

Technisch handboek voor arbeidsfactorverbetering



- Actief, reactief en schijnbaar vermogen
- Nadelen van een slechte arbeidsfactor
- Verhogen van de arbeidsfactor
- Compensatiesoorten
- Dimensionering van automatische condensatorenbatterijen
- Compensatie in netten met harmonischen
- Invloed van condensatoren op de netwerkimpedantie
- Condensatorenbatterijen met of zonder seriespoelen
- Condensatorenbatterijen met seriespoelen in de praktijk

M-TEC ENERGY bvba

Nijverheidsstraat 26 Industriezone ITTERBEEK

B-2570 DUFFEL Belgium

Tel: +32 (0)3/490 40 90 - Fax: +32 (0)3/490 40 99

e-mail : info@mtenergy.com

www.mtecenergy.com



1. Inleiding

Bij de verdeling en het gebruik van elektrische energie wordt aan het stille element condensatorenbatterij vaak niet de nodige aandacht besteed. Op zich is dit element vrij eenvoudig, doch bij de inplanting ervan in een elektrische installatie komt er heel wat meer bij kijken.

Daar een condensatorenbatterij belangrijk is, om de energie zo economisch mogelijk aan te wenden of om het transport van energie met de nodige reserves te kunnen verzekeren, is de goede werking ervan van kapitaal belang.

Toenemende netproblematiek maakt de juiste productkeuze zeker niet eenvoudiger.

Het opzet van deze tekst is u vertrouwd te maken met het vakjargon en u kennis te geven van de toepassing van de verschillende producten, teneinde de keuze ervan te vereenvoudigen.

2. Actief vermogen

Wanneer een net enkel belast wordt met een ohmse belasting dan zal de stroom (I) door deze verbruiker in fase zijn met de spanning (U). Met andere woorden de stroom en de spanning hebben eenzelfde nuldoorgang. Uit het product van de ogenblikkelijke waarde van I en U vinden we het vermogenverloop (P). We merken op (Fig 1) dat dit vermogen nooit negatief wordt en een frequentie heeft die het dubbele is van de netfrequentie.

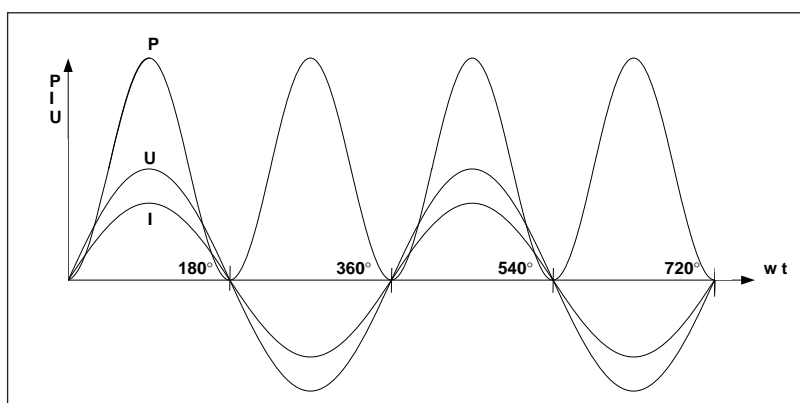


Fig. 1: Spanning, stroom en vermogen bij ohmse belasting. ($\varphi = 0$) ($\cos \varphi = 1$)

Als ohmse belasting kennen we vb. een elektrische oven, verwarming, gloeilamp, Deze elektrische verbruikers geven een waarneembaar nuttig of actief vermogen af (vb: warmte, licht, mechanische kracht).

Bij zuivere ohmse belasting wordt het actief vermogen (Watt {W}) bepaald uit het product van de effectieve waarde van de spanning en de stroom.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

(W) (V) (A)

($\sqrt{3}$ duidt op het feit dat we werken met driefasige vermogens)

3. Reactief vermogen

Een zuiver ohmse belasting komt in de praktijk weinig voor. Motoren, transformatoren of andere toestellen, die werken op basis van inductie gebruiken, buiten een actieve energie voor de levering van nuttige arbeid, een reactieve energie voor de opbouw van de magnetische velden. De magnetiseringsstroom (I) voor de opbouw van deze magnetische velden neemt niet deel aan de energie-overzetting maar pendelt als blindstroom tussen generator en verbruiker.

Bij reactieve belasting ontstaat er een faseverschuiving tussen stroom en spanning. Hierdoor wordt het ogenblikkelijk vermogen (U.I) op bepaalde momenten negatief (Fig. 2).

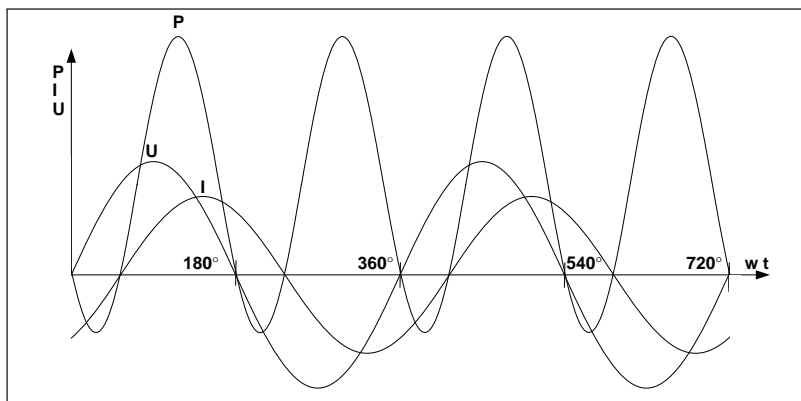


Fig. 2: Spanning, stroom en vermogen bij ohmse en (inductieve) reactieve belasting.

Het actief vermogen vindt men in dit geval uit:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

(W) (V) (A)

Actief vermogen= Werkelijk omgezette vermogen, nuttig vermogen

Het reactief vermogen of blindvermogen vindt men uit:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

(VAr) (V) (A)

Blindvermogen= Pendelend vermogen tussen generator en verbruiker voor de op- en afbouw van magnetische velden

Wanneer de spanning en stroomcurve 90° tegenover elkaar verschoven zijn, is de vermogenscurve de ene helft positief en de andere helft negatief. Het actief vermogen is in dit geval nul, daar de positieve en negatieve helft elkaar opheffen. Het blindvermogen is dan maximaal. Men onderscheidt inductief- en capaciteef- reactief vermogen al naargelang blindvermogen wordt opgenomen of afgegeven:

Reactief-inductief vermogen:

- De stroom ijlt na op de spanning.
- Er wordt blindvermogen opgenomen.
- Van toepassing bij :
 - Asynchrone motoren
 - Transformatoren
 - Bovengrondse leidingen
 - Ondergedimensioneerde synchronmachines

Reactief-capacitief vermogen:

- De stroom ijlt voor op de spanning.
- Er wordt blindvermogen afgegeven.
- Van toepassing bij :
 - Condensatoren
 - Kabels
 - Onbelaste hoogspanningsluchtleidingen
 - Overgedimensioneerde synchronmachines

4. Schijnbaar vermogen

Het schijnbaar vermogen bepaalt de belasting van het net en het transportmedium. Transformatoren, generatoren, schakelapparatuur, zekeringen en leidingen moeten voor het optredende schijnbaar vermogen gedimensioneerd worden.

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

(VA) (V) (A)

Schijnbaar vermogen = Product van de effectieve spanning en stroom zonder rekening te houden met de faseverschuiving

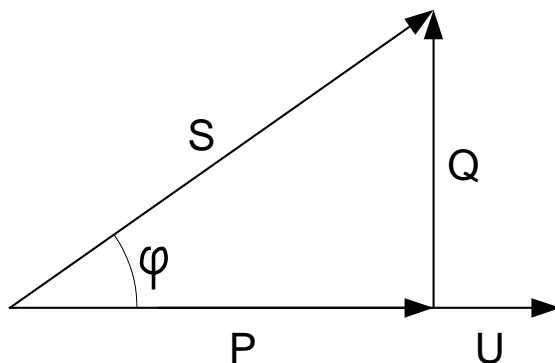


Fig. 3: Vermogendriehoek.

Het schijnbaar vermogen vindt men ook uit de vectoriële som van het actief en reactief vermogen:

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

(VA) (W) (VAr)

5. Arbeidsfactor

De hoek tussen het actief en het schijnbaar vermogen wordt voorgesteld door de letter **phi (φ)**. De $\cos \varphi$ duidt dan op de verhouding van het actief op het schijnbaar vermogen.

$$\text{Arbeidsfactor PF} = \frac{P}{S} \quad (= \cos \varphi) \quad (\text{bij afwezigheid van niet-lineaire belastingen})$$

(W) (VA)

Bij niet lineaire belastingen of bij aanwezigheid van harmonischen is er een verschil tussen de $\cos \phi$ en de arbeidsfactor. $\cos \phi$ staat in relatie met de faseverschuiving tussen stroom en spanning terwijl arbeidsfactor betrekking heeft op het actief en reactief vermogen. Bij de bepaling van het vermogen van een condensatorenbatterij werkt men het best op basis van $\cos \phi$. In de praktijk maakt men echter weinig onderscheid en is het verschil miniem.

Behoudens de notatie $\cos \phi$ wordt ook $\text{tg } \phi$ gebruikt. Uit de driehoeksmeetkunde vinden we:

$$\text{Tg } \varphi = \frac{Q}{P}$$

(VAr) (W)

6. Nadelen van een slechte arbeidsfactor:

Belasting van het net:

Hoe meer reactieve energie een bepaalde installatie verbruikt hoe kleiner de $\cos \phi$ is; men zegt dat de $\cos \phi$ slecht is. Voor eenzelfde opgenomen actief vermogen zal bij slechtere $\cos \phi$ het schijnbaar vermogen groter zijn, en zal dus ook de stroom door de leidingen groter zijn. Bij een $\cos \phi$ van 0,5 is de gevraagde stroom het dubbele van de actieve stroom.

Voor eenzelfde actief vermogen moet het elektrisch net dus een hogere stroom transporteren naar mate de $\cos \phi$ slechter is. Dit veroorzaakt overbelastingen in transformatoren, generatoren, kabels en schakelinrichtingen en verhoogt ook aanzienlijk de verliezen in deze elementen (verliezen zijn evenredig met het kwadraat van de stroom). Dit is niet alleen van toepassing voor onze eigen installatie maar geldt ook tussen de hoogspanningscentrale en onze aankomst in de cabine.

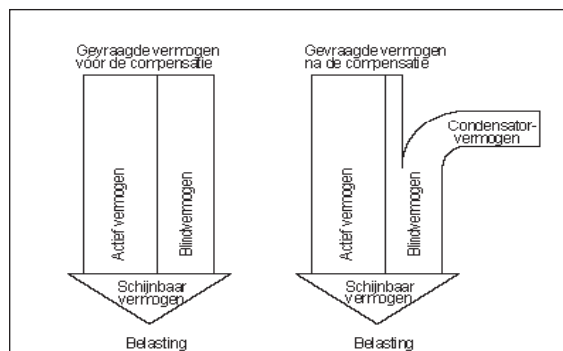


Fig. 4: Vermogenbalans.

Na compensatie met condensatoren wordt het onttrokken blindvermogen uit het net kleiner. Een deel van het blindvermogen pendelt dan tussen de condensatoren en de belasting en vormt aldus geen belasting meer voor het net. De transformator en de kabels en schakelinrichtingen van aan het voedingspunt tot aan de condensatorenbatterij worden hierdoor voor een deel ontlast.

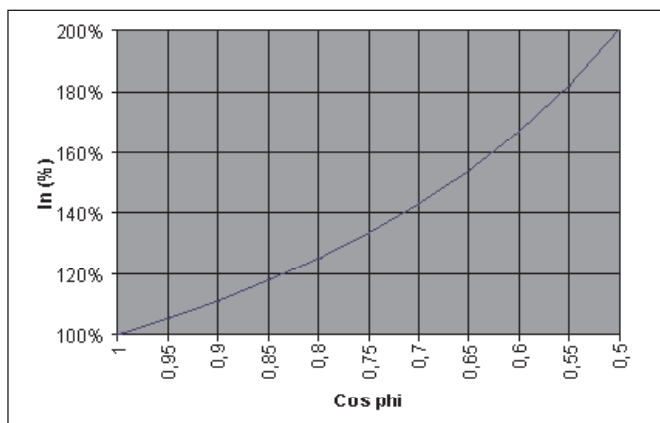


Fig. 5: Stroomverloop in functie van de cos phi bij gelijkblijvend actief vermogen.

Kostprijs van de actieve energie:

Afgezien van het feit dat de reactieve energie getransporteerd moet worden over hoogspannings-kabels en -transformatoren, moet de elektriciteitsleverancier eveneens deze reactieve energie mee opwekken (genereren). Dit dwingt hem tot het bouwen van grotere elektriciteitscentrales (groter vermogen), of tot het plaatsen van hoogspanningscondensatoren/batterijen. Om deze reden maken de elektriciteitsleveranciers de prijs voor het elektriciteitsverbruik duurder naarmate de cos phi slechter is.

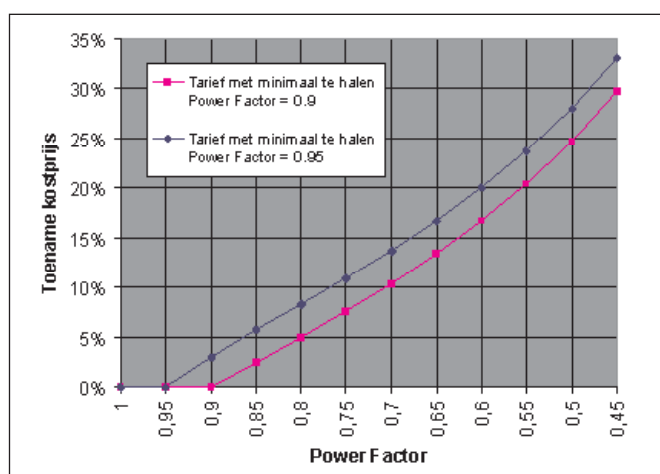


Fig. 6: Kostprijsstijging per kWh in functie van de cos phi.

We hebben er dus alle belang bij de cos phi zo hoog mogelijk te brengen, dwz het reactief verbruik zo laag mogelijk te houden. Volgens de opgelegde tarificatie van de elektriciteitsleverancier moet de gemiddelde maandelijkse arbeidsfactor minimaal 0,9 of 0,95 bedragen, wil men geen toeslag voor reactief verbruik betalen. Brengt men het net capacitef (cos phi voorbij de 0,9 of 0,95 cap) door overcompensatie (te veel condensatoren ingeschakeld) dan wordt meestal opnieuw een toeslag voor reactief verbruik aangerekend. Praktisch laat de elektriciteitsleverancier een maximaal verbruik van reactieve energie toe gelijk aan 48,4% van het verbruik van de actieve energie, wat overeenstemt met $\cos \phi \pm 0,9$. Het meerverbruik wordt aangerekend en opgenomen onder distributiekosten op het maandelijks factuur van uw elektriciteitsleverancier.

7. Verhogen van de arbeidsfactor

Beschouwen we een belastingsgeval waarbij een actief vermogen P , een reactief-inductief vermogen Q_1 en een schijnbaar vermogen S_1 wordt opgenomen.

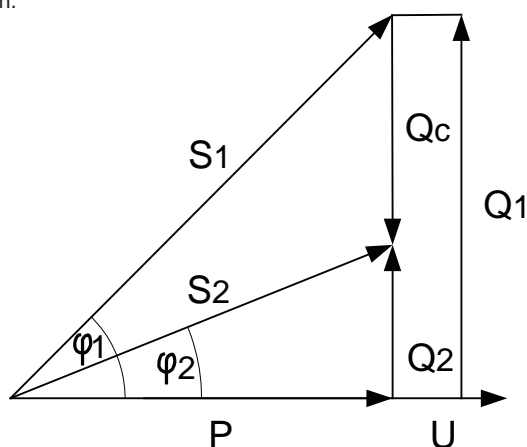


Fig 7: Vermogendriehoek met compensatie.

Door het bijplaatsen van een condensator met een vermogen Q_c (welk tegengesteld is aan Q_1) zal het uit het net opgenomen reactief vermogen slechts Q_2 meer bedragen. Het schijnbaar vermogen wordt S_2 met $S_2 < S_1$. Daar dit vermogen evenredig is met de stroom moet deze laatste ook afgenomen zijn.

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

(VAr) (W)

Voorbeeld:

In een bedrijf meet men aan de klemmen van de transformator een stroom van 1200 A bij een spanning van 394 V. Er zijn geen condensatoren aanwezig voor de compensatie en de $\cos \varphi$ bedraagt 0,78. Wat worden de vermogens en wat wordt de stroom door de transfo wanneer de $\cos \varphi$ naar 0,92 gebracht wordt door plaatsing van een condensatorenbatterij?

- *Actief vermogen:*
 $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 \cdot 0,780 = 638 \text{ kW}$
- *Reactief vermogen:*
 $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 \cdot 0,625 = 511 \text{ kVAr}$
- *Schijnbaar vermogen:*
 $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 = 818 \text{ kVA}$

Nodige condensatorvermogen om de $\cos \varphi$ van 0,78 naar 0,92 te brengen bij een belasting van 638 kW.

- *Condensatorvermogen:* $Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) =$
 $638 \cdot (0,802 - 0,426) = 240 \text{ kVAr}$

Het actief vermogen is eigen aan de installatie en blijft ook na compensatie 638 kW. De stroom om dit vermogen te leveren zal bij een betere $\cos \varphi$ echter kleiner zijn.

- De nieuwe *stroom* wordt:
 $P = 638 \text{ kW} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$
 $\Rightarrow I = P / \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi$
 $I = 638.000 / 1,73 \cdot 394 \cdot 0,92 = 1017 \text{ A}$
- Het nieuwe *reactief vermogen:*
 $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1017 \cdot 0,391 = 271 \text{ kVAr}$
 of $Q = Q_1 - Q_c = 511 - 240 = 271 \text{ kVAr}$
- Het nieuwe *schijnbaar vermogen:*
 $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 1,73 \cdot 394 \cdot 1017 = 693 \text{ kVA}$

Besluit:

Door de $\cos \varphi$ van 0,78 naar 0,92 te brengen wordt de transformator ontlast (de afgenomen stroom daalt van 1200 A naar 1017 A). Er komt zo een vermogen vrij van 125 kVA (818 kVA - 693 kVA) waardoor eenzelfde trafo kan benut worden voor meer verbruikers.

8. Compensatiesoorten

8.1. Individuele compensatie van transformatoren:

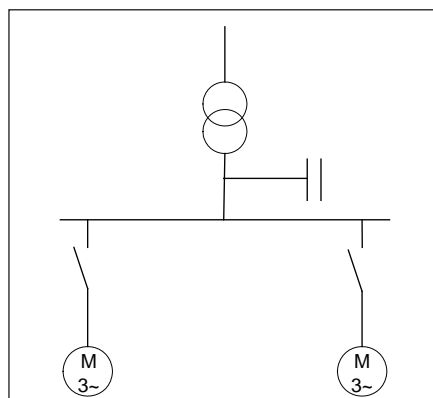


Fig. 8: Individuele transfocompensatie.

In vele gevallen wordt een vaste condensatorbatterij voorzien aan de secundaire klemmen van een transformator. Deze vaste condensator heeft als doel de reactieve nullastverliezen van de transfo te compenseren. De waarde van de condensator mag dus niet te groot genomen worden.

Wanneer de elektriciteitsmaatschappij een toeslag aanrekent voor capacitef verbruik moet men ervoor zorgen dat in periodes van kleine activiteit de vaste condensator het net niet capacitef brengt. Het vermogen van de vaste condensator mag hierdoor niet groter zijn dan het reactief nullastverlies van de transfo.

Berekening van het maximale condensatorvermogen:

voorbeeld: Transfo: 630 kVA / 400 V / 50 Hz

$U_{prim} = 15 \text{ kV} / I_o = 1,5 \% / U_k = 4 \%$

$I_{jzerverliezen} = 1480 \text{ Watt} / \text{rendement } (\eta) = 98,92 \%$

$I_{prim} = P_{trafo} / \sqrt{3} \cdot U \cdot \eta = 630000 / \sqrt{3} \cdot 15000 \cdot 0,989 = 24,51 \text{ A}$

$I_{nullast} = 1,5\% \cdot I_{prim} = 0,3676$

$S_{nullast} = \sqrt{3} \cdot U_{prim} \cdot I_{nullast} = \sqrt{3} \cdot 15000 \cdot 0,3676 = 9539 \text{ VA}$

$P_{nullast} = \text{ijzerverliezen} = 1480 \text{ Watt}$

$\cos \varphi = P_{nullast} / S_{nullast} = 1480 / 9539 = 0,1551$

$\varphi = \text{Argcos}(\cos \varphi) = \text{argcos}(0,1551) = 81^\circ$

$Tg \varphi = 6,369$

$Tg \varphi = Q_{cond} / P_{nullast}$

$\Rightarrow Q_{cond} = Tg \varphi \cdot P_{nullast} = 6,369 \cdot 1480 = 9,42 \text{ kVAR}$

Tabel 1 geeft voor een aantal transformatoren (met beperkte verliezen) een richtwaarde voor de te voorziene vaste condensatorenbatterij.

Transformatorvermogen (kVA)	Compensatievermogen (kVAR)
100	2,5
160	2,5
200	2,5
250	5
315	5
400	5
500	6
630	10
800	10
1000	12,5
1250	15
1600	20
2000	25
2500	30

Tabel 1: Indicatie van het compensatievermogen van recente transformatoren met beperkte verliezen

8.2. Individuele compensatie van asynchrone motoren:

Op elke motor wordt in parallel een condensator aangesloten. Omdat de compensatie van het blindvermogen aan de motor zelf gebeurt worden de aansluitkabels van de motor ontlast.

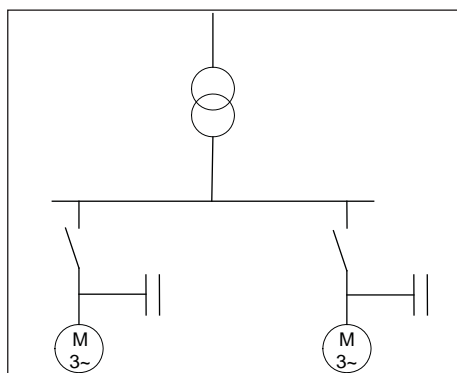


Fig. 9: Individuele motorcompensatie

Gebruik:

Bij motoren met grote vermogens en lange gebruikstijden.

Wanneer de kabels vrij krap gedimensioneerd zijn en van blindstroom ontlast moeten worden.

Voordelen:

- Kleine kostprijs per kVAr.
- Meestal geen extra schakelinrichting nodig.
- De aansluitkabels worden van blindstroom ontlast \Rightarrow Kleinere jouleverliezen in de aansluitkabels.

Nadelen:

- Grote installatiekosten
- Niet altijd mogelijk door plaatsgebrek bij de machine.
- Groter totaal te installeren vermogen nodig daar ook hier gelijktijdigheidsfactor een rol speelt.
- Moeilijker onderhoud vanwege de decentralisatie.

Berekening van het compensatievermogen:

Bij de individuele compensatie van asynchrone motoren mag het condensatorvermogen niet hoger zijn dan het reactief nullastvermogen van de motor; Dit teneinde overcompensatie bij nullast te vermijden en autoexitatie van de motor te voorkomen wanneer de machine niet meer belast wordt en uitschakelt.

Uit veiligheidsoverwegingen zal het compensatievermogen bij voorkeur beperkt worden tot 90% van het reactief nullastvermogen van de motor:

$$Q_c = 0,9 \cdot I_0 \cdot U \cdot \sqrt{3}$$

Met: Q_c : Compensatievermogen (kVAr)
 I_0 : Nullaststroom van de motor (A)
 U : Nominale spanning (V)

Voorbeeld: Motor 110 kW / 3000 tpm / 380 V

$\cos \phi$ bij vollast = 0,85 / $I_{nom} = 197$ A

Nullaststroom (I_0):

- gemeten wanneer de motor op nullast draait.
- uit de kenplaatgegevens van de motor.
- verondersteld op $\pm 1/3$ van de nominale stroom.

$\Rightarrow I_0 = \pm 65,5$ A

Compensatievermogen (Q_c):

$Q_c = 0,9 \cdot I_0 \cdot U \cdot \sqrt{3} = 0,9 \cdot 65,5 \cdot 380 \cdot \sqrt{3} = 39$ kVAr / 380 V / 50 Hz

Welke $\cos \phi$ bereikt men aldus?

Uit: $Q_c = P_a \cdot (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \Rightarrow \tan \phi_2 = \tan \phi_1 - (Q_c / P_a)$

$= 0,619 - 39 / 110 = 0,264$

$\Rightarrow \cos \phi_2 = 0,966$

Bij ongunstige werkomstandigheden (onbelaste werking of gedeeltelijke belasting) kan de arbeidsfactor onder de 0,9 blijven. In dat geval is een bijkomende compensatie door vb. een centrale condensatorenbatterij vereist.

8.3. Groepencompensatie:

Wanneer meerdere verbruikers steeds gelijktijdig werkzaam zijn, kan men ze als een groep beschouwen, en met een gemeenschappelijke condensator compenseren.

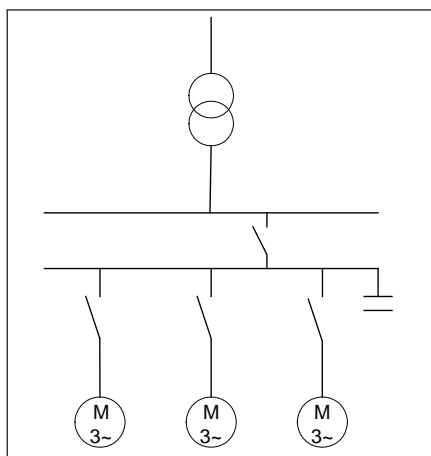


Fig. 10: Groepencompensatie

Gebruik:

Bij meerdere inductieve verbruikers die steeds samen werkzaam zijn.

Voordelen:

- De toevoerkabel naar de groep verbruikers wordt ontlast.
- Kleine kosten per kVAR.

Nadelen:

- Alleen maar toepasbaar voor groepen verbruikers.

8.4. Centrale compensatie:

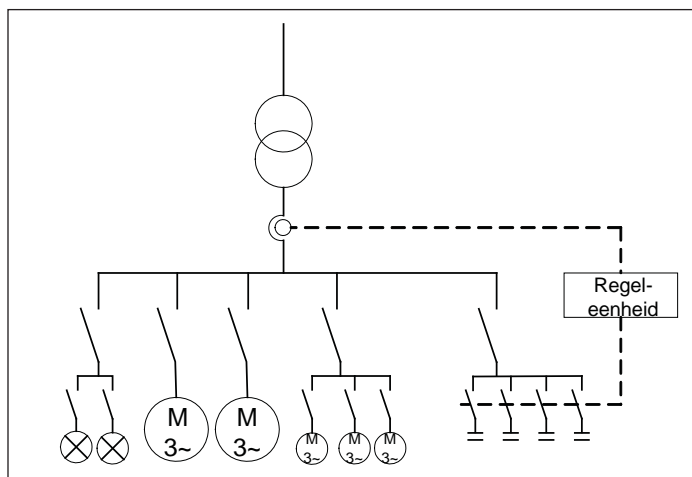


Fig. 11: Centrale compensatie

Verbruikers met wisselend reactief- of blindvermogen laten een vaste compensatie niet toe. Er kunnen immers oneconomische onder- en gevaarlijke overcompensaties optreden. Aldus moet men het condensator-vermogen aanpassen aan het variërend blindvermogen. Hiervoor wordt een algemene compensatie-eenheid aangesloten op het centraal punt van de installatie (vb bij de hoofdschakelaar). Het condensatorvermogen is opgedeeld in een aantal trappen welke door een automatische blindstroomregelaar in- en uitgeschakeld worden in functie van het vereiste compensatievermogen.

Het blindvermogen wordt aldus op elk ogenblik optimaal gecompenseerd.

Gebruik:

Kan in alle installaties gebruikt worden.

Voordelen:

- Overzichtelijk concept (eenvoudig voor onderhoud).
- Kleine installatiekosten.
- Klein totaal te installeren vermogen nodig vanwege het niet gelijktijdig werken van de verschillende machine.
- Prijsgunstiger wanneer antiharmonische spoelen vereist zijn.
- Eenvoudig uit te breiden met extra modules.
- Automatische optimalisering van de $\cos \varphi$

Nadelen:

- Grote kostprijs per kVAr.
- Het onderliggende net wordt niet van blindstroom ontlast.

9. Dimensionering van automatische condensatorenbatterijen

Algemeen worden automatisch geregelde condensatorenbatterijen geplaatst. Voor de bepaling van het vermogen van deze batterijen is de blindvermogenafname van het bedrijf of van belangrijke afdelingen maatgevend.

Onderstaande gevallen kunnen zich voordoen:

9.1. Project of bedrijf in ontwikkelingsfase:

In dit geval zijn er nog geen enkele meetgegevens beschikbaar. Men kan dan voorop stellen dat de blindvermogenbelasting in eerste instantie veroorzaakt wordt door asynchrone machines die met een gemiddelde $\cos \phi$ waarde van 0,75 werken. Om deze $\cos \phi$ op te voeren tot 0,9 wordt een condensatorvermogen van 40% van het actieve vermogen vereist. Rekening houdend met de gelijktijdigheidsfactor van de werking van de verschillende machines kan men dan het compensatievermogen bepalen als volgt:

$$Q_c = P \cdot g \cdot 0,4$$

Met: Q_c : Compensatievermogen (kVAr)
 P : Werkelijk afgenomen actief vermogen (kW)
 g : Gelijktijdigheidsfactor

Voorbeeld: $P = 600 \text{ kW}$ / $g = 0,7$
 $\Rightarrow Q_c = 600 \cdot 0,7 \cdot 0,4 = 168 \text{ kVAr}$

9.2. Bedrijf reeds in werking:

- **Registratie van het actief- en reactief vermogen (blindvermogen).**

Deze methode komt in de praktijk minder voor daar zelden de vereiste registrerende metingen beschikbaar zijn. In elk geval moet er voor gezorgd worden dat de metingen over een voldoende lange periode plaatsvinden, teneinde kortstondige belastingspieken te elimineren. Het is aan te bevelen de metingen over een hele week uit te voeren. Hierbij moet men er tevens rekening mee houden dat zich in de loop van het jaar belangrijke schommelingen in het afnamepatroon kunnen voordoen. Aan de hand van de verkregen meetgegevens wordt een representatieve waarde van het actieve- en blindvermogen bepaald.

Het vereiste condensatorvermogen bedraagt:

$$Q_c = P \cdot (T_g \varphi_1 - T_g \varphi_2)$$

$$= Q - (P \cdot T_g \varphi_2)$$

Met: Q_c : Compensatievermogen (kVAr)
 P : Werkelijk afgenomen actief vermogen (kW)
 Q : Gemeten gemiddelde blindvermogen (kVAr)
 $T_g \varphi_2$: Af te leiden uit de gewenste $\cos \varphi_2$

- Aan de hand van de maandelijkse facturen van de elektriciteitsmaatschappij.

Bij maandelijks gefactureerde verbruikers kan het vermogen van de condensatorenbatterij bepaald worden aan de hand van de facturen. Deze vermelden het actieve (kWh) en reactieve verbruik (kVAr), waaruit het condensatorvermogen kan worden berekend:

$$Q_c = (V_r - (V_a \cdot T_g \varphi_2)) / t \quad \text{of}$$

$$Q_c = (P_a \cdot (T_g \varphi_1 - T_g \varphi_2))$$

Met V_r : Reactief verbruik (kVArh)
 V_a : Actief verbruik (kWh)
 t : Bedrijfstijd (u)
 $T_g \varphi_1$: Uit de huidige $\cos \varphi_1$
 $T_g \varphi_2$: Uit de gewenste $\cos \varphi_2$

Het op deze wijze bepaalde condensatorvermogen is slechts een gemiddelde waarde voor één maand. Omwille van de schommelingen in verbruik op maandbasis is het aangewezen de berekeningen toe te passen met de gegevens op de facturen van verschillende maanden.

10. Compensatie in netten met harmonischen

10.1. Inleiding:

In laag- en middenspanningsnetten zijn niet enkel 50 Hz stromen aanwezig, maar vinden we ook stromen en spanningen met hogere frequenties. Deze hogere frequenties of harmonischen, welke door niet-lineaire verbruikers opgewekt worden, kunnen elektrische verbruikers overbelasten en beschadigen. Meestal wordt men zich pas bewust van de aanwezigheid van storende harmonischen, wanneer defecten optreden in elektrische toestellen die kostenintensieve productiestilstanden en dure herstellingen met zich meebrengen.

Lineaire verbruikers

Bij een lineaire verbruiker zal er bij het aanleggen van een sinusvormige spanning een sinusvormige stroom vloeien, al dan niet met een bepaalde faseverschuiving.

Niet-lineaire verbruikers

Niet-lineaire verbruikers daarentegen onttrekken bij het aanleggen van een sinusvormige spanning een niet sinusvormige stroom. Als niet lineaire verbruikers kennen we:

- Frequentieomvormers
- Gelijkrichtersgestuurde aandrijvingen
- Computers, TV toestellen
- Inductieovens
- Noodvoedingen
- Spaarlampen en gasontladingslampen
- Dimmers

10.2. Hoe ontstaan harmonische spanningen?

De niet-sinusvormige stromen, welke opgenomen worden door niet-lineaire verbruikers, zullen over de netimpedanties een spanningsval teweeg brengen waardoor ook de spanning vervormd wordt en niet 100% sinusvormig meer is. De ontstane golfvorm is volgens Fourier samengesteld uit een grondgolf (f_1) en een reeks golven met frequenties die een geheel veelvoud zijn van de grondfrequentie ($f_v = v \cdot f_1$).

De grondgolf of fundamentele is gelijk aan de netfrequentie (bij ons = 50 Hz).

De golven met hogere frequenties noemt men harmonischen.

De v -de harmonische heeft dus een frequentie van $v \cdot 50$ Hz.

Voorbeeld:

de 5-de harmonische (H5) heeft een frequentie van 250 Hz.

de 7-de harmonische (H7) heeft een frequentie van 350 Hz.

Vooraf in industrieën, waar een groot aantal niet lineaire verbruikers actief zijn, meet men een hoog gehalte aan harmonischen. Het zijn echter niet alleen de industrieën die de netspanning vervuilen. Ook in huishoudelijke elektriciteitsnetten worden, door TV-toestellen, spaarlampen en computers, heel wat harmonischen opgewekt.

10.3. Hoe hoog is het harmonische gehalte?

De harmonische vervuiling is vooral afhankelijk van het type niet-lineaire verbruiker en van het percentage niet-lineaire belasting op één bepaalde transfo.

Voorbeeld:

De opgewekte harmonische stromen, welke het gevolg zijn van het herhaaldelijk geleiden van thyristoren, van een driefasige ideale gelijkrichter zijn van de rang:

$$v = k.p \pm 1$$

Met: v : de rangorde van de harmonische
 p : het aantal pulsen van de gelijkrichterbrug
 $k = 1, 2, 3, \dots$

Een 6-pulsige ($p=6$) ideale gelijkrichterbrug zal dus harmonische stromen opwekken met volgende rang:

- $\Rightarrow v = 5$ en 7 voor $k = 1$
- $\Rightarrow v = 11$ en 13 voor $k = 2$
- $\Rightarrow v = 17$ en 19 voor $k = 3$
- $\Rightarrow \dots$

De grootte van elke opgewekte harmonische stroom is omgekeerd evenredig met de rang:

$$I_v = I_1 / v$$

Met: I_1 : de effectieve waarde van de stroom van de grondgolf
 v : de rangorde van de harmonische
 I_v : de grootte van de v -de stroomharmonische

Opmerking:

Wij wijzen u er op dat de bovenvermelde waarden slechts benaderde waarden zijn. In de praktijk vindt men vaak verschillende waarden.

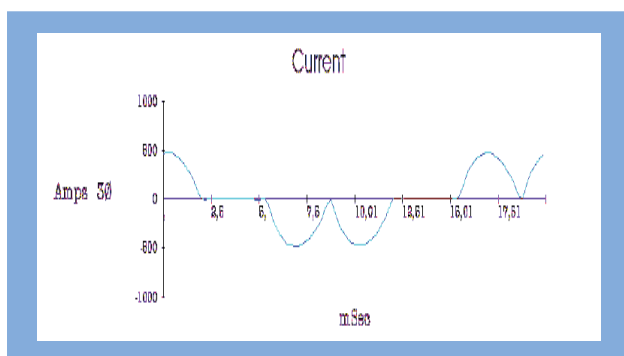


Fig 12 : Stroomverloop van een gelijkrichtergestuurde aandrijving

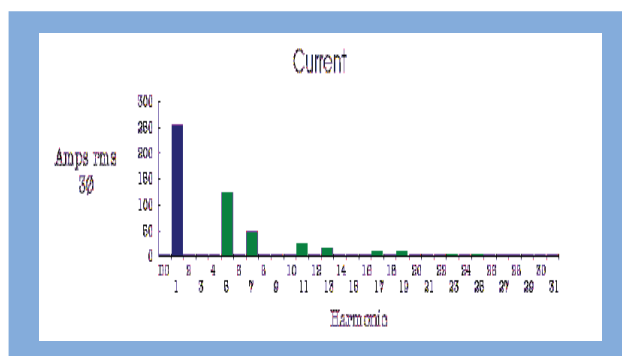


Fig 13 : Harmonische samenstelling van de stroom

De spanningsval die deze harmonische stromen zullen teweeg brengen over de transformatorwikkelingen is afhankelijk van de grootte van deze niet-lineaire stroom en de impedantie van het net.

Bij een groot aantal verschillende kleine niet-lineaire belastingen kunnen verscheidene opgewekte harmonische stromen elkaar gedeeltelijk opheffen.

De spanningvervorming zal meestal minder groot zijn dan de vervorming die men zou bekommen bij één grote niet-lineaire belasting. Hoe kleiner de impedantie van het net (vb. grotere trafo) hoe kleiner de spanningsvervorming zal zijn bij gelijkblijvende harmonische stromen.

Door verschillende koppelingen van transformatorwikkelingen kan men ervoor zorgen dat bepaalde harmonischen, opgewekt door de ene gelijkrichterbrug, worden opgeheven door harmonischen uit een andere gelijkrichterbrug.

11. Invloed van condensatoren op de netwerkimpedantie (theoretische benadering).

Wanneer men op een transformator, welke in hoofdzaak een spoel is, condensatoren aansluit dan ontstaat er een LC- of resonantiekring:

11.1. Parallelresonantie (condensatoren zonder seriespoelen)

Treedt op bij installatie van een gewone condensatorenbatterij (zonder filters).

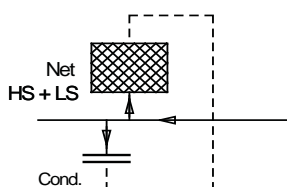


Fig. 14: Schema parallelresonantie

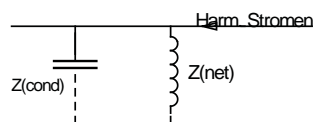


Fig. 15: Equivalent schema parallelresonantie

De equivalente impedantie, bekeken vanuit het aansluitpunt van de condensatorenbatterij, komt overeen met het in parallel schakelen van de impedantie van het bovenliggende net en die van de condensatoren:

$$Z(eq) = \frac{Z(net) \times Z(cond)}{Z(net) + Z(cond)}$$

Met : $Z(net)$: Impedantie van het net

$Z(cond)$: Impedantie van de condensatoren

Het verloop van deze equivalente impedantie in functie van de frequentie, en voor verschillende waarden van $Z(net)$ wordt hieronder weergegeven:

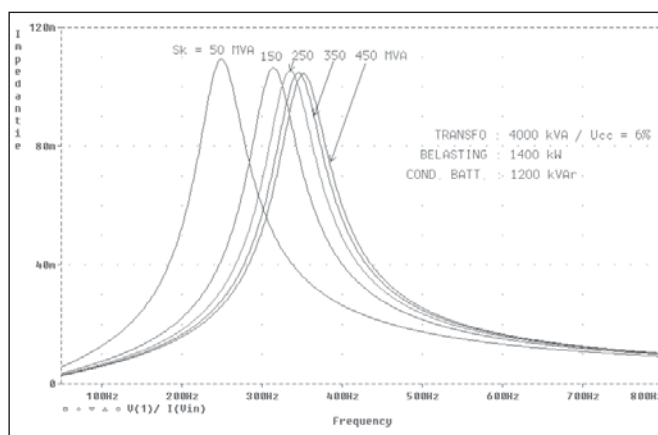


Fig. 16: Impedantie van het net bij verschillende kortsluitvermogens (Sk) (Parallelresonantie)

Uit bovenstaande formule zien we dat voor een bepaalde frequentie de equivalente impedantie theoretisch oneindig wordt, wanneer :

$$Z(net) = -Z(cond)$$

Beschouwen we de impedantie van het net als zuiver inductief dan kunnen we $Z(net) = -Z(cond)$ schrijven als:

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L(net) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C(cond))$$

En dan wordt de resonantiefrequentie:

$$(1) \quad f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L(net) \cdot C(cond)})$$

De juiste frequentie waarbij parallelresonantie optreedt is moeilijk te bepalen. Ze is namelijk afhankelijk van de impedantie van het bovenliggende net ($L(net)$) wat op zich evenredig is met het kortsluitvermogen op de plaats waar de condensatorenbatterij is aangesloten.

Het betreffende kortsluitvermogen:

$$S_k = U^2 / (2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot L(\text{net}))$$

Met: f_o : de grondfrequentie (50 Hz)

S_k : kortsluitvermogen

Het condensatorvermogen:

$$Q_c = U^2 \cdot \omega \cdot C(\text{cond}) = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot C(\text{cond})$$

Met deze twee vergelijkingen kan vergelijking (1) geschreven worden als:

$$f = f_o \cdot \sqrt{ (S_k / Q_c) } \quad \text{of}$$

$$n = f / f_o = \sqrt{ (S_k / Q_c) }$$

Met een condensatorenbatterij van 5 MVAR zal er resonantie optreden voor de harmonische met rang:

$$n = 5 \quad \text{als } S_k = 125 \text{ MVA}$$

$$n = 7 \quad \text{als } S_k = 245 \text{ MVA}$$

De parallel-resonantiefrequentie is dus afhankelijk van de exploitatie van het net, namelijk:

- De belasting van het voedende net.
($S_k \text{ min} \dots S_k \dots S_k \text{ max}$)
- Het aantal transformatoren in parallel.
-

Merken we op, dat de resonantiepiek in de praktijk niet oneindig is zoals in de vorige grafiek getoond is. De piek wordt in de realiteit beperkt door de dempende werking van de weerstanden die in deze uiteenzetting verwaarloosd werden. Niettegenstaande blijft parallelresonantie gevaarlijk en mag het aldus niet uit het oog worden verloren.

11.2. Serieresonantie (condensatoren met seriespoelen)

Deze vorm van resonantie treedt op bij de installatie van een condensatorenbatterij, voorzien van seriespoelen.

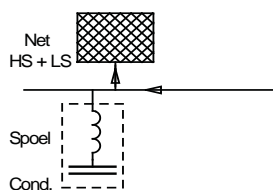


Fig. 17: Schema serieresonantie

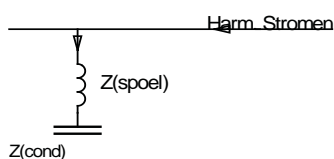


Fig. 18: Equivalent schema serieresonantie

De totale impedantie van de filtereenheid (condensator - spoel) wordt gevormd door de serieschakeling van de condensator en de spoel.

$$Z(\text{eq}) = Z(\text{cond}) + Z(\text{sp})$$

Voor een bepaalde frequentie wordt de equivalente impedantie nul. Die frequentie noemt men de **afstemfrequentie** van de filter. Het verloop van de impedantie is hieronder weergegeven. We zien dat het in fig. 19 gaat om een filter met een afstemfrequentie van 189 Hz.

Bij de afstemfrequentie is:

$$Z(\text{eq}) = 0$$

$$\text{of is : } Z(\text{sp}) = -Z(\text{cond})$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L(\text{sp}) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C(\text{cond}))$$

Waaruit volgt dat :

$$f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{ (L(\text{sp}) \cdot C(\text{cond})) })$$

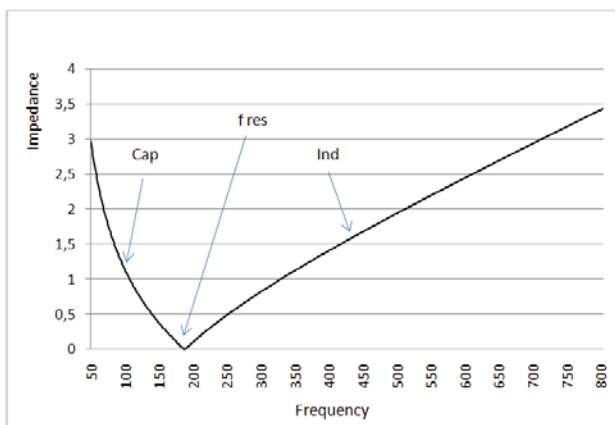


Fig. 19: Filterimpedantie in functie van de frequentie (de afstemfrequentie is in dit vb 189Hz)

Voor frequenties lager dan de afstemfrequentie is de filterimpedantie **capacitief**.

Voor frequenties hoger dan de afstemfrequentie is de filterimpedantie **inductief**.

Op de afstemfrequentie is de impedantie theoretisch nul. Dit wil zeggen dat eventuele harmonische stromen met een dergelijke frequentie volledig worden opgenomen. Het spreekt vanzelf, dat bij de dimensionering van de filtereenheid, hiermee moet worden rekening gehouden. In de praktijk wordt de impedantie naar onder toe beperkt door de weerstand van de spoel welke functie is van de kwaliteitsfactor (Q) van de spoel.

11.3. Antiresonantie (condensatoren met seriespoelen)

Daar waar het gebruik van condensatoren met spoelen het toelaat harmonischen met een grotere frequentie dan de afstemfrequentie af te zuigen, bestaat echter de kans dat harmonische stromen met lagere frequenties worden versterkt.

Deze situatie is te wijten aan het fenomeen van **antiresonantie** wat eigenlijk parallelresonantie inhoudt tussen de filterimpedantie en de impedantie van het bovenliggende net.

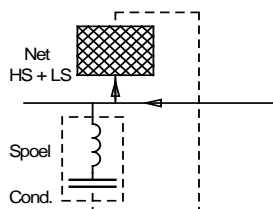


Fig 20: Schema antiresonantie

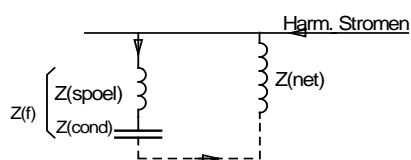


Fig 21: Equivalent schema antiresonantie

De equivalente weerstand vanuit het barenstel bekeken is:

$$Z(eq) = \frac{Z(net) \times Z(f)}{Z(net) + Z(f)}$$

De equivalente weerstand wordt oneindig als:

$$Z(net) + Z(f) = 0$$

met: $Z(f) = Z(cond) + Z(sp)$ bekommen we:

$$Z(net) + Z(cond) + Z(sp) = 0$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L(net) + L(sp)) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C(cond))$$

Waaruit volgt dat :

$$f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L(net) + L(sp)) \cdot C(cond)})$$

Vergelijking van deze uitdrukking met diegene bij serieresonantie, toont ons dat de anti-resonantiefrequentie steeds lager is dan de afstemfrequentie van de filter.

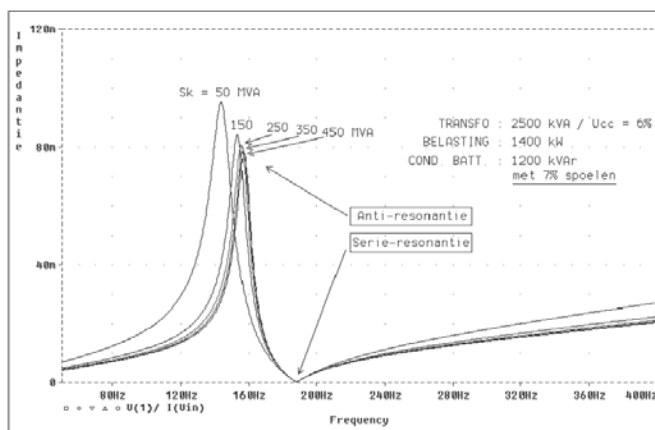


Fig. 22: Anti- en serieresonantie voor verschillende kortsluitvermogens van het bovenliggende net.

12. Condensatorenbatterijen met of zonder seriespoelen?

12.1 Netwerken zonder condensatoren.

Veronderstellen we onderstaand netwerk:

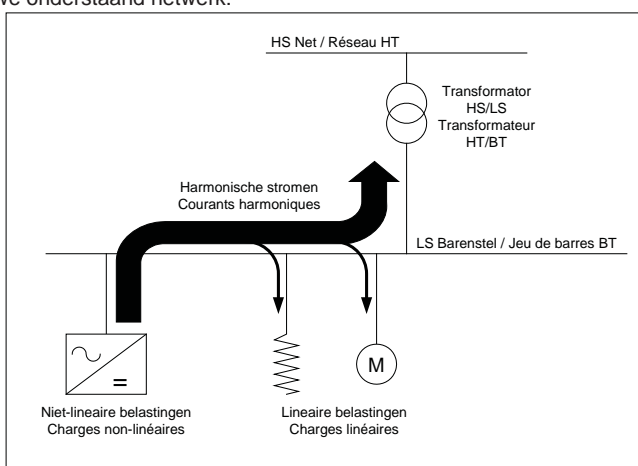


Fig. 23: Netwerk zonder condensatoren.

De harmonische stromen, opgewekt door de niet-lineaire verbruikers, zullen over de netimpedantie (kabels, trafo, HS- net,...) harmonische spanningen creëren, waardoor er een vervorming van de spanning ontstaat. Vanuit de verbruikerszijde bekeken, verloopt de impedantie van het net in functie van de frequentie, zoals weergegeven in fig 24. Deze impedantie wordt des te hoger naarmate het kortsluitvermogen van het net lager is. In deze situatie zullen, bij dezelfde harmonische stromen, de opgewekte harmonische spanningen groter zijn. Erger wordt het wanneer in een elektrisch netwerk condensatoren aanwezig zijn.

12.2 Netwerken in aanwezigheid van condensatorenbatterijen

De plaatsing van een gewone condensatorenbatterij heeft een grote invloed op de uitbreiding van harmonischen in elektriciteitsnetten. Zoals besproken in vorig hoofdstuk ontstaat er immers een resonantiekering (parallelresonantie) tussen de spoel van de trafo (+ net) en de capaciteiten van de condensatorenbatterij. Voor bepaalde frequenties treedt er een verhoging van de netimpedantie op. (zie fig 24)

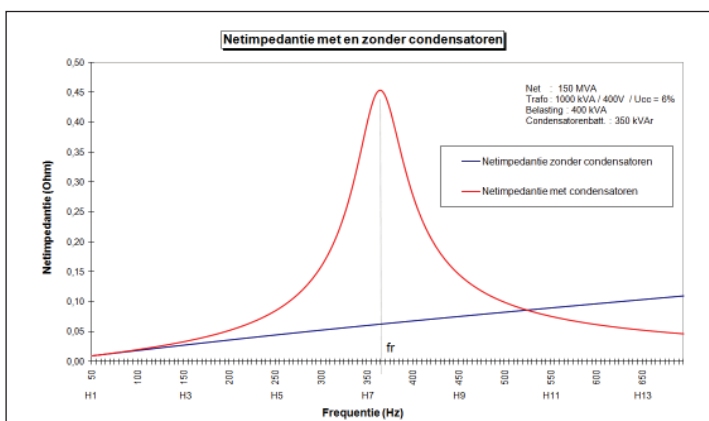


Fig. 24: Netimpedantie met en zonder condensatoren

Het maximum, beperkt door de weerstand (R) van de lineaire verbruikers en de kabels, vindt men bij de zogenaamde resonantiefrequentie (f_r), welke functie is van de karakteristieken van de trafo en de grootte van de condensatorenbatterij (zie parallelresonantie).

Bij verhoogde impedantie van het net zullen de harmonische stromen veel grotere harmonische spanningen opwekken dan in een net zonder condensatoren waar de netimpedantie in het grootste deel van het frequentiespectrum lager ligt. Wanneer harmonische stromen in het net aanwezig zijn, met een frequentie die de resonantiefrequentie benadert, dan treedt er een gevaarlijke situatie op. De harmonische stromen zullen namelijk grote spanningspieken veroorzaken, over de voor die frequenties grote weerstand.

Een sneeuwbaaleffect ontstaat: De opgewekte hoge harmonische spanningen zullen op hun beurt grote harmonische stromen teweeg brengen in de condensatorenbatterij die zich vectoriëel optellen met de geïnjecteerde harmonische stromen (zie fig 25).

Hierdoor nemen de harmonische spanningen opnieuw toe. Een evenwicht (maximum) wordt bereikt door de weerstand van het net.

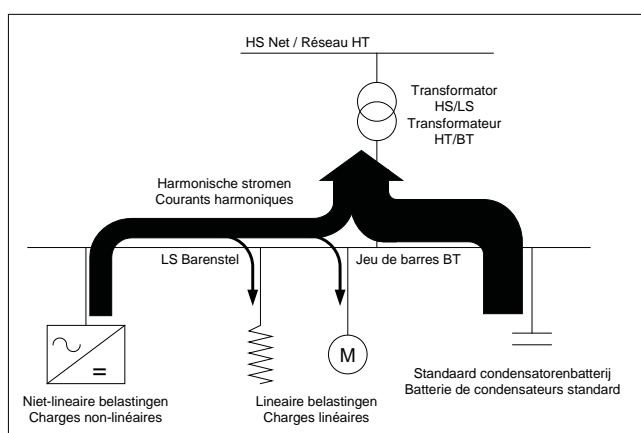


Fig. 25: Netwerk met standaard condensatorenbatterij.

Schade aan elektrische apparaten en aan de condensatorenbatterij zijn vaak een gevolg van hoge harmonische spanningen.

Bij automatische condensatorenbatterijen verandert het ingeschakelde vermogen trapsgewijs. Bij elke in- of uitschakeling van een condensatortrap verandert dus ook de resonantiefrequentie. Wanneer geen grondige analyse wordt gemaakt bij de plaatsing van een gewone condensatorenbatterij in een net met harmonischen, is de kans op spanningsopslingeren en defecten zeer reëel.

12.3 Netwerken in aanwezigheid van condensatorenbatterijen met seriespoelen

Is elke condensatortrap voorzien van een seriespoel dan verloopt de netimpedantie als volgt:

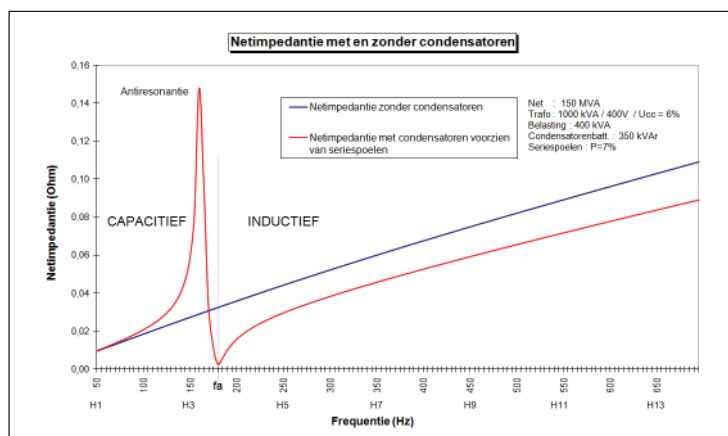


Fig. 26: Netimpedantie met condensatoren voorzien van seriespoelen en zonder condensatoren.

Voor een welbepaalde frequentie wordt de impedantie quasi nul (afstemfrequentie (f_a)). Een harmonische stroom met een dergelijke frequentie zal bijna volledig door de condensatoren-batterij (passieve filter) worden opgenomen. Voor frequenties boven de resonantiefrequentie gedraagt het netwerk zich inductief. De netimpedantie is ook lager dan in een net zonder condensatoren.

Een deel van de harmonische stromen zal opgenomen worden in de filter en komt dus niet meer in het net terecht (zie fig 27).

Hierdoor verlaagt men de vervuilsgraad van het net.

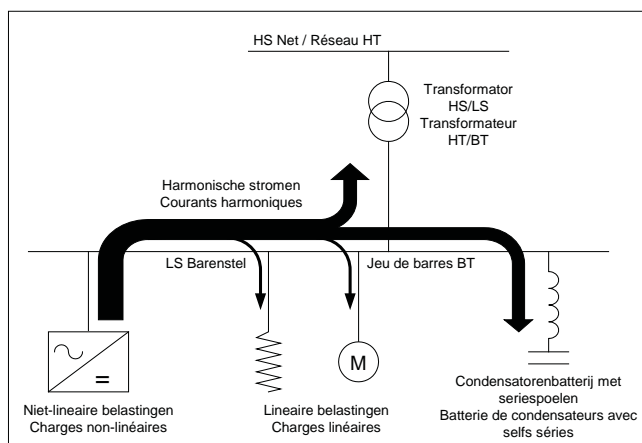


Fig. 27: Netwerk met een condensatorenbatterij voorzien van seriespoelen voor harmonischen.

Hoeveel en welke harmonischen worden afgezogen is afhankelijk van het type filter. De keuze hangt af van de huidige vervuilingsgraad, het te bereiken resultaat en de frequentie van het toonfrequentsignaal (voor de sturing van o.a. dag-nacht tellers) in uw regio. Het spreekt voor zich dat men deze signalen, welke door de elektriciteitsmaatschappij in ons distributienet geïnjecteerd worden, niet mag verstoren. Voor harmonischen met frequenties, lager dan de afstemfrequentie, bestaat nog steeds de kans op spanningsopslingeringen. Dit is te wijten aan het fenomeen van antiresonantie zoals verduidelijkt in vorig hoofdstuk. Bij de dimensionering van een filter zorgt men ervoor dat de antiresonantiefrequentie niet samenvalt met een nadrukkelijk aanwezige harmonische.

13. Condensatorenbatterijen met seriespoelen in de praktijk

13.1 Sperfactor

Seriespoelen worden gekenmerkt door de **sperfactor p** die staat voor de verhouding van de impedantie van de spoel op de impedantie van de condensatoreenheid.

Uitgedrukt:

$$p (\%) = \frac{X_L}{X_C}$$

We onderscheiden in de praktijk sporfactoren van :

5.6 - 7 - 8 - 12.5 - 13 en 14 %.

Seriespoelen met eenzelfde sporfactor zullen in combinatie met de bijhorende condensatoreenheid eenzelfde afstemfrequentie hebben (zie onderstaande tabel).

Door het plaatsen van een seriespoel in serie vóór de condensatoreenheid zal er een spanningsverhoging optreden aan de klemmen van de condensatoren. De spanningsval die ontstaat over een spoel wanneer deze wordt doorlopen door een capacatieve stroom telt zich namelijk op bij de netspanning. Hierdoor is het noodzakelijk om condensatoren met verhoogde nominale spanning te gebruiken, wanneer ze in combinatie met seriespoelen worden aangewend. Hoe groot de spanning op de condensatoren wordt, vindt men in onderstaande tabel 2.

Sperfactor	Afstemfrequentie (Hz)	Spanning op de cond. bij 400V net
5,67	210	424
7	189	430
8	177	435
12,5	141	457
13	139	460
14	134	465

Tabel 2: Invloed van de sporfactor op de nominale spanning van de condensatoren.

13.2 Invloed op toonfrequentesignalen voor CAB signalen (centrale afstandsbediening)

Bij het gebruik van seriespoelen zal de impedantie van het net (met cond. batt) in het frequentiedomein rond de afstemfrequentie laag zijn. Het onderstaand voorbeeld toont van het verloop van de netimpedantie bekeken vanuit het injectiepunt van de toonfrequentesignalen. Het verloop is functie van de karakteristieken van de trafo, de condensatorenbatterij en de belasting.

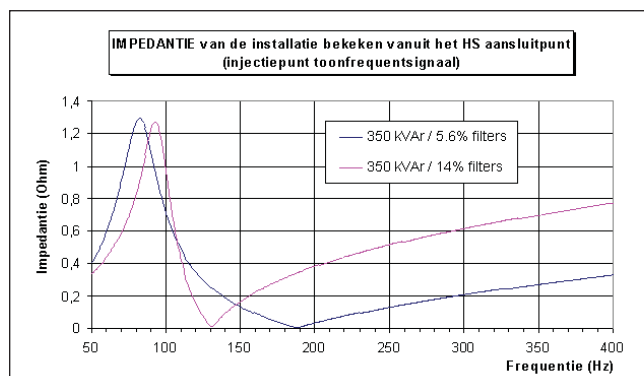


Fig. 28: Invloed van de filters op de netwerkimpedantie bekeken vanuit het HS aansluitpunt.

Door sommatie van de impedantie van de transformator met die van de condensatorenbatterij is de afstemfrequentie van de gehele installatie (trafo+batterij) lager dan de afstemfrequentie van de condensatorenbatterij.

Hierdoor kan een batterij met een afstemfrequentie die hoger ligt dan de frequentie van het toonfrequentesignaal, in combinatie met de trafo, zeer storend zijn voor het toonfrequentesignaal.

Op de figuur zien we dat de batterij met 5,6% spoelen die een afstemfrequentie heeft van 210 Hz in combinatie met HS transformator, voor het toonfrequentesignaal, een geheel vormt met een zeer lage impedantie voor 180 Hz.

Bij de keuze van de filters van de condensatorenbatterij moet rekening gehouden worden met de aanwezigheid van het toonfrequentesignaal. Om geen storingen te veroorzaken op het TF signaal houdt men zich best aan volgende richtlijnen:

Toonfrequentesignaal (Hz)	Sperfactor van de seriespoelen
< 250 Hz	P >= 14%
250 - 350 Hz	P >= 7%
> 350 Hz	P >= 5,6%

Tabel 3: Invloed van het toonfrequentesignaal op de keuze van de seriespoelen.

13.3 Toonfrequentisfilters voor CAB signalen

Bij het gebruik van condensatorenbatterijen zonder filters bestaat eveneens de mogelijkheid dat de impedantie zeer laag wordt voor het aanwezige TF signaal. In dat geval moet vóór de condensatorenbatterij een sperfilter geplaatst worden die belet dat het TF signaal door de batterij wordt opgenomen. Een dergelijke filter noemt men een toonfrequentisfilter.

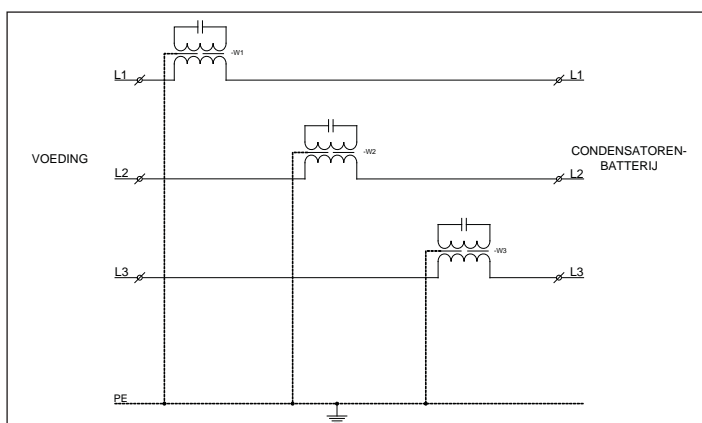


Fig. 29: Toonfrequentisfilter voor condensatorenbatterij.

In de regio Antwerpen zijn 1350 Hz toonfrequentesignalen aanwezig. Voor een dergelijke frequentie is de impedantie van een condensatorenbatterij zeer laag.

De impedantie is immers:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (X_c \text{ daalt als de frequentie stijgt})$$

Voor deze regio is men dan ook verplicht om 1350 Hz toonfrequentfilters te plaatsen bij de aansluiting van standaard condensatorenbatterijen. Worden de batterijen voorzien van seriespoelen voor harmonischen dan zijn 1350 Hz toonfrequentfilters niet meer nodig.