

Vermogen en arbeidsfactor van een sinusvormige wisselstroom

WEGWIJZER

Tot nog toe hebben we ons beperkt tot de bepaling van het vermogen bij gelijkstroom. In deze leereenheid zullen we het vermogen bepalen bij wisselstroom.

De bepaling van het vermogen bij gelijkstroom leverde geen speciale moeilijkheden op. De belastingskring was een gelijkstroomweerstand waardoor een constante stroomsterkte vloeyde. De bron leverde de energie die bv. in een weerstand vrijkwam in de vorm van warmte. Na de aansluiting van een condensator op gelijkspanning leverde de bron een kortstondige en beperkte hoeveelheid energie $W = C \cdot U^2/2$ die in de vorm van een elektrostatisch veld werd opgehoopt in de condensator. Deze energie kon weer worden afgegeven als de condensator ontladen werd. Was de aangesloten verbruiker een magnetische kring (bv. een spoel met kern), dan leverde de bron kortstondig een energie die in de magnetische kring werd opgehoopt in de vorm van magnetische veldenergie ($L \cdot I^2/2$). Deze opgehopte energie werd weer afgegeven bij het openen van de stroomkring (vonk aan de schakelaar).

Bij wisselstroom is de bepaling van het vermogen niet meer zo eenvoudig. Door de voortdurende toename en afname van de spanning zal, bij aanwezigheid van een condensator, die condensator voortdurend energie uit de bron opnemen, om ze daarna weer naar de bron terug te sturen. Bij aansluiting van een magnetische kring zal die voortdurend energie opnemen uit de bron en ze weer aan de bron afstaan. Er wordt in deze gevallen enkel energie uitgewisseld (slingerenergie of reactieve energie).

Als de verbruiker een gelijkstroomweerstand is, dan zal de door de bron geleverde energie in de vorm van warmte vrijkomen die op elk ogenblik wordt bepaald door de waarde van de stroomsterkte op dat moment ($P_j = R \cdot i^2$).

Door het voortdurend wijzigen van de stroomsterkte en de spanning moeten we in deze leereenheid het momenteel of ogenblikkelijk vermogen grondig bestuderen. Het opsplitsen van het ogenblikkelijk vermogen in twee componenten verschaft ons inzicht in het bestaan van actief en reactief vermogen.

Naargelang de samenstelling van de belasting zullen we het ogenblikkelijk vermogen met zijn actieve en reactieve componenten bepalen voor drie onderscheiden gevallen, m.n.:

- De stroom is in fase met de spanning (ohmse kring).
- De stroom is in kwadratuur met de spanning (zuiver inductieve of capacitieve kring).
- De stroom is φ graden verschoven t.o.v. de spanning (willekeurige kring).

Dat brengt ons één formule voor het actief en één formule voor het reactief vermogen die in alle belastingsgevallen kan worden toegepast. In de vermogendriehoek leggen we het verband tussen het actief, het reactief en het schijnbaar vermogen. Ook aan het begrip arbeidsfactor van een installatie en het verbeteren ervan besteden we aandacht. Als praktisch voorbeeld bespreken we de vermogens bij het gebruik van de verschillende schakelingen met tl-lampen.

7.1 Wiskundige uitwerking van het momenteel of ogenblikkelijk vermogen

Leerdoelen

Hierna kan je:

- met behulp van een wiskundig formularium het ogenblikkelijk vermogen van een inductieve kring splitsen in zijn twee componenten.
- de invloed van het tijdstip en de faseverschuivingshoek linken aan de waarde van het ogenblikkelijk vermogen.

We sluiten een sinusvormige spanning (referentiesinus) aan op een wisselstroomkring.

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

In een inductieve kring, die in de praktijk het meest voorkomt, ijlt de opgenomen stroom na op de aangelegde spanning.

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

Het momenteel of ogenblikkelijk vermogen is het product van de momentele of ogenblikkelijke waarden van de spanning en de stroom.

$$p = u \cdot i$$

$$p = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

De maximale waarde van een sinusvormige grootheid is altijd $\sqrt{2}$ maal de effectieve waarde.

$$p = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

We passen de verschilformule voor de sinus toe.

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) - \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta)$$

$$p = 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot [\sin(\omega \cdot t) \cos(\varphi) - \cos(\omega \cdot t) \sin(\varphi)]$$

De vermenigvuldiging is distributief t.o.v. de optelling.

$$p = 2 \cdot U \cdot I \cdot [\sin(\omega \cdot t) \sin(\omega \cdot t) \cos(\varphi) - \sin(\omega \cdot t) \cos(\omega \cdot t) \sin(\varphi)]$$

$$p = 2 \cdot U \cdot I \cdot [\sin^2(\omega \cdot t) \cos(\varphi) - \sin(\omega \cdot t) \cos(\omega \cdot t) \sin(\varphi)]$$

Uit de formules voor de dubbele hoek leiden we af:

$$\cos(2 \cdot \alpha) = \cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha)$$

met $\sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) = 1$ of $\cos^2(\alpha) = 1 - \sin^2(\alpha)$ wordt dit

$$\cos(2 \cdot \alpha) = 1 - \sin^2(\alpha) - \sin^2(\alpha) = 1 - 2 \cdot \sin^2(\alpha) \text{ zodat}$$

$$\sin^2(\alpha) = \frac{1 - \cos(2 \cdot \alpha)}{2}$$

en

$$\sin(2 \cdot \alpha) = 2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \text{ zodat}$$

$$\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) = \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{2}$$

$$p = 2.U.I \left[\frac{1 - \cos(2.\omega.t)}{2} . \cos(\varphi) - \frac{\sin(2.\omega.t)}{2} . \sin(\varphi) \right]$$

Het ogenblikkelijk of momenteel vermogen bestaat uit twee componenten

$$p = p_1 - p_2$$

met

$$p_1 = U.I.\cos(\varphi).[1 - \cos(2.\omega.t)]$$

$$p_2 = U.I.\sin(\varphi).[\sin(2.\omega.t)]$$

Uit de formules blijkt dat het momenteel vermogen niet enkel een tijdsfunctie $p = f(t)$ is, maar dat het ook afhankelijk is van de faseverschuivingshoek φ . In wisselstroomkringen is de faseverschuivingshoek gelegen tussen $-\pi/2$ rad of -90° en $+\pi/2$ rad of $+90^\circ$. In de volgende paragrafen bestuderen we het ogenblikkelijk vermogen als de spanning en de stroom in fase of in kwadraatuur zijn en zullen we beide componenten van het momenteel vermogen linken aan het actief en reactief vermogen.

7.2 Vermogen als spanning en stroom in fase zijn

Leerdoelen

Hierna kan je:

- toelichten waarom we het ogenblikkelijk vermogen niet kunnen voorstellen op het vectorendiagram van de spanning en de stroom.
- de momentele waarden van de spanning, de stroom en het vermogen voorstellen in een tijdsdiagram als de spanning en stroom in fase zijn.
- het begrip gemiddeld vermogen in wisselstroom toelichten.
- de gemiddelde waarde van het wisselstroomvermogen bepalen als de spanning en stroom in fase zijn.
- de betekenis van het actief vermogen toelichten.
- het symbool en de eenheid van het actief vermogen weergeven.
- het symbool en de eenheid van de verbruikte elektrische energie of geleverde arbeid weergeven.

In zuiver ohmse kringen of RLC-kringen in resonantie is de spanning in fase met de stroom; $\varphi = 0$. Het momenteel vermogen p is in dergelijke wisselstroomkringen gelijk aan de component p_1 , want $p_2 = 0$, omdat $\sin \varphi = 0$ (7.1). Omdat $\cos \varphi = 1$ wordt het momenteel vermogen dan:

$$p = U.I [1 - \cos(2.\omega.t)]$$

Uit de formule blijkt duidelijk dat de pulsatie (frequentie) van het momenteel vermogen het dubbele is van de pulsatie (frequentie) van de spanning en de stroom. Dat heeft als gevolg dat we het vermogen niet kunnen voorstellen op het vectorendiagram van de spanning en de stroom.

De cosinusfunctie varieert tussen -1 en $+1$. De functie $1 - \cos(2.\alpha)$ varieert tussen $1 - (-1) = 2$ en $1 - (+1) = 0$, zodat het momenteel vermogen varieert tussen 0 en $2.U.I$.

In figuur 7.1 stellen we de momentele waarden van de spanning, de stroom en het vermogen voor in een tijdsdiagram.

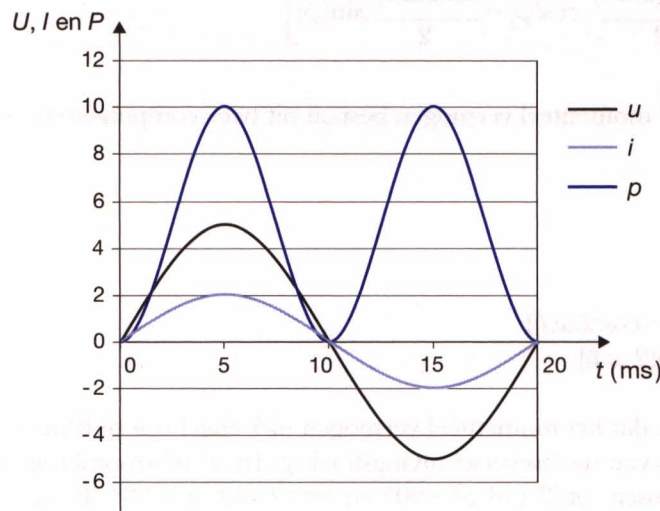


Fig. 7.1 Momenteel vermogen als spanning en stroom in fase zijn

Uit figuur 7.1 blijkt duidelijk dat het momenteel vermogen altijd positief is. De gelijkstroomweerstand in de kring nemen elektrische energie op uit de bron en zetten die om in een andere energievorm; ze verbruiken de energie. Zo kunnen we de elektrische energie omzetten in een gewenste vorm. Het vermogen dat omgezet wordt door gelijkstroomweerstand in een wisselstroomkring noemen we dan ook het actief vermogen. Het gemiddeld actief vermogen is de waarde van het constante vermogen dat in eenzelfde tijd eenzelfde energie zou leveren. Om de gemiddelde waarde van het momenteel vermogen te bepalen gaan we te werk zoals beschreven in 2.6.2. Het kan een goede oefening zijn het gemiddeld vermogen eens te berekenen. Op figuur 7.2 zie je duidelijk dat de gemiddelde waarde van het momenteel vermogen gelijk is aan de helft van de maximale waarde ($2 \cdot U \cdot I$).

Het actief vermogen stellen we voor door P en drukken we uit in watt (W).

$$P = P_{\text{lgem}}$$

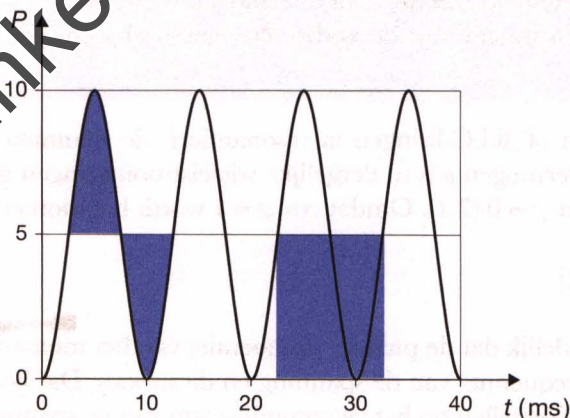


Fig. 7.2 Gemiddelde waarde van het momenteel vermogen als spanning en stroom in fase zijn

Als de spanning en de stroom in een wisselstroomkring niet verschoven zijn, is het actief vermogen het product van de effectieve waarden van de aangelegde spanning en de opgenomen of geleverde stroom.

$$P = U \cdot I \text{ (W)}$$

De verbruikte elektrische energie meten we met een kWh-meter.
Een kilowattuur is gelijk aan een verbruik van 3600 kilojoule of 3600 kWh.

$$W = P \cdot t \text{ (Ws)}$$

met de tijd in uur wordt W uitgedrukt in (Wh).

7.3 Vermogen als spanning en stroom in kwadratuur zijn

Leerdoelen

Hierna kan je:

- de momentele waarden van de spanning, de stroom en het vermogen voorstellen in een tijdsdiagram als de spanning en stroom in kwadratuur zijn.
- de maximale waarde van het ogenblikkelijke vermogen berekenen als de spanning en stroom in kwadratuur zijn.
- de betekenis van het reactief vermogen toelichten.
- het symbool en de eenheid van het reactief vermogen weergeven.
- het bestaan van blinde, reactieve of slingerenergie toelichten.
- toelichten dat het reactief vermogen van een kring het verschil is van de reactieve vermogens van de spoelen en de condensatoren.

7.3.1 Vermogen in zuiver inductieve kringen

In zuiver inductieve kringen ijlt de spanning $\pi/2$ rad of 90° voor op de stroom, $\varphi = +\pi/2$ rad of $+90^\circ$. Het momenteel vermogen is in dergelijke kringen gelijk aan het tegengestelde van de component p_2 , want $p_1 = 0$, omdat $\cos\varphi = 0$ (7.1). Omdat $\sin\varphi = 1$ wordt het momenteel vermogen dan:

$$p = -U \cdot I \cdot [\sin(2 \cdot \omega \cdot t)]$$

Uit de formule blijkt dat het momenteel vermogen zuiver sinusvormig is met een pulsatie (frequentie) die het dubbele is van de pulsatie (frequentie) van de spanning en de stroom. De maximale waarde van het momenteel vermogen is gelijk aan $U \cdot I$.

In figuur 7.3 stellen we de momentele waarden van de spanning, de stroom en het vermogen voor in een tijdsdiagram. Uit figuur 7.3 blijkt dat het momenteel vermogen zowel positieve als negatieve waarden heeft. Als het momenteel vermogen positief is, neemt de ideale spoel energie op uit de bron. Als het momenteel vermogen negatief is, stuurt de ideale spoel energie terug naar de bron. Aangezien het momenteel vermogen sinusvormig verloopt is de gemiddelde waarde ervan nul, zodat de ideale spoel alle energie die ze opneemt uit de bron ook terugstuurt naar de bron. De ideale spoel gebruikt de energie om zich te verzetten tegen (te reageren op, een reactie te veroorzaken tegen) stroomveranderingen. Het vermogen dat ontwikkeld wordt door de ideale spoelen in een wisselstroomkring noemen we dan ook het reactief vermogen. Bij het actief vermogen hebben we de gemiddelde waarde van het momenteel vermogenverloop gebruikt als maat voor de verbruikte energie. Bij het reactief vermogen is de gemiddelde waarde van het momenteel vermogenverloop over één periode gelijk aan nul. Aangezien de energie 'slingert' tussen bron en belasting, gebruiken we als maat voor de gebruikte energie de maximale waarde ($U \cdot I$) van het momenteel vermogen. Het momenteel vermogen is een zuivere sinusfunctie. In de wiskundige vergelijking van een zuivere sinusfunctie is de factor die vermenigvuldigd wordt met de sinus van de hoek gelijk aan de maximale waarde.

Het reactief vermogen stellen we voor door Q (van het Engelse quadrature) en drukken we uit in voltampèrereactief (var). Soms wordt ook P_Q als symbool voor het reactief vermogen gebruikt.

$$Q = P_{2m}$$

In een zuiver inductieve kring is het reactief vermogen gelijk aan het product van de effectieve waarden van de aangelegde spanning en de bronstroom.

$$Q = U.I \text{ (var)}$$

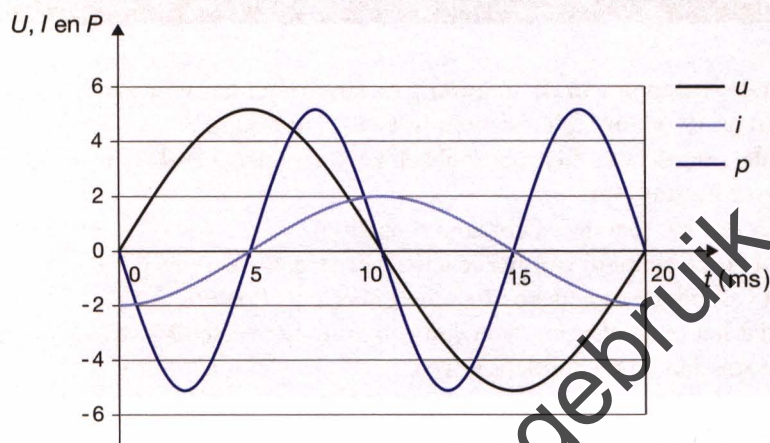


Fig. 7.3 Momenteel vermogen als de spanning 90° voorijlt op de stroom

7.3.2 Vermogen in zuiver capacitieve kringen

In zuiver capacitieve kringen ijlt de spanning $\pi/2$ rad of 90° na op de stroom, $\varphi = -\pi/2$ rad of -90° . Het momenteel vermogen is in dergelijke kringen gelijk aan de component p_2 (7.1). De component $p_1 = 0$, omdat $\cos \varphi = 0$. In vergelijking met de zuiver inductieve kring is de faseverschuivingshoek en dus ook de $\sin \varphi$ tegengesteld bij de zuiver capacitieve kring, zodat $p = -(-p_2) = p_2$.

Omdat $\sin \varphi = -1$ wordt het momenteel vermogen dan:

$$p = U.I. [\sin(2\omega t)]$$

Uit de formule blijkt dat het momenteel vermogen zuiver sinusvormig is met een pulsatie (frequentie) die het dubbele is van de pulsatie (frequentie) van de spanning en de stroom. De maximale waarde van het momenteel vermogen is gelijk aan $U.I.$

In figuur 7.4 stellen we de momentele waarden van de spanning, de stroom en het vermogen voor in een tijdsdiagram. Uit figuur 7.4 blijkt dat het momenteel vermogen zowel positieve als negatieve waarden heeft. Als het momenteel vermogen positief is, neemt de ideale condensator energie op uit de bron. Als het momenteel vermogen negatief is, stuurt de ideale condensator energie terug naar de bron. Aangezien het momenteel vermogen sinusvormig verloopt is de gemiddelde waarde ervan nul, zodat de ideale condensator alle energie die hij opneemt uit de bron ook terugstuurt naar de bron.

Bij toenemende spanning (0 tot 5 ms op figuur 7.4) zal de condensator zich opladen. Bij $t = 5$ ms is hij opgeladen. De opgehoopte energie kwam van de bron. Van 5 tot 10 ms daalt de aangelegde spanning. Dan geeft de condensator de opgehoopte energie weer af aan de bron. Dat verschijnsel zal zich vanaf nu blijven herhalen. Er wordt dus een bepaalde hoeveelheid energie heen en weer

geslingerd tussen de condensator en de bron. Die energie wordt niet omgezet in een andere vorm van arbeid; ze wordt dan ook soms blinde energie of slinger-energie genoemd. Een gelijkaardig verschijnsel doet zich voor bij een ideale spoel op wisselspanning. Hier wordt de opgehoopte magnetische veldenergie tussen de bron en de spoel uitgewisseld.

De ideale condensator gebruikt de energie om zich te verzetten tegen (te reageren op, een reactie te veroorzaken tegen) spanningsveranderingen. Het vermogen dat ontwikkeld wordt door de ideale condensatoren in een wisselstroomkring noemen we dan ook het reactief vermogen. Bij het reactief vermogen gebruiken we de maximale waarde ($U.I$) van het momenteel vermogen als maat voor de gebruikte energie. Het momenteel vermogen is een zuivere sinusfunctie. In de wiskundige vergelijking van een zuivere sinusfunctie is de factor die vermenigvuldigd wordt met de sinus van de hoek gelijk aan de maximale waarde.

Het reactief vermogen stellen we voor door Q (van het Engelse quadrature) en drukken we uit in voltampèrereactief (var). Soms wordt ook P_Q als symbool voor het reactief vermogen gebruikt.

$$Q = P_{2m}$$

In een zuiver capacatieve kring is het reactief vermogen gelijk aan het product van de effectieve waarden van de aangelegde spanning en de bronstroom.

$$Q = U.I \text{ (var)}$$

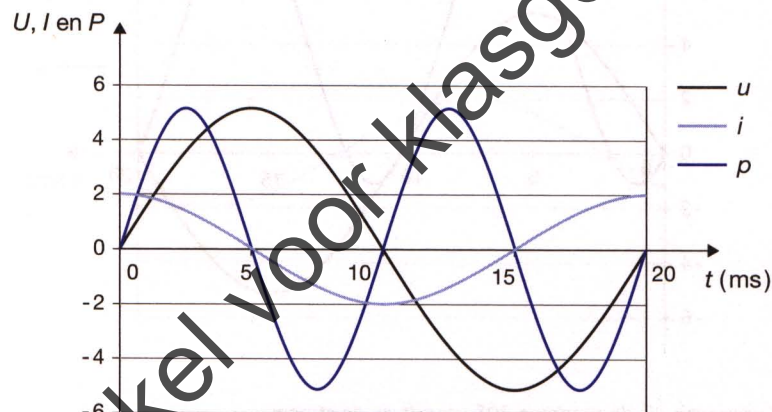


Fig. 7.4 Momenteel vermogen als de spanning 90° naait op de stroom

7.3.3 Reactief vermogen

Reactief vermogen komt zowel in zuiver inductieve kringen (met een inductieve reactantie, X_L) als in zuiver capacatieve kringen (met een capacatieve reactantie, X_C) voor. Als we dezelfde spanning (referentiesinus) aansluiten op een zuiver inductieve en een zuiver capacatieve kring, dan blijkt uit de figuren 7.3 en 7.4 dat het momenteel vermogen van de zuiver inductieve kring op elk ogenblik tegengesteld is aan het momenteel vermogen van de zuiver capacatieve kring.

Als we het reactief vermogen van een spoel als positief beschouwen, dan moeten we het reactief vermogen van een condensator als negatief beschouwen.

Als condensatoren en spoelen samen voorkomen in een wisselstroomkring, dan is het reactief vermogen het verschil van de reactieve vermogens van de spoelen Q_L en de condensatoren Q_C .

$$Q = Q_L - Q_C$$

7.4 Vermogen bij een willekeurige faseverschuiving

Leerdoelen

Hierna kan je:

- de invloed van de faseverschuiving op het ogenblikkelijk vermogen toelichten.
- de invloed van de faseverschuiving op het actief en reactief vermogen toelichten.
- het actief en reactief vermogen van een wisselstroom waarin de stroom φ graden verschoven is t.o.v. de spanning berekenen met de effectieve waarden van de spanning en de stroom.
- de vermogendriehoek van een eenfasige belasting tekenen.
- het symbool en de eenheid van het schijnbaar vermogen weergeven.
- het onderling verband tussen actief, reactief en schijnbaar vermogen verduidelijken.

7.4.1 Invloed van de faseverschuiving op het ogenblikkelijk vermogen

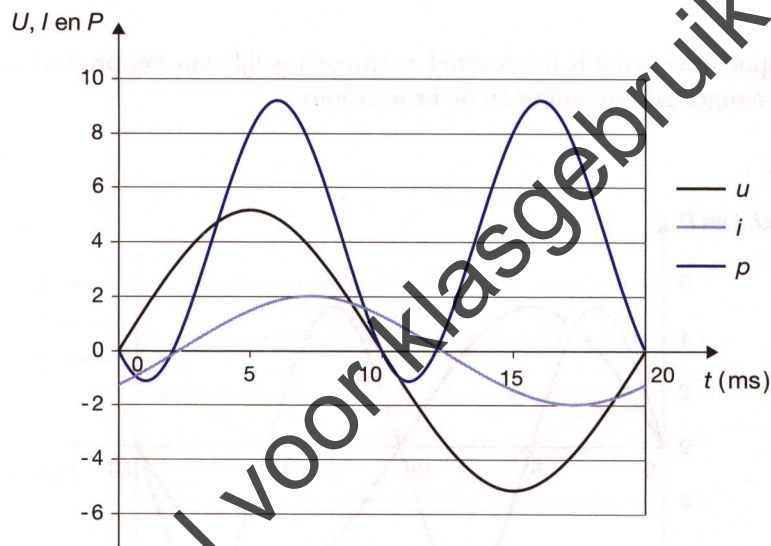


Fig. 7.5 Momenteel vermogen als de spanning 30° voorijlt op de stroom

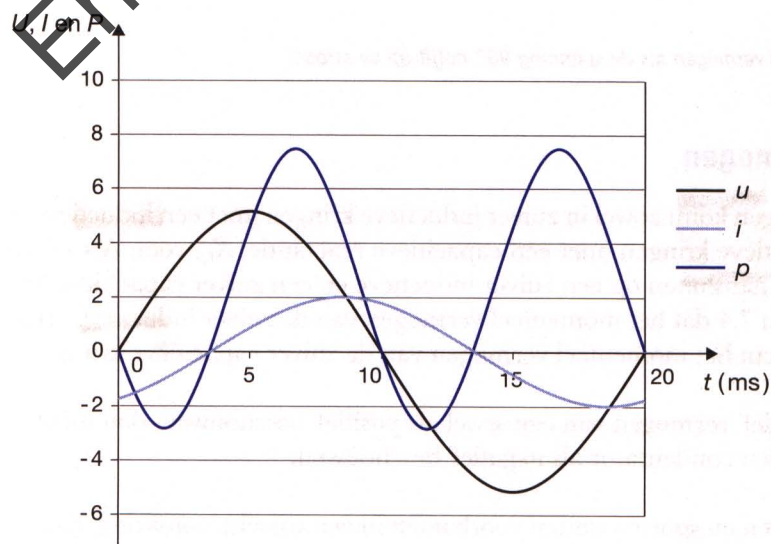


Fig. 7.6 Momenteel vermogen als de spanning 60° voorijlt op de stroom

Als de faseverschuiving vergroot (van 30° naar 60°), blijft de vorm van de grafiek van het ogenblikkelijk vermogen in het vermogen-tijd-diagram identiek, maar verschuift de grafiek naar beneden (figuren 7.5 en 7.6).

Als de spanning en de stroom niet verschoven zijn, ligt de grafiek van het ogenblikkelijk vermogen in het vermogen-tijd-diagram rakend aan en boven de tijdsas (figuur 7.1).

Als de spanning en de stroom 90° verschoven zijn, ligt de grafiek van het ogenblikkelijk vermogen in het vermogen-tijd-diagram symmetrisch tegenover de tijdsas (figuren 7.3 en 7.4).

7.4.2 Invloed van de faseverschuiving op het actief en reactief vermogen

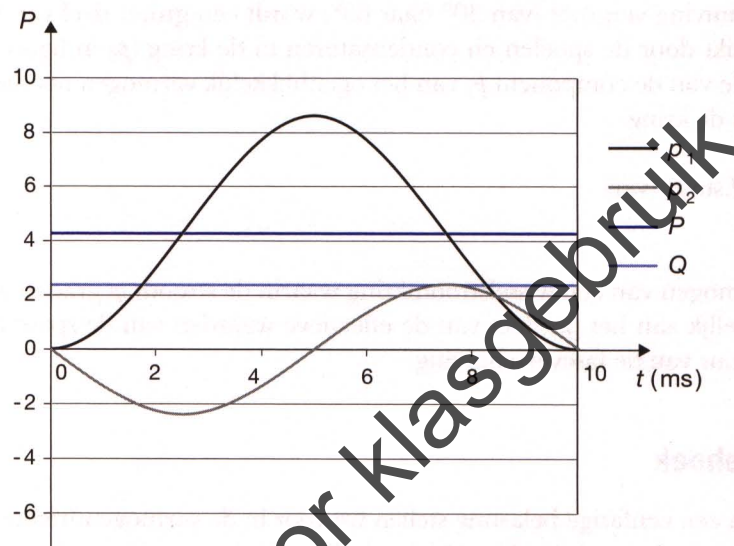


Fig. 7.7 Actief en reactief vermogen als de spanning 30° voorijlt op de stroom

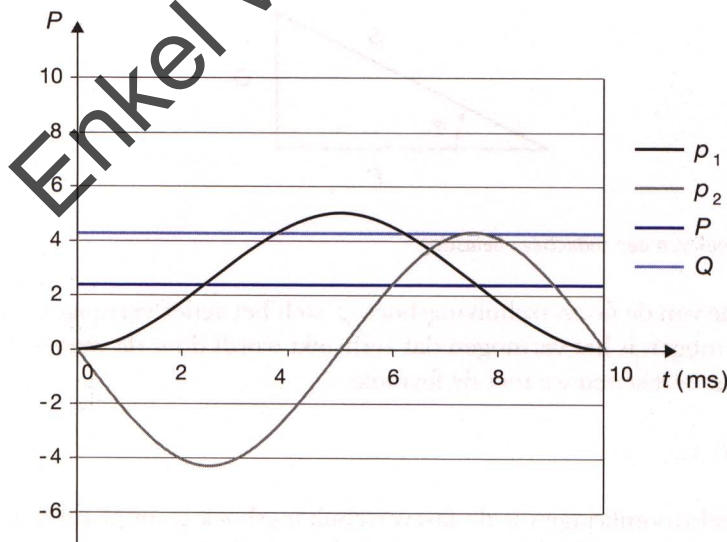


Fig. 7.8 Actief en reactief vermogen als de spanning 60° voorijlt op de stroom

Als de faseverschuiving vergroot (van 30° naar 60°), wordt een kleiner deel van het ogenblikkelijk vermogen verbruikt door de weerstanden in de kring (p_1 in figuren 7.7 en 7.8). De gemiddelde waarde van de component p_1 van het ogenblikkelijk vermogen noemen we het actief vermogen P van de kring.

$$P = P_{\text{lgem}} = \frac{P_{\text{lm}}}{2} = \frac{U.I.\cos\varphi \cdot [1 - (-1)]}{2} = U.I.\cos\varphi \text{ (W)}$$

Samengevat:

Het actief vermogen van een wisselstroomkring waarin de stroom φ graden verschoven is t.o.v. de spanning is gelijk aan het product van de effectieve waarden van de spanning en de stroomsterkte met de cosinus van de faseverschuiving.

Als de faseverschuiving vergroot (van 30° naar 60°) wordt een groter deel van het ogenblikkelijk vermogen gebruikt door de spoelen en condensatoren in de kring (p_2 in figuren 7.7 en 7.8). De maximale waarde van de component p_2 van het ogenblikkelijk vermogen noemen we het reactief vermogen Q van de kring.

$$Q = P_{2m} = U.I.\sin\varphi \text{ (var)}$$

Samengevat:

Het reactief vermogen van een wisselstroomkring waarin de stroom φ graden verschoven is t.o.v. de spanning is gelijk aan het product van de effectieve waarden van de spanning en de stroomsterkte met de sinus van de faseverschuiving.

7.4.3 Vermogendriehoek

De vermogens in een eenfasige belasting stellen we voor in de vermogendriehoek (figuur 7.9). De vermogendriehoek is een rechthoekige driehoek die we tekenen uitgaande van de faseverschuivingshoek φ .

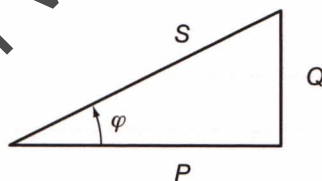


Fig. 7.9 Vermogendriehoek van een inductieve belasting

De aanliggende zijde van de faseverschuivingshoek φ stelt het actief vermogen P van de belasting voor. Het actief vermogen is het vermogen dat verbruikt wordt door de weerstanden in de kring. Het actief vermogen berekenen we met de formule:

$$P = U.I.\cos\varphi \text{ (W)}$$

In willekeurige wisselstroomkringen is de faseverschuivingshoek φ altijd gelegen tussen -90° en $+90^\circ$ of $-\pi/2$ rad en $+\pi/2$ rad. De cosinus van de faseverschuiving en het actief vermogen zijn dan ook altijd positief. Het actief vermogen tekenen we in de vermogendriehoek horizontaal en naar rechts gericht ten opzichte van de faseverschuivingshoek.

De overstaande zijde van de faseverschuivingshoek φ stelt het reactief vermogen Q van de belasting voor. Het reactief vermogen is het vermogen dat gebruikt wordt door de ideale spoelen en condensatoren in de kring. Het reactief vermogen berekenen we met de formule:

$$Q = UI \sin \varphi \text{ (var)}$$

In een wisselstroomkring die zich inductief gedraagt is de faseverschuivingshoek gelegen tussen 0 en $+90^\circ$ of 0 en $+\pi/2$ rad. De sinus van de faseverschuiving en het reactief vermogen zijn dan ook altijd positief. Het reactief vermogen van een spoel (Q_L) tekenen we in de vermogendriehoek verticaal en naar boven gericht.

In een wisselstroomkring die zich capacitief gedraagt is de faseverschuivingshoek gelegen tussen 0 en -90° of 0 en $-\pi/2$ rad. De sinus van de faseverschuiving en het reactief vermogen zijn dan ook altijd negatief. Het reactief vermogen van een condensator (Q_C) tekenen we in de vermogendriehoek verticaal en naar beneden gericht.

De lengte van de schuine zijde van de vermogendriehoek kunnen we berekenen met de stelling van Pythagoras:

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2} = \sqrt{(UI)^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} = UI$$

De schuine zijde van de vermogendriehoek stelt een vermogen voor dat blijkbaar of schijnbaar gelijk is aan het vermogen in gelijkstroomkringen. Dit vermogen noemen we het schijnbaar vermogen. Het schijnbaar vermogen stellen we voor door S en kunnen we bepalen door de aangelegde spanning te meten met een voltmeter en de stroomsterkte van de opgenomen stroom te meten met een ampèremeter. De eenheid van het schijnbaar vermogen is de voltampère, waarvoor we het symbool VA gebruiken.

$$S = UI \text{ (VA)}$$

Het schijnbaar vermogen is een combinatie van het actief en het reactief vermogen die door de leidingen getransporteerd wordt.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi$$

Toelichting

Zijden van de vermogendriehoek

In de spanningsdriehoek (van een seriekring) en de stroomdriehoek (van een parallelkring) stellen we de zijden voor door vectoren, omdat de spanningen en de stromen sinusvormige grootheden zijn. De zijden van de vermogendriehoek zijn geen sinusvormige grootheden; we stellen ze dan ook niet voor door vectoren. Als een zijde van de vermogendriehoek samengesteld is uit verschillende componenten, duiden we de componenten meestal aan met een pijl. Een voorbeeld hiervan vind je in figuur 7.14 terug.

7.5 De arbeidsfactor

Leerdoelen

Hierna kan je:

- het begrip arbeidsfactor definiëren.
- de invloed van de arbeidsfactor op de stroomsterkte toelichten.
- de invloed van de arbeidsfactor op het vermogen dat de elektriciteitsmaatschappij moet leveren toelichten.
- aantonen waarom de elektriciteitsmaatschappijen van hun afnemers eisen dat de waarde van de arbeidsfactor van hun installatie groter is dan 0,9.
- toelichten waarom de arbeidsfactor van een huishoudelijke installatie meestal betrekkelijk goed is.
- toelichten waarom de arbeidsfactor van een industriële installatie meestal slecht is.
- de energiedriehoek van een elektrische installatie tekenen.
- toelichten hoe de energieleveranciers de gemiddelde arbeidsfactor over een bepaalde periode berekenen.
- het verbeteren van de arbeidsfactor door de parallelschakeling van condensatoren verduidelijken.
- het reactief vermogen berekenen van de condensator die nodig is om de arbeidsfactor tot een bepaalde waarde te verbeteren.
- de capaciteit berekenen van de condensator die nodig is om de arbeidsfactor tot een bepaalde waarde te verbeteren.

7.5.1 Definitie

We hebben onthouden dat het actief vermogen in de belasting in grote mate afhangt van de faseverschuivingshoek φ . De cosinus van de faseverschuivingshoek noemen we de arbeidsfactor.

$$\text{arbeidsfactor} = \cos \varphi$$

Het getal dat de arbeidsfactor aangeeft zal dus variëren tussen 0 en 1.

De arbeidsfactor is nul als $\cos \varphi = 0$; dit is het geval als $\varphi = +/ -90^\circ$ of $+/ -\pi/2$ rad (zuiver inductieve of capacatieve kringen).

De arbeidsfactor is 1 als $\cos \varphi = 1$; dit is het geval als $\varphi = 0^\circ$ of 0 rad (zuiver ohmse kringen).

Alle tussenliggende waarden zijn mogelijk naar gelang van de samenstelling van de belasting, m.a.w. de arbeidsfactor wordt bepaald door de aangesloten verbruikers.

Volgens de vermogendriehoek van figuur 7.9 mogen we besluiten dat:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

De arbeidsfactor is de verhouding van het actief tot het schijnbaar geleverde vermogen.

7.5.2 Invloed van de arbeidsfactor op de stroomsterkte

We veronderstellen dat we in een verbruiker een vermogen van 10 kW moeten ontwikkelen bij een spanning van 200 V.

We berekenen de waarde van de opgenomen stroom als dat moet gebeuren met een arbeidsfactor van respectievelijk 1; 0,8; 0,5 en 0,2.

$$\text{Bij } \cos\varphi_1 = 1 \text{ is } I_1 = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi_1} = \frac{10000}{200 \cdot 1} = 50 \text{ A}$$

$$\text{Bij } \cos\varphi_2 = 0,8 \text{ is } I_2 = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi_2} = \frac{10000}{200 \cdot 0,8} = 62,5 \text{ A}$$

$$\text{Bij } \cos\varphi_3 = 0,5 \text{ is } I_3 = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi_3} = \frac{10000}{200 \cdot 0,5} = 100 \text{ A}$$

$$\text{Bij } \cos\varphi_4 = 0,2 \text{ is } I_4 = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi_4} = \frac{10000}{200 \cdot 0,2} = 250 \text{ A}$$

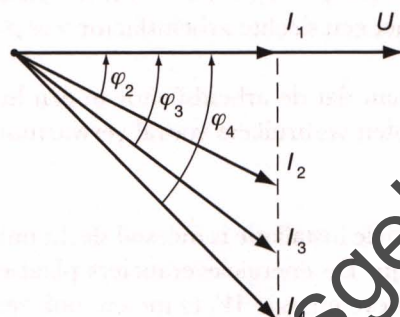


Fig. 7.10 Invloed van de arbeidsfactor op de stroomsterkte

Uit de resultaten en de vectoriële voorstelling ervan (figuur 7.10) blijkt duidelijk dat de stroomsterkte die nodig is om een bepaald actief vermogen onder een bepaalde spanning te ontwikkelen, snel toeneemt als de arbeidsfactor kleiner wordt.

Het praktische gevolg is dat de doorsnede van de leiding voor het leveren van een bepaald actief vermogen zal toenemen als de arbeidsfactor kleiner wordt. In de praktijk proberen we daarom de arbeidsfactor van het net zo groot mogelijk te krijgen door hem met hulpmiddelen (bv. condensatoren parallel met de verbruiker) te verbeteren. De arbeidsfactor van het toestel en de stroomsterkte die het toestel opneemt, kunnen we niet wijzigen omdat die eigen zijn aan de belasting.

7.5.3 Invloed van de arbeidsfactor op het vermogen dat de elektriciteitsmaatschappij moet leveren

We veronderstellen dat een distributienetbeheerder beschikt over een geïnstalleerd vermogen $S = 1 \text{ MVA} = 1000 \text{ kVA}$ onder een spanning van 10 kV .

Als de arbeidsfactor van de aangesloten verbruikers gelijk is aan 1, dan kan hij een actief vermogen van $P = S \cdot \cos\varphi_1 = 1000 \cdot 1 = 1000 \text{ kW}$ ter beschikking stellen. Per dag is de geleverde energie $W = P \cdot t = 1000 \cdot 24 = 24000 \text{ kWh}$.

Als $\cos\varphi_2 = 0,8$ de gemiddelde arbeidsfactor van de aangesloten verbruikers is, dan kan hij een actief vermogen van $P = S \cdot \cos\varphi_2 = 1000 \cdot 0,8 = 800 \text{ kW}$ ter beschikking stellen. Per dag kan hij met hetzelfde geïnstalleerd vermogen een energie leveren van $W = P \cdot t = 800 \cdot 24 = 19200 \text{ kWh}$.

Als $\cos\varphi_3 = 0,5$ de gemiddelde arbeidsfactor van de aangesloten verbruikers is, dan kan hij een actief vermogen van $P = S \cdot \cos\varphi_3 = 1000 \cdot 0,5 = 500 \text{ kW}$ ter beschikking stellen. Per dag kan hij met hetzelfde geïnstalleerd vermogen een energie leveren van $W = P \cdot t = 500 \cdot 24 = 12000 \text{ kWh}$.

Het actief vermogen dat de elektriciteitsmaatschappij ter beschikking kan stellen, daalt met de waarde van de arbeidsfactor van de elektrische installatie van de energieafnemers.

Omdat de elektriciteitsmaatschappij enkel de geleverde energie (kWh) in de prijsberekening in aanmerking kan nemen, ondervindt zij vooral het nadeel van de kleine arbeidsfactor van de elektrische installatie van de energieafnemers. Een logisch gevolg is dat de elektriciteitsmaatschappij van haar afnemers gaat eisen dat de arbeidsfactor van hun elektrische installatie voldoende hoog is. De reactieve energie ($Q \cdot t$) mag niet groter zijn dan de helft van de actieve energie ($P \cdot t$). Dit geeft als voorwaarde:

$$Q < 0,5 \cdot P \Rightarrow \frac{P}{Q} > 0,5 \Rightarrow \frac{S \cdot \sin \varphi}{S \cdot \cos \varphi} < 0,5 \Rightarrow \tan \varphi < 0,5 \Rightarrow \varphi < 26,57^\circ \Rightarrow \cos \varphi > 0,9$$

De belastingen die aangesloten zijn op het elektriciteitsnet kunnen we onderverdelen in belastingen met een goede arbeidsfactor ($\cos \varphi \approx 1$), zoals verwarmingstoestellen en gloeilampen of halogeenlampen, en belastingen met een slechte arbeidsfactor ($\cos \varphi < 1$), zoals elektrische motoren en tl-lampen.

De energieleveranciers nemen aan dat de arbeidsfactor in een huishoudelijke installatie betrekkelijk goed is omdat de aangesloten verbruikers vooral verwarmingstoestellen en gloeilampen of halogeenlampen zijn.

De arbeidsfactor van een industriële installatie is meestal slecht omdat de aangesloten verbruikers vooral motoren en tl-lampen zijn. De energieleveranciers plaatsen in een industriële installatie naast een kWh-teller (om de actieve energie W_a te meten) ook een kvarh-teller (om de reactieve energie W_r te meten).

Als we de zijden van de vermogendriehoek vermenigvuldigen met de beschouwde tijd, dan krijgen we een energiedriehoek (figuur 7.11).

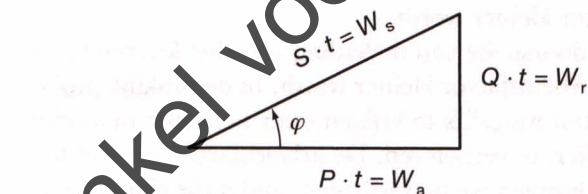


Fig. 7.11 Energiedriehoek

Na de meteropname bepalen ze de gemiddelde $\cos \varphi$ van de meetperiode:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P \cdot t}{S \cdot t} = \frac{W_a}{W_s} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}}$$

Industriële energieafnemers moeten dan meer betalen per verbruikte kWh afhankelijk van de afwijking van de waarde van de $\cos \varphi$.

7.5.4 Het verbeteren van de arbeidsfactor

a Principe

Een capacatieve belasting komt bijna nooit voor op het net. De arbeidsfactor van een inductieve last kunnen we verbeteren door een of meerdere condensatoren parallel over de belasting te schakelen. De schakeling noemen we een parallelcompensatie.

Figuur 7.12 stelt het elektrisch schema voor van de schakeling die we gebruiken om de arbeidsfactor van een inductieve belasting te verbeteren.

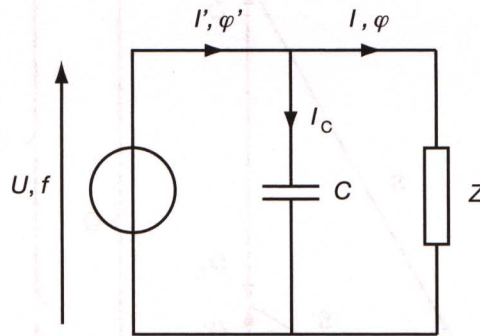


Fig. 7.12 Elektrisch schema van het verbeteren van de $\cos\varphi$ bij inductieve belasting

De inductieve belasting met impedantie Z , die aangesloten is op een wisselspanningsbron met spanning U en frequentie f , neemt uit de bron een stroom met stroomsterkte I op, die over een hoek φ naaijlt op de aangelegde spanning. Om de arbeidsfactor te verbeteren schakelen we een condensator met capaciteit C parallel op de inductieve belasting. De condensator die op dezelfde bronspanning aangesloten is neemt een stroom met stroomsterkte I_C op uit de bron die 90° of $\pi/2$ rad voorijlt op de aangelegde spanning. De stroom I' die de condensator en de inductieve belasting samen uit de bron opnemen is de resultante van I en I_C .

Uit het vectorendiagram van figuur 7.13 blijkt dat door het inschakelen van de condensator de stroomsterkte afgenomen is van I tot I' en de faseverschuiving verkleind is van φ tot φ' of de arbeidsfactor verbeterd is van $\cos\varphi$ tot $\cos\varphi'$ (als $I_C < I \cdot \sin\varphi$).

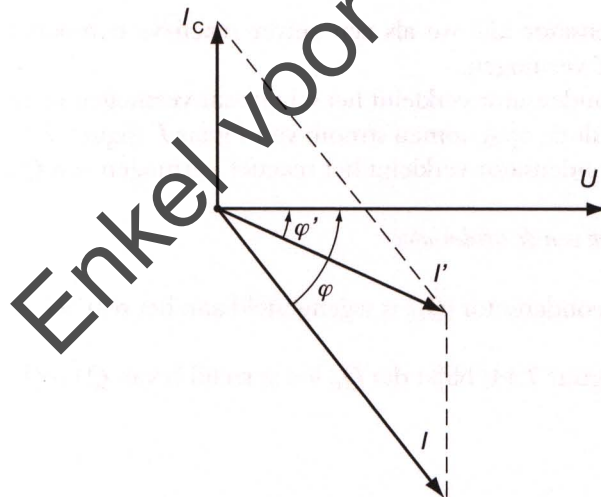


Fig. 7.13 Vectorendiagram bij verbeteren van de $\cos\varphi$ bij inductieve belasting

Als we de capaciteit van de condensator zodanig kiezen dat $I_C = I \cdot \sin\varphi$, wordt de faseverschuiving tussen bronspanning en de stroom door de bron geleverd $\varphi' = 0^\circ$ en $\cos\varphi' = 1$, zodat de parallelschakeling van de inductieve belasting en de condensator zich gedraagt als een zuiver ohmse kring en de kring in resonantie komt.

Als we de capaciteit van de condensator zodanig kiezen dat $I_C > I \cdot \sin\varphi$, ijlt de opgenomen stroom voor op de aangelegde spanning, zodat de kring capacitief wordt. In dat geval spreken we van overcompensatie.

Figuur 7.14 stelt de vermogendriehoeken voor en na het verbeteren van de arbeidsfactor voor.

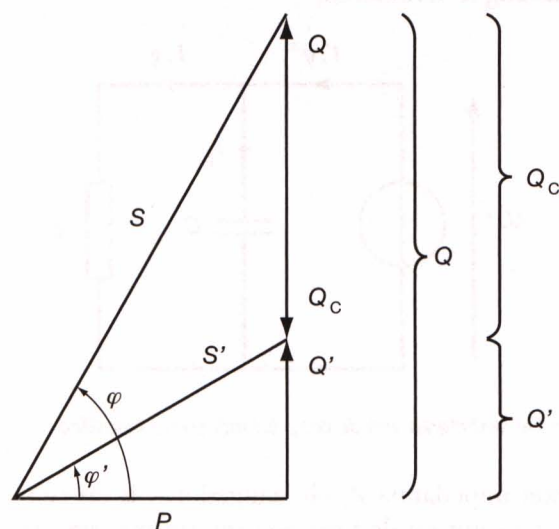


Fig. 7.14 Vermogendriehoeken bij het verbeteren van de $\cos \varphi$ bij inductieve belasting

De vermogendriehoek van de inductieve belasting tekenen we uitgaande van de hoek φ . De aanliggende zijde is het actief vermogen P , de overstaande zijde is het reactief vermogen Q en de schuine zijde is het schijnbaar vermogen S .

De vermogendriehoek van de parallelcompensatie tekenen we uitgaande van de hoek φ' . De aanliggende zijde is het actief vermogen P , de overstaande zijde is het reactief vermogen Q' en de schuine zijde is het schijnbaar vermogen S' .

Het inschakelen van de condensator (die we als een zuiver reactieve component beschouwen) heeft geen invloed op het actief vermogen.

Door het inschakelen van de condensator verkleint het schijnbaar vermogen van S tot S' . Bij eenzelfde aangelegde spanning daalt de opgenomen stroom van I naar I' (figuur 7.13)

Door het inschakelen van de condensator verkleint het reactief vermogen van Q tot Q' .

b Berekenen van het reactief vermogen van de condensator

Het reactief vermogen van de condensator (Q_C) is tegengesteld aan het reactief vermogen van de inductieve belasting (Q).

Uit de vermogendriehoeken (figuur 7.14) blijkt dat Q_C het verschil is van Q en Q' .

$$Q_C = Q - Q'$$

De reactieve vermogens kunnen we ook uitdrukken in functie van het actief vermogen en de faseverschuivingshoek.

$$Q_C = P \cdot \tan \varphi - P \cdot \tan \varphi'$$

Het reactief vermogen dat de condensator moet opnemen om de arbeidsfactor tot een bepaalde waarde te verbeteren berekenen we met de formule:

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi')$$

De waarden die we invullen in de formule bekomen we als volgt:

- Het actief vermogen van de inductieve belasting P lezen we af van de kenplaat van de inductieve verbruiker of meten we met een wattmeter.
- De $\cos\varphi$ lezen we af van de kenplaat of we meten naast het actief vermogen ook de spanning met een voltmeter en de opgenomen stroom met een ampèremeter. Het schijnbaar vermogen $S = U \cdot I$. De arbeidsfactor is dan de verhouding van het actief vermogen P tot het schijnbaar vermogen S . Uit de $\cos\varphi$ berekenen we dan $\tan\varphi$.
- We kiezen de waarde van de arbeidsfactor die willen bekomen na verbetering, $\cos\varphi'$ (meestal $> 0,9$ of zelfs $= 1$) en berekenen daaruit de $\tan\varphi'$.

Toelichtingen

Reactief vermogen bij grote verbruikers

Voor grote belastingen kunnen we de condensator(en) bestellen aan de hand van Q_C (kvar) en de nominale spanning U (V).

Capaciteit bij kleine verbruikers

Voor kleine belastingen moeten we de condensator bestellen aan hand van de capaciteit C en de nominale spanning U (V).

De condensator die aangesloten is op de bronspanning U neemt een stroom I_C op uit de bron die 90° voorijlt op de bronspanning. Het reactief vermogen van de condensator kunnen we berekenen met de formule:

$$Q_C = U \cdot I_C \cdot \sin(90^\circ) = U \cdot I_C$$

De stroomsterkte door de condensator (zuiver capacatieve kring) kunnen we ook berekenen als de verhouding van de spanning U erover tot de capacitantie X_C .

$$Q_C = U \cdot \frac{U}{X_C} = \frac{U^2}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = U^2 \cdot \omega \cdot C = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C$$

Als we de formule omvormen naar C kunnen we de capaciteit van de condensator berekenen:

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \cdot 2\pi \cdot f} \quad (\text{F})$$

7.6 Het vermogen van de ideale passieve componenten

Leerdoel

Hierna kan je:

- het vermogen van de ideale componenten berekenen uit de spanning erover en de stroom daardoor.

Bij gelijkspanning is $P = U \cdot I$. Het vermogen dat omgezet wordt in een component kunnen we ook berekenen als het product van de spanning over de component en de waarde van de stroom door de component.

7.6.1 De vermogens in de RL-seriekring

Figuur 7.15 stelt het elektrisch schema (a), het vectorendiagram (b), de spanningsdriehoek (c) en de vermogendriehoek (d) van een RL-seriekring met ideale componenten R en L voor.

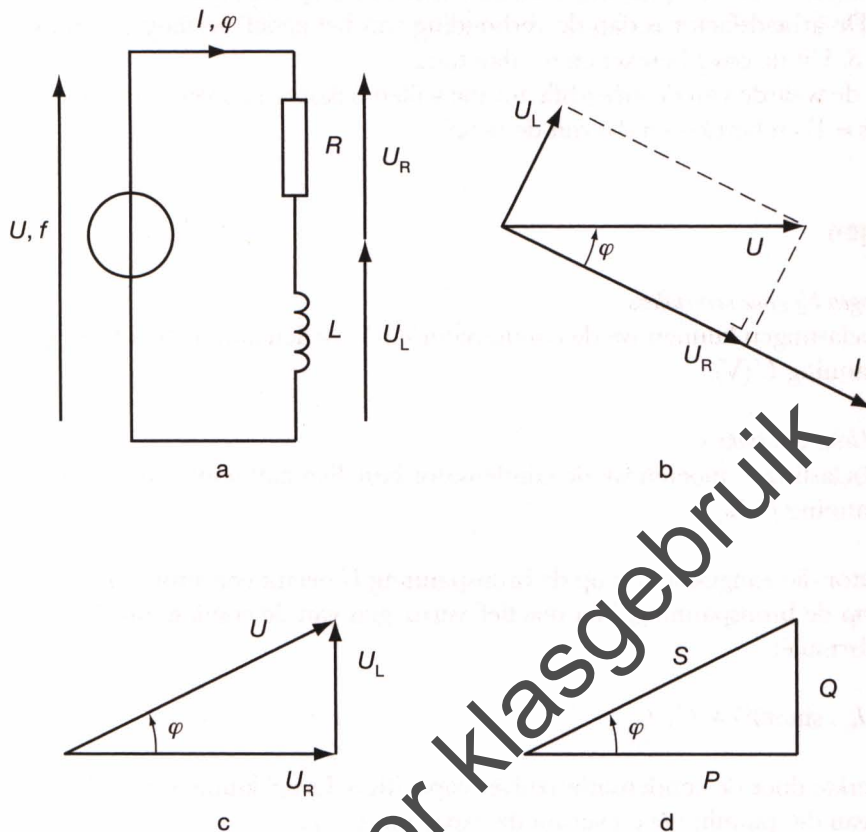


Fig. 7.15 Elektrisch schema, vectorendiagram, spanningsdriehoek en vermogendriehoek van een RL-seriekring

De spanning U kunnen we ontbinden in twee componenten: een component die in fase is met de stroom U_R en een component die 90° voorijlt op de stroom U_L .

De component die in fase is met de stroom is ook de spanning over de gelijkstroomweerstand:

$$U_R = U \cdot \cos\varphi$$

Het actief vermogen van de kring is:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = U_R \cdot I = P_R$$

Het vermogen dat omgezet wordt door de weerstand kunnen we ook berekenen als het product van de spanning over de weerstand en de stroomsterkte door de weerstand.

De spanning over de weerstand noemen we ook de actieve spanningscomponent U_a of de in fase-component.

De component die 90° voorijlt op de stroom is ook de spanning over de zuivere zelfinductie:

$$U_L = U \cdot \sin\varphi$$

Het reactief vermogen van de kring is:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U_L \cdot I = Q_L$$

Het vermogen dat ontwikkeld wordt door de zuivere zelfinductie kunnen we ook berekenen als het product van de spanning over de zuivere zelfinductie en de stroomsterkte door de zuivere zelfinductie.

De spanning over de zuivere zelfinductie noemen we ook de reactieve spanningscomponent U_r of de kwadratuur-component.

7.6.2 De vermogens in de RC-parallelkring

Figuur 7.16 stelt het elektrisch schema (a), het vectorendiagram (b), de stroomdriehoek (c) en de vermogendriehoek (d) van een RC-parallelkring met ideale componenten R en C voor.

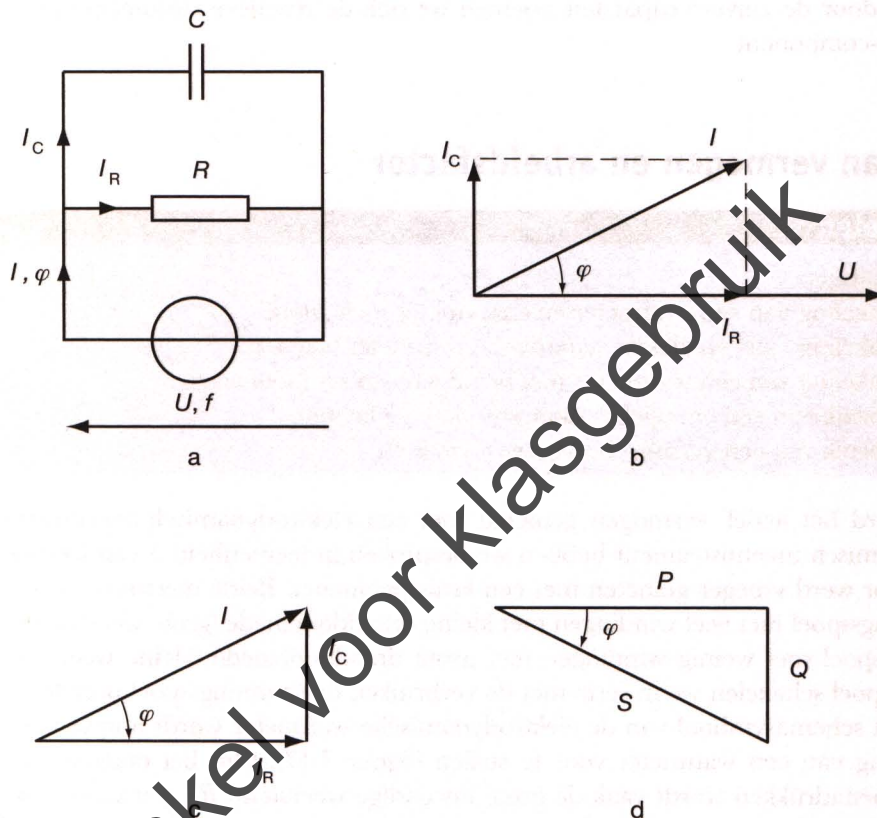


Fig. 7.16 Elektrisch schema, vectorendiagram, stroomdriehoek en vermogendriehoek van een RC-parallelkring

De stroom I kunnen we ontbinden in twee componenten: een component die in fase is met de spanning I_R en een component die 90° voorijlt op de spanning I_C .

De component die in fase is met de spanning is ook de stroom door de gelijkstroomweerstand:

$$I_R = I \cdot \cos \varphi$$

Het actief vermogen van de kring is:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_R = P_R$$

Het vermogen dat omgezet wordt door de gelijkstroomweerstand kunnen we ook berekenen als het product van de spanning over de weerstand en de stroomsterkte door de weerstand.

De stroom door de weerstand noemen we ook de actieve stroomcomponent I_a of de in fase-component.

De component die 90° voorijlt op de spanning is ook de stroom door de zuivere capaciteit:

$$I_C = I \cdot \sin\varphi$$

Het reactief vermogen van de kring is:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U \cdot I_C = Q_C$$

Het vermogen dat gebruikt wordt door de zuivere capaciteit kunnen we ook berekenen als het product van de spanning over de zuivere capaciteit en de stroomsterkte door de zuivere capaciteit.

De stroom door de zuivere capaciteit noemen we ook de reactieve stroomcomponent I_r of de kwadratuur-component.

7.7 Meten van vermogen en arbeidsfactor

Leerdoelen

Hierna kan je:

- de schakeling van een wattmeter en $\cos\varphi$ -meter toelichten.
- de schakeling van een elektrodynamische wattmeter tekenen.
- de schakeling van een wattmeter met het algemeen symbool tekenen.
- het gebruik van een energiebewakingsmodule toelichten.
- het gebruik van een vermogenanalyser toelichten.

Vroeger werd het actief vermogen gemeten met een elektrodynamisch meetinstrument. Het elektrodynamisch meetinstrument hebben we besproken in leereenheid 3 van leerboek A-2. De arbeidsfactor werd vroeger gemeten met een kruisspoelmeter. Beide meetinstrumenten bezitten een spanningsspoel met veel windingen met kleine draaddoorsnede (grote weerstandswaarde) en een stroomspoel met weinig windingen met grote draaddoorsnede (kleine weerstandswaarde). De stroomspoel schakelen we in serie met de verbruiker, de spanningsspoel parallel over de verbruiker. Het schemasymbool van de elektrodynamische wattmeter wordt nog vaak gebruikt om de schakeling van een wattmeter voor te stellen (figuur 7.17). Om het onderscheid tussen de spoelen te benadrukken wordt vaak de grote inwendige weerstand R_U getekend in serie met de spanningsspoel. Voor het meten van het vermogen in kleine belastingsimpedanties wordt de spanningsspoel aangesloten na de stroomspoel (vergelijk met de VA-methode voor het bepalen van de weerstandswaarde van laagohmige weerstanden). Voor het meten van het vermogen in grote belastingsimpedantie is de meting nauwkeuriger als de spanningsspoel aangesloten wordt voor de stroomspoel (streeplijn in figuur 7.17).

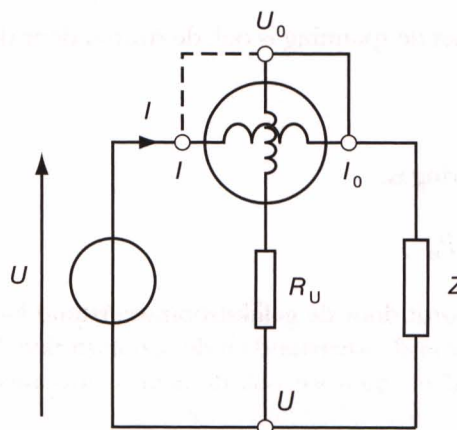


Fig. 7.17 Schakeling van een elektrodynamische wattmeter

In figuur 7.18 stellen we de wattmeter voor met zijn algemeen schemasymbool en zijn de spanningspoel en de stroomspoel inwendig verbonden.

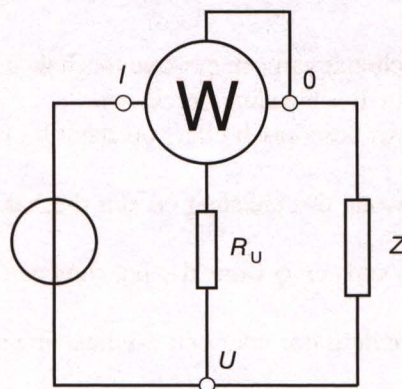


Fig. 7.18 Schakeling van een wattmeter met algemeen schemasymbool

Een $\cos\varphi$ -meter schakelen we op dezelfde manier als een wattmeter.

Tegenwoordig meten we het vermogen en de arbeidsfactor in een schakelkast met een elektronische energiebewakingsmodule. Het meetsysteem van de module schakelen we zoals een wattmeter en de module moeten we ook voorzien van een voedingspanning. De module bemonstert de spanning en de stroom gedurende een periode en berekent alle waarden met behulp van een microprocessor. Op het display kan je dan naar wens spanning, stroomsterkte, frequentie, arbeidsfactor, actief vermogen, reactief vermogen, schijnbaar vermogen en zelfs de harmonische vervorming aflezen.

In de dagelijkse praktijk meten we het vermogen met een vermogenanalyser. Het toestel wordt gevoed met een batterij. De stroomspoel is een stroommeetang die vastzit op het toestel of via een kabel ermee verbonden is. Verder stemmen de werking en de gebruiksmogelijkheden overeen met die van de energiebewakingsmodule.



In het labboek vind je mogelijke opdrachten en demonstraties rond de vermogens in de enkelvoudige kringen, de RL-seriekring en de RC-parallelkring.

7.8 Tl-schakelingen met smoorspoel

Leerdoelen

Hierna kan je:

- het elektrisch vervangingsschema van een gewone tl-schakeling tekenen.
- de vermogens in een gewone tl-schakeling berekenen.
- toelichten waarom er een stroboscopisch effect optreedt bij het gebruik van een gewone tl-schakeling.
- het verband tussen een gewone tl-schakeling en een tl-schakeling met seriecompensatie toelichten.
- de capaciteit berekenen om van een gewone tl-schakeling een tl-schakeling met seriecompensatie te maken.
- de werkspanning van de condensator voor een tl-schakeling met seriecompensatie bepalen.
- toelichten waarom de tl-schakeling met seriecompensatie als zelfstandige schakeling niet voorkomt.
- de capaciteit van de condensator berekenen om de waarde van de arbeidsfactor van een gewone tl-schakeling te verbeteren tot een bepaalde waarde.
- de invloed van de parallelcompensatie op de opgenomen stroom van een tl-schakeling verduidelijken.
- het elektrisch vervangingsschema van een duoschakeling van tl-lampen tekenen.
- aan de hand van het vectorendiagram toelichten waarom de arbeidsfactor van een duoschakeling van tl-lampen goed is.
- aan de hand van het vectorendiagram de opgenomen stroom van een duoschakeling van tl-lampen berekenen.
- aan de hand van het vectorendiagram toelichten waarom er bij een duoschakeling van tl-lampen geen stroboscopisch effect optreedt.

7.8.1 De gewone tl-schakeling

We schakelen de tl-lamp in serie met de ballast (figuur 7.19). Als de lamp brandt, kunnen we ze beschouwen als een gelijkstroomweerstand R_l . In de praktijk is de ballast geen ideale spoel. We beschouwen de ballast als de serieschakeling van een gelijkstroomweerstand R_b en een ideale spoel met inductiecoëfficiënt L .

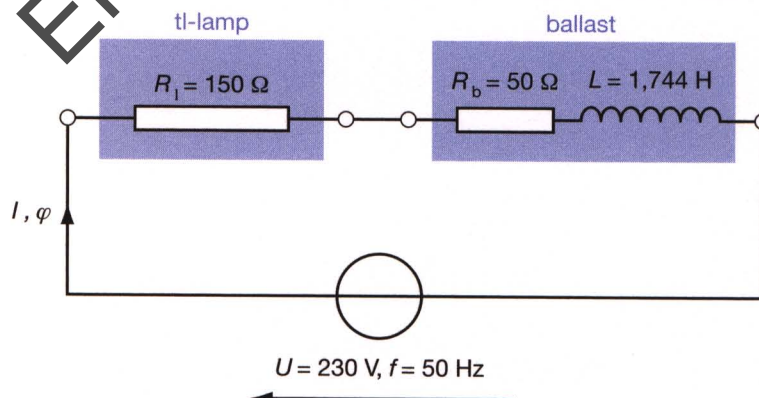


Fig. 7.19 De gewone tl-schakeling

De impedantie berekenen we met de formule van de RL-seriekring.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(R_l + R_b)^2 + (2\pi f L)^2} = 583 \Omega$$

De stroomsterkte van de stroom in de kring is:

$$I = \frac{U}{Z} = 395 \text{ mA}$$

De arbeidsfactor berekenen we met de formule van de RL-seriekring.

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R_1 + R_b}{Z} = 0,343$$

De arbeidsfactor van een gewone tl-schakeling is dus heel slecht.

De faseverschuivingshoek berekenen we met de inverse functie van de cosinus.

$$\varphi = \cos^{-1}(\cos\varphi) = 70^\circ$$

Het schijnbaar vermogen $S = U \cdot I = 90,9 \text{ VA}$

Het actief vermogen $P = S \cdot \cos\varphi = 31,2 \text{ W}$

Het reactief vermogen $Q = S \cdot \sin\varphi = 85,4 \text{ var}$

We berekenen het vermogen dat in elke component omgezet wordt:

$$P_{R_1} = U_{R_1} \cdot I = I \cdot R_1 \cdot I = I^2 \cdot R_1 = 23,4 \text{ W}$$

$$P_{R_b} = U_{R_b} \cdot I = I \cdot R_b \cdot I = I^2 \cdot R_b = 7,8 \text{ W}$$

$$Q_L = U_L \cdot I = I \cdot X_L \cdot I = I^2 \cdot X_L = 85,4 \text{ var}$$

Volgens de berekening is het een tl-lamp van 23,4 W en wordt ongeveer 1/5 van de verbruikte energie in de ballast omgezet in warmte.

De ballast verlaagt de beschikbare netspanning tot de brandspanning van de lamp:

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,395 \cdot 150 = 59,3 \text{ V}$$

Als we een voorschakelweerstand i.p.v. een ballast zouden gebruiken om de spanning aan de lamp te verlagen, zou het ontwikkelde vermogen in de voorschakelweerstand $P_R = (U - U_1) \cdot I = (230 - 59,3) \cdot 0,395 = 67,1 \text{ W}$ zijn. De voorschakelweerstand zou dan ongeveer driemaal meer energie opslorpen dan de lamp. Hierdoor wordt duidelijk dat een voorschakelweerstand niet in aanmerking komt als spanningsverlager in de praktische toepassingen en dit omwille van de energieverpilling.

Naast de slechte arbeidsfactor heeft de gewone tl-schakeling het nadeel dat er een stroboscopisch effect optreedt. De stroom door de lamp is zuiver sinusvormig. Dit betekent dat de stroomsterkte op bepaalde ogenblikken nul wordt en de lamp dooft. Als we een lichtarmatuur met gewone tl-schakeling gebruiken om een werktuigmachine (bv. een draaibank) te verlichten, dan kan het voorkomen dat we de indruk hebben dat een bewegend deel (bv. de klauwplaat) stilstaat. Dat kan in werkplaatsen heel gevaarlijke situaties opleveren.

7.8.2 De tl-schakeling met seriecompensatie

Bij de tl-schakeling met seriecompensatie schakelen we in serie met de gewone tl-schakeling een condensator, waarvan de capaciteit zo gekozen is dat de stroomsterkte en de absolute faseverschuivingshoek in de kring gelijk blijven. De impedantie van de tl-schakeling met seriecompensatie (die we kunnen beschouwen als een RLC-seriekring) moet gelijk zijn aan de impedantie van de gewone tl-schakeling (die we kunnen beschouwen als een RL-seriekring).

$$\sqrt{R^2 + (X_L)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

De gelijkheid is geldig als $X_C = 2 \cdot X_L$

In het rekenvoorbeeld (7.8.1) wordt de capaciteit van de condensator:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \rightarrow C = \frac{1}{8 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L} = \frac{1}{8 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot 1,744} = 2,90 \mu\text{F}$$

Door het bijschakelen van de condensator wijzigt het vermogen van de andere componenten niet. De condensator heeft enkel invloed op het reactief vermogen van de kring.

$$Q_C = U_C \cdot I = I \cdot X_C \cdot I = I^2 \cdot X_C = 171,3 \text{ var}$$

$$Q = Q_L - Q_C = 84,4 - 171,3 = -86,9 \text{ var}$$

Het reactief vermogen heeft ongeveer dezelfde waarde, maar wordt nu capacitef.

De tl-schakeling met seriecompensatie komt als zelfstandige schakeling niet voor, want de arbeidsfactor is even slecht als bij de gewone tl-schakeling, en we gebruiken een component meer.

De spanning over de condensator in het rekenvoorbeeld bedraagt:

$$U_C = I \cdot X_C = I \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = 0,395 \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,90 \cdot 10^{-6}} = 434 \text{ V}$$

De werkspanning van de condensator moet ongeveer tweemaal de aangelegde spanning bedragen.

7.8.3 De tl-schakeling met parallelcompensatie

Bij de tl-schakeling met parallelcompensatie schakelen we een condensator parallel over een gewone tl-schakeling om de arbeidsfactor te verbeteren tot een waarde groter dan 0,9 (liefst tot 1).

Voor een $\cos \varphi = 0,9$ bekomen we als waarden voor het reactief vermogen en de capaciteit in het rekenvoorbeeld:

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi') = 31,2 \cdot (\tan 70 - \tan(\cos^{-1} 0,9)) = 70,6 \text{ var}$$

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{70,6}{230^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 4,25 \mu\text{F}$$

Voor een $\cos \varphi = 1$ bekomen we als waarden voor het reactief vermogen en de capaciteit in het rekenvoorbeeld:

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi) = 31,2 \cdot (\tan 70) = 85,7 \text{ var}$$

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{85,7}{230^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 5,16 \mu\text{F}$$

Om de waarde van de arbeidsfactor te verbeteren tussen 0,9 en 1 moeten we een condensator van $4,7 \mu\text{F}$ met een tolerantie van 10 % gebruiken ($4,23 \mu\text{F} < C_{\text{nom}} < 5,17 \mu\text{F}$), waar 20 % de gebruikelijke tolerantie voor condensatoren is.

Als we de arbeidsfactor verbeteren tot een waarde één, kunnen we de stroomsterkte van de opgenomen stroom berekenen uit het actief vermogen:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{31,2}{230} = 135,7 \text{ mA}$$

De opgenomen stroom van de tl-schakeling met parallelcompensatie is ongeveer 1/3 van de stroom bij de gewone tl-schakeling.

7.8.4 De duoschakeling van tl-lampen

Bij een duoschakeling zijn twee identieke tl-lampen opgenomen in een verlichtingsarmatuur. Op dezelfde spanning is een tl-lamp geschakeld volgens de gewone tl-schakeling en is de andere lamp geschakeld volgens de tl-schakeling met seriecompensatie (figuur 7.20).

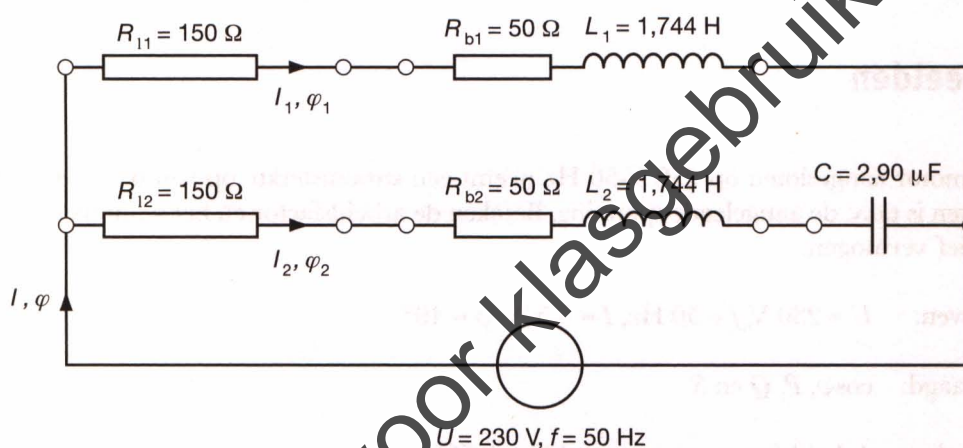


Fig. 7.20 De duoschakeling van tl-lampen

De stroom I_1 door de gewone tl-schakeling ijlt over een hoek φ_1 na op de aangelegde spanning (figuur 7.21). De stroom $I_2 (= I_1)$ door de tl-schakeling met seriecompensatie ijlt over een hoek φ_2 ($= \varphi_1$) voor op de aangelegde spanning. De opgenomen stroom I van de duoschakeling is de resultante van de twee deelstromen.

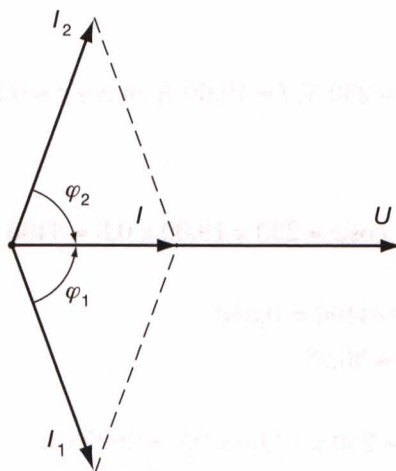


Fig. 7.21 Stromen in een duoschakeling van tl-lampen

In figuur 7.21 zien we duidelijk dat de opgenomen stroom in fase is met de aangelegde spanning van de duoschakeling. De arbeidsfactor van een duoschakeling van tl-lampen is gelijk aan 1.

In het rekenvoorbeeld is de waarde van de opgenomen stroom:

$$I = I_1 \cdot \cos\varphi_1 + I_2 \cdot \cos\varphi_2 = 0,395 \cdot \cos 70^\circ + 0,395 \cdot \cos(-70^\circ) = 270 \text{ mA}$$

De opgenomen stroom van een duoschakeling is het dubbele van de opgenomen stroom bij de tl-schakeling met parallelcompensatie, maar er branden ook twee lampen.

Uit figuur 7.21 blijkt ook dat de twee deelstromen nooit gelijktijdig gelijk zijn aan nul. Bij een duoschakeling van tl-lampen brandt altijd minstens één lamp, zodat er geen stroboscopisch effect optreedt.



In het labboek vind je mogelijke opdrachten en demonstraties rond de vermogens in de verschillende tl-schakelingen.

7.9 Voorbeelden

- 1 Een motor aangesloten op 230 V-50 Hz neemt een stroomsterkte op van 6,5 A die 40° verschoven is t.o.v. de aangelegde spanning. Bereken de arbeidsfactor en het schijnbaar, actief en reactief vermogen.

Gegeven: $U = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $I = 6,5 \text{ A}$, $\varphi = 40^\circ$

Gevraagd: $\cos\varphi$, P , Q en S

Oplossing: Arbeidsfactor: $\cos\varphi = \cos 40^\circ = 0,766$

$$S = U \cdot I = 230 \cdot 6,5 = 1495 \text{ VA}$$

$$P = S \cdot \cos\varphi = 1495 \cdot 0,766 = 1145 \text{ W}$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = 1495 \cdot 0,643 = 961 \text{ var}$$

- 2 Een wisselstroommotor levert aan zijn riemschijf een vermogen van 3 kW. De volt- en A-meter die in de voedingskring werden aangesloten, duiden respectievelijk 230 V en 19,00 A aan. De arbeidsfactor bedraagt 0,8. Bereken het rendement en het reactief vermogen dat de motor opneemt.

Gegeven: $P_{\text{nuttig}} = 3 \text{ kW}$, $U = 230 \text{ V}$, $I = 19,00 \text{ A}$ en $\cos\varphi = 0,8$

Gevraagd: η en Q

Oplossing: $P_{\text{toegevoerd}} = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 230 \cdot 19,00 \cdot 0,8 = 3496 \text{ W}$

$$P_{\text{nuttig}} = 3000 \text{ W}$$

$$\eta = P_n / P_t = 3000 / 3496 = 0,858$$

$$\cos\varphi = 0,8 \Rightarrow \varphi = 36,9^\circ$$

$$\sin\varphi = 0,6$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = 230 \cdot 19,00 \cdot 0,6 = 2622 \text{ var}$$

- 3 Een verbruiker neemt een vermogen op van 80 kW bij een arbeidsfactor van 0,55. De voedingsspanning is 1000 V met een frequentie van 400 Hz. Welke capaciteitswaarde moet de condensator, parallel geschakeld met de verbruiker, hebben opdat de arbeidsfactor 0,9 zou zijn?

Gegeven: $P = 80 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 0,55$, $U = 1000 \text{ V}$ en $f = 400 \text{ Hz}$

Gevraagd: C voor $\cos\varphi' = 0,9$

Oplossing: $Q_C = Q - Q' = P \cdot (\tan\varphi - \tan\varphi') = 82,7 \text{ kvar}$

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{82,7 \cdot 10^3}{1000^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 400} = 32,9 \text{ } \mu\text{F}$$

7.10 Opdrachten

- 1 Op de einddatum van de maand duidt de actieve energiemeter 1220 kWh aan. De reactieve energiemeter duidt 1000 kvarh aan. Bepaal de gemiddelde arbeidsfactor van de installatie in de betreffende periode van een maand.
- 2 Een ideale condensator van 200 μF is aangesloten op een spanning van 100 V met frequentie 50 Hz. Bereken het actief, het reactief en het schijnbaar vermogen.
- 3 Bereken de capaciteit van de condensator om de arbeidsfactor van een installatie met 3000 W actief vermogen te verbeteren van 0,8 tot 0,9. De netspanning is 230 V met frequentie 50 Hz.
- 4 Een tl-lamp van 65 W neemt een stroomsterkte op van 0,591 A onder een spanning van 230 V bij $f = 50 \text{ Hz}$. Bereken de capaciteit van de condensator die we parallel moeten schakelen om $\cos\varphi = 1$ en respectievelijk $\cos\varphi = 0,9$ te krijgen.
Hoe groot is de stroomsterkte als de stroom en de spanning in fase zijn?



Op de cd-rom vind je een diagnostische toets en extra taken.

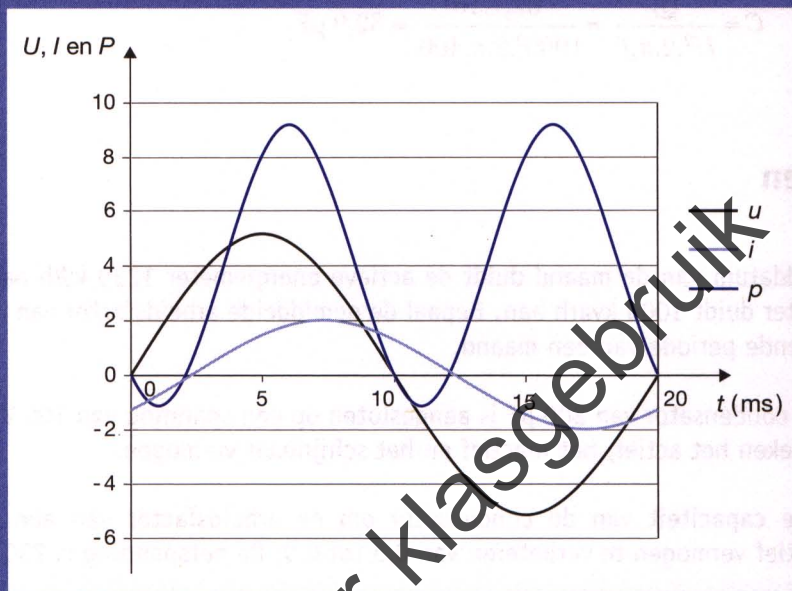
SYNTHESE

Vermogen en arbeidsfactor van een sinusvormige wisselstroom

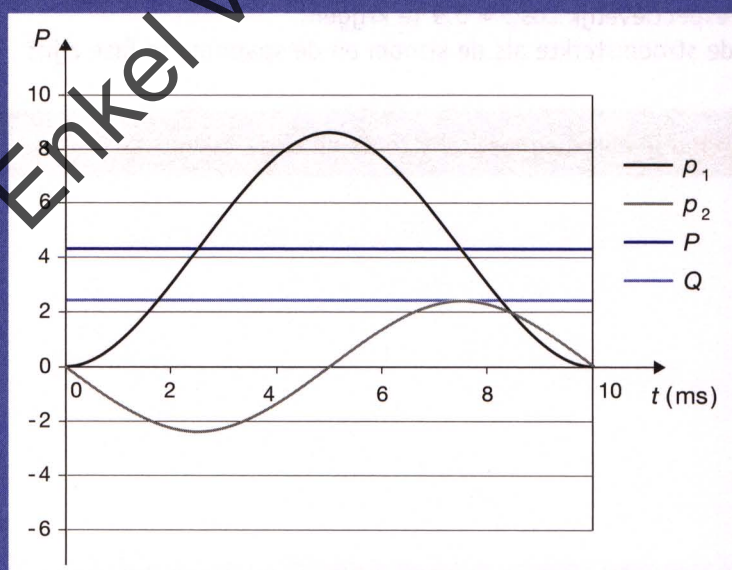
1 Ogenblikkelijk of momenteel vermogen

Het ogenblikkelijk of momenteel vermogen is het product van de momentele of ogenblikkelijke waarden van de spanning en de stroom.

$$p = u \cdot i$$



2 Het ogenblikkelijk vermogen kunnen we splitsen in twee componenten



De gemiddelde waarde van de component p_1 van het ogenblikkelijk vermogen noemen we het actief vermogen P van de kring.

$$P = P_{1\text{gem}} = \frac{P_{1m}}{2} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{W})$$

Het actief vermogen is het vermogen dat omgezet wordt door de gelijkstroomweerstand in de kring.

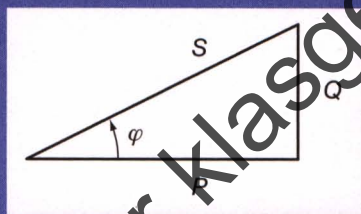
De maximale waarde van de component p_2 van het ogenblikkelijk vermogen noemen we het reactief vermogen Q van de kring.

$$Q = P_{2m} = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (\text{var})$$

Het reactief vermogen is het vermogen dat ontwikkeld wordt door de ideale spoelen en condensatoren (de componenten met een reactantie) in de kring.

3 Vermogendriehoek

Voor elke belasting kunnen we een vermogendriehoek tekenen.



De vermogendriehoek geeft het verband tussen actief, reactief en schijnbaar vermogen.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

Het schijnbaar vermogen is een combinatie van het actief en het reactief vermogen die door de leidingen getransporteerd wordt.

$$S = U \cdot I \quad (\text{VA})$$

4 Arbeidsfactor

$$\text{arbeidsfactor} = \frac{P}{S} = \cos \varphi$$

De arbeidsfactor speelt een grote rol bij energieoverdracht: hoe kleiner de arbeidsfactor, hoe groter de stroomsterkte moet zijn om bij een constante spanning een welbepaalde elektrische energie over te brengen. Vooral de stroomleverancier zal de nadelige invloed van de kleine arbeidsfactor ($\cos \varphi$) ervaren.

De arbeidsfactor wordt bepaald door de aangesloten verbruikers. De nadelige invloed van een kleine arbeidsfactor kunnen we beperken of neutraliseren door geschikte condensatoren parallel met de verbruiker te schakelen.

5 Tl-schakelingen met smoorspoel

De gewone tl-schakeling heeft een kleine arbeidsfactor en veroorzaakt een stroboscopisch effect.

De arbeidsfactor van een tl-schakeling met seriecompensatie is even klein als de arbeidsfactor van de gewone tl-schakeling. De tl-schakeling met seriecompensatie wordt als zelfstandige schakeling niet gebruikt.

In de tl-schakeling met parallelcompensatie verbeteren we de waarde van de arbeidsfactor door een condensator parallel te schakelen met de gewone tl-schakeling.

De duoschakeling van tl-lampen is de parallelschakeling van een gewone tl-schakeling en een tl-schakeling met seriecompensatie. De duoschakeling heeft een heel goede arbeidsfactor en er treedt geen stroboscopisch effect op.

Enkel voor klasgebruik