نظريات ومسائل في الدوائر الكهربائية، جوزيف أدمنستر، سلسلة ملخصات شوم، دار ماكجروهيل للنشر
- Introductory Circuit Analysis, Boylestad, Charles E. Merrill Publishing Company
- القياسات الكهربائية و أجهزة القياس، د/زياد القاضي، د/عبد الفتاح سلمان، م/إبراهيم غريب، إبراهيم ارحيم، دار الفكر للنشر والتوزيع
- القياسات و أجهزة القياس الكهربائية، م/أحمد مختار شافعي، الأسس التكنولوجية

المحتويات

الوحدة الأولى : الكهرومغناطيسية ١
الفصل الأول : المفاهيم الأساسية للمغناطيسية ٢
القوة المغناطيسية ٢
المجال المغناطيسي ٢
الفيض المغناطيسي ٤
النفاذية ٥
شدة المجال المغناطيسي ٧
الفصل الثاني : أساسيات الكهرومغناطيسية ٩
شدة المجال الناشئ عن مرور تيار كهربائي في سلك مستقيم طويل ٩
القوة على سلك حامل لتيار في مجال مغناطيسي ١٠
القوة بين موصلين حاملين للتيار ١١
الحثية ١٣
الحث الكهرومغناطيسي ١٥
مسائل إضافية ١٧

الوحدة الثانية : مبادئ التيار المتردد وتحليل دوائره ١٨
الفصل الأول : التيار المتردد ١٩
التيار المتردد الجيبي ١٩
القيمة المتوسطة ٢٢
القيمة الفعالة للجهد المتردد والتيار المتردد ٢٢
الفصل الثاني : تحليل دوائرالتيار المتردد البسيطة ٢٥
المقاومات الأومية والحثية والسعوية في دائرة التيار المتردد ٢٥
التطبيق العام لقانون أوم على دائرة تيار متردد ٢٨
المطاور (Phasor) ٢٨
المعاوقة المركبة ٣٠
التوصيل على التوالي ٣٢

قانون توزيع الجهد ٣٧
التوصيل على التوازي ٣٧
قانون توزيع التيار ٤١
التوصيل توالي – توازي ٤٢
دوائر مقومات التيار المتردد البسيطة ٤٥
مقوم نصف موجة ٤٦
قنطرة التقويم الموجي الكامل ٤٧
الفصل الثالث : القدرة الكهربائية للتيار المتردد ٤٩
القدرة الفعالة ٤٩
القدرة الظاهرية ومعامل القدرة ٥٠
القدرة غير الفعالة ٥١
مثلث القدرة ٥٣
الفصل الرابع : دوائر التيار المتردد ثلاثي الأطوار ٥٧
تمثيل التيار المتردد ثلاثي الأطوار ٥٧
الترابط المتبادل بين الأطوار في توصيلات النجمة والدلتا ٥٨
القدرة في دائرة التيار المتردد ثلاثي الأطوار ٦٤
مسائل إضافية ٦٦

الوحدة الثالثة : قياسات التيار المتردد ٦٩
الفصل الأول : قياس التيار المتردد والجهد المتردد ٧٠
أجهزة الملف المتحرك المزود بمقوم ٧٠
الديناموميتر ٧٢
أجهزة الحديدة المتحركة ٧٤
النوع التجاذبي ٧٤
النوع التنافري ٧٥
محولات القياس ٧٧
محولات التيار ٧٧
محولات الجهد ٧٩

الفصل الثاني : قياس القدرة والطاقة ومعامل القدرة ٨٠
جهاز الواطميتر وقياس القدرة الفعالة ٨٠
الواطميتر الكهرديناميكي ٨٠
الواطميتر الحثي ٨١
قياس القدرة ٨٢
قياس القدرة في دوائر التيار المتردد ثلاثي الأطوار ٨٤
قياس معامل القدرة ٨٥
قياس الطاقة – العداد الكهربائي ٨٦
الفصل الثالث : قياس التردد وقياس المعاوقات ٨٩
قياس التردد ٨٩
قياس المعاوقات – القناطر الكهربائية ٩٠
قنطرة ماكسويل ٩١
مسائل إضافية ٩٣
المراجع ٩٥
المحتويات

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS