

Bijlage 1. Netvervuiling

In het elektriciteitsnet treden op verschillende manieren vervuilingen op. Daarmee wordt bedoeld dat de zuivere sinusvormig spanning en stroom niet meer zuiver sinusvormig zijn. Dat heeft veel ongewenste bijverschijnselen, zoals onbedoeld energieverlies via het warm worden van lijnen/kabels of apparatuur en spontaan af schakelen van beveiligingen.

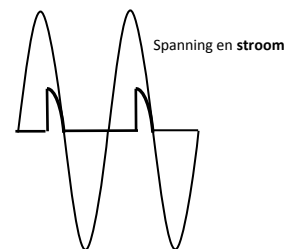
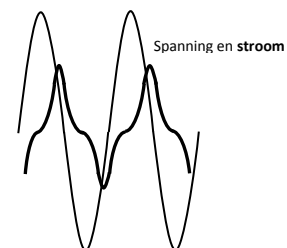
Als een zuiver sinusvormig signaal vervuild wordt en daardoor vervormd is, kunnen we spreken van 'harmonischen' in het signaal. Een harmonische frequentie is een aantal malen 'n' (gehele getallen) van een grondfrequentie f_g . Dus $f_h = n f_g$

Het onderwerp harmonischen is één van de onderwerpen van het aspect 'Power Quality'.

We kijken in deze bijlage verder alleen naar de periodieke vervorming, dat wil zeggen dat de betreffende vervorming elke periode van de frequentie (50Hz) optreedt.

De hoofdoorzaken van periodieke vervorming zijn als volgt te verdelen:

- Ten eerste de vervuiling die ontstaat door de **niet lineaire eigenschappen** van een systeem. Als bijvoorbeeld een generator een niet zuiver sinusvormig signaal opgewekt of als een zuiver sinusvormig spanningssignaal door de niet lineaire eigenschappen van een apparaat in stroom vervormd wordt, zoals in een transformator. Zie nevenstaand figuur.
- Een tweede vorm van periodieke vervorming ontstaat doordat we in het elektriciteitsnet elke periode op gelijke wijze **schakelen**. Denk daarbij aan een elektronische dimmer van een lamp. Zie nevenstaand figuur.



De bovengenoemde vervormingen ontstaan vooral omdat de stroom vervormd wordt. Het gevolg van een vervormde stroom is dat deze stroom in het totale circuit ook weer vervormde spanningen zal veroorzaken. Het een is het gevolg van het ander.

Doordat het vooral bij schakelende apparatuur niet goed voorspelbaar is welke apparaten welke vervorming geven en al dan niet in gebruik zijn, is nauwelijks te voorspellen welke harmonischen er op zullen treden.

Harmonischen:

Elke periodieke vervorming levert 'harmonische' signalen op. We zien vooral de effecten van de vervorming terug op oneven harmonische van de 50Hz grondfrequentie, en met name de 3^e harmonische, dus de 150Hz. Onderstaand volgt daarvoor een verklaring.

Om harmonischen te begrijpen moeten we een wiskundige stap maken, die 'Fourier analyse' wordt genoemd. De formele wiskundige uitleg kan op internet worden gevonden. Daarin wordt bewezen dat **elk periodiek signaal is terug te brengen tot de som van sinus- en cosinusvormige signalen, die in frequentie een aantal maal een geheel getal van de grondfrequentie zijn**. De formule die daarvoor kan worden gebruikt is:

$$y(t) = 0,5a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + \dots + a_n \cos(n\omega t) + \dots b_1 \sin(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) + \dots + b_n \sin(n\omega t)$$

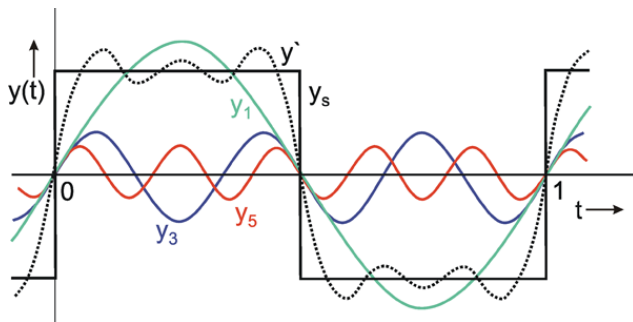
Als de wiskundige beschrijving van een signaal bekend is zijn er formules om de termen a en b uit te rekenen. De berekeningen en afleidingen zelf geven we hier niet. Op internet is daarover voldoende informatie te vinden.

We nemen als voorbeeld een blokgevormig signaal in onderstaand plaatje. Daarbij is $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ met $T = 1$, dus $\omega = 6,28$ rad/s. Het signaal is evenredig verdeeld rond de $y = 0$ as, dus $0,5a_0 = 0$, zodat $a_0 = 0$. Verder is te berekenen wat a_1 t/m a_n gaan worden, namelijk allemaal $= 0$. De termen $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, \dots$ worden respectievelijk $1, \frac{1}{3}, 0, \frac{1}{5}, 0, \frac{1}{7}, 0, \dots$. We krijgen dan voor het blokgevormig signaal de Fourierbeschrijving:

$y(t) = \sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) + \dots + b_n \sin(n\omega t)$, waarbij $\omega = 6,28$, dus nog iets verder uitgewerkt:

$$y(t) = \sin(6,28t) + \frac{1}{3}\sin(18,84t) + \frac{1}{5}\sin(31,4t) + \frac{1}{7}\sin(31,4t) \dots + b_n \sin(n\omega t) \text{ zodat}$$

$$y'(t) = \sin(6,28t) + \frac{1}{3}\sin(18,84t) + \frac{1}{5}\sin(31,4t)$$



Waar het hier om gaat is dat (net als bovenstaand blokgevormig periodiek signaal) elk periodiek signaal te vertalen is als een groep van sinussen en cosinussen die in frequentie steeds hoger worden, een aantal malen de grondfrequentie zijn en tegelijk meestal steeds zwakker worden in de hogere frequenties.

Voor een 50Hz signaal dat zuiver sinusvormig is, hebben we alleen $y(t) = 230 \cdot \sin(314t)$ [V], waarbij 230 de effectieve waarde van de spanning voorstelt, en 314 is de frequentie in rad/s. Als het signaal vervormd wordt ontstaan dus harmonischen, waarbij we meestal de 3^e, 5^e en 7^e harmonischen als sterkste signaal terugvinden, dus de 150Hz, 250Hz enz. Meestal zal de sterkste harmonische de 3^e harmonische zijn. Na de 7^e harmonische tellen de harmonischen in de praktijk nauwelijks nog mee.

Hoe sterk welke harmonische is, kan vooraf moeilijk worden gezegd, omdat dit van de vervorming van het signaal afhangt.

De oorspronkelijke 50Hz zuivere sinusvorm heeft een bepaald vermogen. Na vervorming zal het totale vermogen gelijk blijven en zich verdelen over de grondfrequentie en alle harmonischen. De harmonische frequenties kunnen normaal gesproken vanwege het onvoorspelbare karakter, verder niet worden gebruikt. Dit betekent dat het oorspronkelijk bedoelde vermogen in het 50Hz signaal door de vervorming kleiner wordt. In de energietechniek is dit zeer ongewenst. Pas als er enige voorspelbaarheid in de vervorming is kan men daarop inspelen. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij drie fase transformatoren.

Ook kan men ongewenste harmonischen met filters verzwakken, blokkeren of kortsluiten. In de zwakstroomtechniek zien we dit vaak doordat een aansluitsnoer een extra 'blokje' bevat, meestal

uitgevoerd als een spoel met een ferrietkern. Zie nevenstaande foto. De wisselstroomweerstand van de spoel luistert naar de formule $X_L = \omega L$. Hogere (harmonische) frequenties worden hier min of meer (afhankelijk van de hoogte van de harmonische) verzwakt.

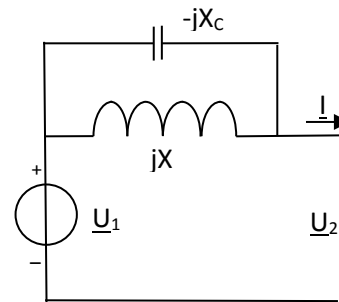


Voor al bij schakelende apparatuur met onbekende frequenties, zijn veel hogere harmonischen. Door dit filter toe te passen kan men enigszins voorkomen dat allerlei storingen vanuit het apparaat zich door het net verspreiden.

Als we de harmonische frequenties kennen, zoals in de energietechniek waar het producten zijn vanuit de 50Hz (dus 150Hz, 250Hz, ..), kunnen we meer effectieve filters gebruiken, zoals resonantiefilters. Door een L en C parallel aan elkaar te zetten krijgen we, als we dit complex

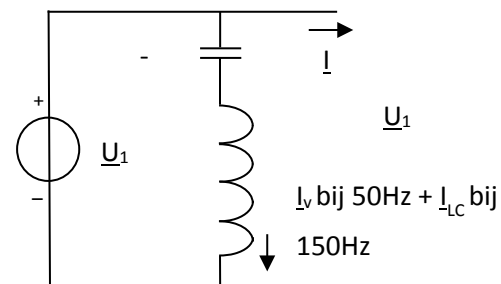
berekenen: $Z = \frac{j\omega L * \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}$. Dan wordt $Z \rightarrow \infty$ als $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. We kunnen een L en C kiezen die bijvoorbeeld de 150Hz blokkeert en de 50Hz vrijwel 'ongehinderd' door laat. Dit laatste wordt bepaald door de kwaliteit (kwaliteitsfactor) van het filter. Hoe groter de C tov de L, hoe beter de 50Hz wordt doorgelaten.

Nevenstaand een voorbeeld van een dergelijke schakeling. De vervorming in U_1 van 150Hz wordt hier volledig geblokkeerd en zal in U_2 niet terug te vinden zijn. De 50Hz zal nu een LC parallelcircuit zien welke in serie staat, waardoor de uitgangsspanning U_2 nu iets kleiner zijn. In welke mate dit gebeurt hangt dus af van de kwaliteitsfactor van het filter.



In plaats van het filter in serie met een circuit te schakelen kan het ook parallel. We kiezen dan voor een serieschakeling van een L en C. Nu zullen L en C voor één van de harmonische frequenties een kortsluiting vormen. Voor complex rekenen krijgen we:

$$Z = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = 0$$



Werken we dit uit dan krijgen we opnieuw dat $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Zo zal bijvoorbeeld de 150Hz harmonische kortgesloten worden en een stroom I_{LC} geven. Bij 50Hz zal er echter een zekere 'verliesstroom' I_v lopen. De kwaliteitsfactor is ook hier weer voor bepalend. Hoe groter L t.o.v. de waarde van C, hoe minder groot de verliesstroom zal zijn bij 50Hz.

De twee genoemde resonantiefilters zijn in de praktijk minder ideaal omdat vooral de spoel met een eigen ohmse weerstand bepalend zal zijn hoe goed de kwaliteitsfactor is.

Om beter of meerdere harmonische frequenties te onderdrukken moeten meerdere resonantiecircuit met de juiste L en C of parallel of in serie of in combinatie hiervan worden geschakeld. Bij parallel filters (die onderling in serie met elkaar staan) levert dat steeds meer spanningsverlies op en bij seriefilters (die onderling parallel staan) steeds meer stroomverlies op.

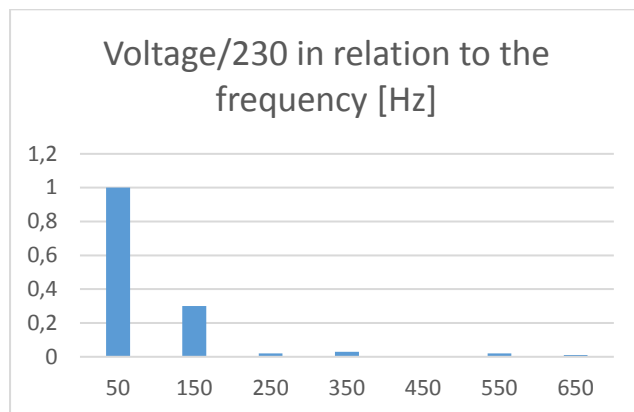
Voor het uitgebreide rekenwerk kan men de elektronica theorie volgen of formule boekjes raadplegen. Zie ook verschillende informatie van fabrikanten, zoals van [ABB](#).

Metten van spanningen en stromen:

Oude meters meten vaak alleen het 50Hz signaal. Dat kan onbedoeld een vertekend beeld geven. Omgekeerd kan een meter die tot in de kHz meet, en dus de harmonischen mee neemt, weer een vertekend beeld geven van de grootte van een 50Hz spanning of stroom.

De verhouding tussen de gemiddelde waarde en de effectieve waarde van een sinus is normaal gesproken 1,11. Hierbij wordt uitgegaan van een berekening over een halve periode van de sinus. Van dit principe wordt gebruik gemaakt van een meter met 'True RMS', zodat de werkelijke effectieve waarde, dus inclusief die van de harmonischen, van een signaal wordt gemeten.

De verschillende sterktes van de harmonischen worden veelal gemeten met een vermogen of spanning/stroom-frequentie meter (analyzer). Een voorbeeld van een dergelijke meting is onderstaand gegeven:



Total Harmonic Distortion:

De verhouding tussen de vermogens van de harmonischen ten opzichte van de grondfrequentie wordt de Total Harmonic Distortion, THD, genoemd. In formulevorm:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=3}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \text{ of } \frac{\sqrt{\sum_{n=3}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \text{ of } \frac{\sum_{n=3}^{\infty} P_n}{P_1}$$

Meestal wordt de THD in procenten aangegeven en moeten we bovenstaande formule eerst vermenigvuldigen met 100.

We geven voorbeelden waar we de harmonische vervorming in de elektrische energietechniek veel tegenkomen:

- Bij een drie fase systeem met symmetrische belasting zullen de fasestromen van de 50Hz elkaar in de nul leider precies opheffen. De harmonische frequenties zullen echter bij elkaar opgeteld worden. Het resultaat is dat in de nulleider juist stroom gaat lopen. Bij veel harmonischen kan deze stroom zelfs groter zijn dan de stroom in één van de fasedraden. Oplossing; verlagen van de ohmse weerstand van de nulleider door bv een fysieke draad in het systeem mee te nemen van voldoende dikte.

- Overbelasting van kabels en lijnen ivm skin-effect, omdat hogere (= harmonische) frequenties de draden als steeds hogere weerstand zien. De draden (lijnen of kabels) worden berekend om tot aan hun grens te belasten. In de berekening moet dus worden meegenomen dat ook harmonischen voor 'extra' (ivm skinn-effect) belasting zorgen.
- Onverwachts uitschakelen van beveiliging omdat harmonischen door onbekende periodieke schakelmomenten van apparaten voor grotere stromen kunnen zorgen. Denk daarbij ook aan resonantie (blind-)stromen (bij bepaalde frequenties van harmonischen komen bepaalde L's met C's in een resonantie situatie) die spontaan zeer groot kunnen worden. Het is juist dan achteraf lastig vast te stellen waar de beveiliging door uitgeschakeld is.
- Overbelasting transformatoren en elektrische machines; oplossing; extra zware uitvoeringen. Voor transformatoren kunnen we kiezen voor speciale type transformatorschakelingen die harmonische kunnen elimineren, zoals de traditionele ster-driehoek schakeling, die alle drievoudige harmonische in de driehoekschakeling zal afvangen. Extra windingen kunnen worden gebruikt voor het afvangen van de andere harmonischen. Zulke maatregelen zijn vooral nodig voor bv computerruimten. Bij elektrische machines kunnen hogere harmonischen ook nog zorgen voor het niet zuiver in tijd ronddraaien van de rotor. Tijdens het normale toerental zullen dus vooral drie maal dit toerental (3^e harmonischen) pulsen tegelijk plaatsvinden.

Regelgeving:

Vanuit de EN50160 wordt duidelijk wat de maximale waarden voor de verschillende typen van netvervuiling mogen zijn. De IEC61000 geeft aan hoe er dient te worden gemeten, wat de maximale bijdrage in vervorming mag zijn van een apparaat ed.

De netcode stelt grenzen aan het LS en MS net tot 35kV 8% THD gedurende 95% van de week. Voor harmonische vervorming van de stroom is een THD van 25% de maximale bovengrens.