

Nulgeleiderstromen in laagspanningsinstallaties

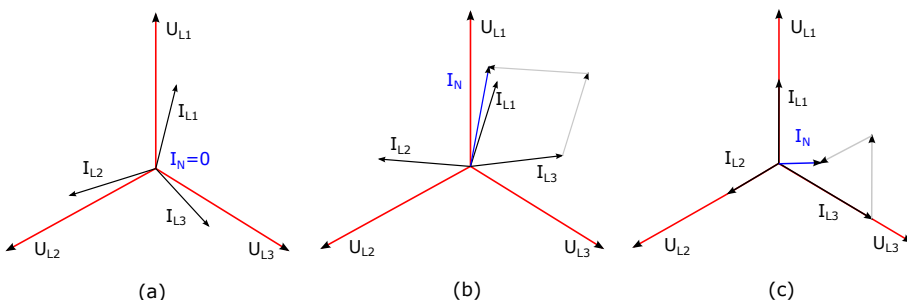
Onderzoeksgroep EELAB - Lemcko

Universiteit Gent campus Kortrijk, Graaf Karel de Goedelaan 34, B-8500 Kortrijk

contact: lemcko@ugent.be

1 Situering

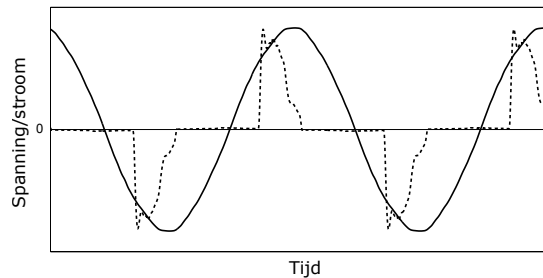
Het merendeel van de industriële, driefasige laagspanningsinstallaties bevat een nulgeleider. Dit heeft verschillende voordelen: het overbrengen van een nul-potentiaal, het grotendeels vermijden van nulpuntverschuivingen in de spanning, het wegvoeren van verschilstromen. . . Indien dergelijk netsysteem belast wordt met een driefasige, symmetrische én evenwichtige belasting, dan kan de stroom door die nulgeleider verwaarloosbaar klein beschouwd worden (Figuur 1.a). Het begrip *evenwichtige belasting* slaat op de gelijkheid in grootte van iedere stroomvector (Figuur 1.b). Met het begrip *symmetrische belasting* wordt een belasting bedoeld waarbij de hoek tussen de verschillende stroomvectoren 120° is (Figuur 1.c). Indien het overgrote deel van de geïnstalleerde belastingen als symmetrische en evenwichtige verbruikers beschouwd kunnen worden, dan kan de nulgeleider verminderd worden in doorsnede. Op vandaag de dag moet er daar echter voorzichtig mee omgesprongen worden. Door de massale implementatie van niet-lineaire verbruikers zoals: computers, Tv's, spaarlampen en andere elektronische verbruikers, kunnen situaties verkregen worden waar zelfs het vergroten van de nulgeleider een noodzaak blijkt.



Figuur 1: Fasordiagram van een driefasige symmetrische en evenwichtige belasting (a); evenwichtige belasting (b); symmetrische belasting (c)

2 Probleemstelling

Energiebewust leven is een kerntaak geworden van de hedendaagse samenleving. Op verschillende manieren wordt getracht het globaal energieverbruik tot een minimum te beperken. Dit niet alleen door op een duurzame en efficiënte manier elektrische energie op te wekken, maar ook door die energie efficiënter te gaan verbruiken. Het massaal invoeren van spaarlampen en Ledverlichting zijn daar twee voorbeelden in. Die twee energiebesparende toestellen werken op een DC-spanning. Aangezien ons huidig elektriciteitsnetwerk op wisselspanning uitgebaat wordt, spreekt het voor zich dat deze toestellen intern een vermogen-elektronische gelijkrichter bevatten. Die gelijkrichters vinden we ook terug in allerlei andere toestellen: radio's, Tv's, GSM-opladers, computers... Door de werking van een dergelijke passieve gelijkrichter, is het stroombeeld onttrokken door die gelijkrichters geen zuivere sinusvorm meer (Figuur 2). Doordat die vorm afwijkt van de sinusvorm, maar wel periodiek blijft volgens

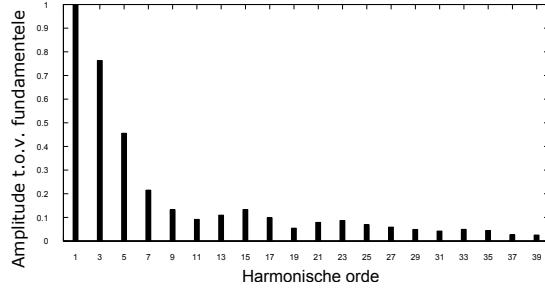


Figuur 2: Stroom- (stippellijn) en spanningsbeeld (volle lijn) van een enkelfasige bruggelijkrichter

de 50Hz-frequentie (het signaal herhaalt zich iedere 20ms), kan het periodieke signaal opgesplitst worden in een som van sinusvormen met frequenties die veelvoudig zijn van 50Hz. Die frequentiecomponenten worden in het vakjargon *harmonischen* genoemd. Een dergelijke verbruiker die harmonische stromen onttrekt, wordt een *niet-lineaire verbruiker* genoemd. Dit omdat het verband tussen de spanning en de stroom als niet-lineair beschouwd kan worden. Daartegenover bestaan ook lineaire verbruikers, zoals een gloeilamp, aangezien het verband tussen de spanning en de stroom lineair is volgens een constante weerstandswaarde $R = \frac{U}{I}$. Samengevat kan iedere stroom, onttrokken door een elektrische niet-lineaire verbruiker op het 50Hz-net, omschreven worden als:

$$i(t) = \sum_{h=1,2,3,\dots}^{\infty} \hat{I}_h \cdot \sin(h \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_h)$$

met de tijd t , $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ rad/s}$, \hat{I}_h en ϕ_h respectievelijk de amplitude en fasehoek van de harmonische h . De opsplitsing van de stroomvorm in Figuur 2 wordt in Figuur 3 voorgesteld in het frequentiedomein. Deze stroomvorm bevat enkel oneven harmonischen. Dit komt omdat de negatieve en positieve alternantie van het signaal gelijkvormig zijn. De dominante componenten zijn daarin de 1^{ste}, 3^{de}, 5^{de} en 7^{de} harmonischen.



Figuur 3: Frequentiespectrum van de stroom onttrokken door een enkelfasige brugge-
lijkrichter

Indien zich een situatie voordoet waarbij in een driefasig vierdraden systeem zich een symmetrische, evenwichtige niet-lineaire belasting voordoet, dan kan de stroom door de nulgeleider geschreven worden als de som van de drie fasestromen:

$$\begin{aligned}
 i_N(t) &= i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + i_{L3}(t) \\
 &= \sum_{h=1,2,3\dots}^{\infty} \left[\hat{I}_{L1,h} \cdot \sin(h \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_{L1,h}) \right. \\
 &\quad \left. + \hat{I}_{L2,h} \cdot \sin\left(h \left(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_{L2,h}\right) + \hat{I}_{L3,h} \cdot \sin\left(h \left(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_{L3,h}\right) \right]
 \end{aligned}$$

Aangezien de belastingstroom in iedere fase exact dezelfde is, kunnen ook de frequentiecomponenten in de drie fasen gelijk gesteld worden aan elkaar:

$$\begin{aligned}
 i_N(t) &= \sum_{h=1,2,3\dots}^{\infty} \hat{I}_h \left[\sin(h \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_h) \right. \\
 &\quad \left. + \sin\left(h \left(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_h\right) + \sin\left(h \left(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_h\right) \right]
 \end{aligned}$$

Voluit geschreven voor de oneven componenten wordt dit:

$$\begin{aligned}
 i_N(t) &= \hat{I}_1 \left[\sin(\omega_1 \cdot t + \phi_1) + \sin\left(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \phi_1\right) + \sin\left(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3} + \phi_1\right) \right] \\
 &\quad + \hat{I}_3 \left[\sin(3 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_3) + \sin\left(3 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_3\right) + \sin\left(3 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_3\right) \right] \\
 &\quad + \hat{I}_5 \left[\sin(5 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_5) + \sin\left(5 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_5\right) + \sin\left(5 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_5\right) \right] \\
 &\quad + \hat{I}_7 \left[\sin(7 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_7) + \sin\left(7 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_7\right) + \sin\left(7 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_7\right) \right] \\
 &\quad + \hat{I}_9 \left[\sin(9 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_9) + \sin\left(9 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_9\right) + \sin\left(9 \left(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) + \phi_9\right) \right] \\
 &\quad + \dots
 \end{aligned}$$

Aangezien de ogenblikkelijke som van drie sinusfuncties die $\frac{2 \cdot \pi}{3}$ rad in tijd verscho-

ven zijn gelijk is aan 0, wordt dit:

$$\begin{aligned}
 i_N(t) = & \hat{I}_1 [\sin(\omega_1 \cdot t + \phi_1) + \sin(\omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \phi_1) + \sin(\omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3} + \phi_1)] \\
 & + \hat{I}_3 [\sin(3 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_3) + \sin(3 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_3) + \sin(3 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_3)] \\
 & + \hat{I}_5 [\sin(5 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_5) + \sin(5 \cdot \omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3} + \phi_5) + \sin(5 \cdot \omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \phi_5)] \\
 & + \hat{I}_7 [\sin(7 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_7) + \sin(7 \cdot \omega_1 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \phi_7) + \sin(7 \cdot \omega_1 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3} + \phi_7)] \\
 & + \hat{I}_9 [\sin(9 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_9) + \sin(9 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_9) + \sin(9 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_9)] \\
 & + \dots
 \end{aligned} \tag{1}$$

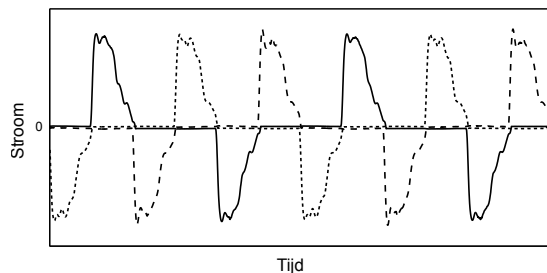
Dit resulteert in de volgende inhoud van de nulgeleiderstroom in een driefasig symmetrisch, evenwichtig, niet-lineair systeem:

$$i_N(t) = 3 \cdot \hat{I}_3 \cdot \sin(3 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_3) + 3 \cdot \hat{I}_9 \cdot \sin(9 \cdot \omega_1 \cdot t + \phi_9) + \dots \tag{2}$$

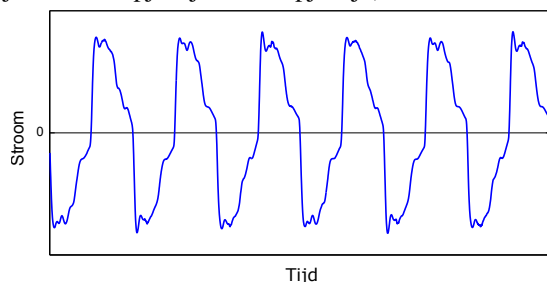
Dit is een opmerkelijke uitkomst. In tegenstelling tot lineaire systemen, waar de nulgeleiderstroom nul is in een driefasig evenwichtig en symmetrisch systeem, kan de nulgeleiderstroom bij een niet-lineair systeem niet meer verwaarloosd worden. Bij het beschouwen van drie gelijke niet-lineaire verbruikers, verdeelt over drie fasen, die elk een fundamentele en een 3^{de} harmonische component onttrekken aan het net, kan vastgesteld worden dat de nulgeleiderstroom groter is dan de fasestroom zodra de amplitude van de derde harmonische meer dan 50% t.o.v. de fundamentele component bedraagt. Aangezien een gebruikelijke spaarlamp een derde harmonische component bevat van $\pm 80\%$, kan de nulgeleiderstroom aanzienlijk groter worden dan de fasestroom.

3 Studie

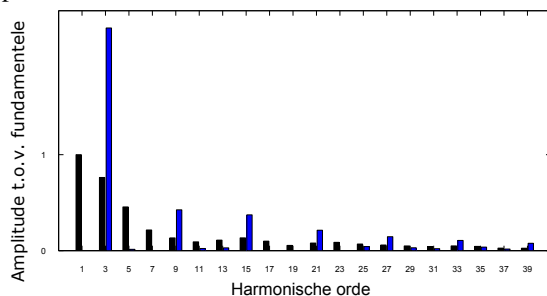
Om de theoretische uiteenzetting te staven, wordt een praktische proef uitgevoerd. Daarbij worden 300 identieke spaarlampen over drie fasen gelijk verdeeld. De overeenkomstige stroomvormen door de drie fasen kunnen in Figuur 4 teruggevonden worden (L1: volle lijn, L2: streepjeslijn, L3: stipjeslijn). De overeenkomstige nulgeleiderstroom wordt weergegeven in Figuur 5. Het frequentiespectrum van één van de lijnstromen (zwarte staven) en de nulgeleiderstroom (blauwe staven) worden voorgesteld in Figuur 6. Het feit dat de nulgeleiderstroom niet meer nul blijkt te zijn kan pragmatisch afgeleid worden uit Figuur 4, aangezien de nulgeleider de ogenblikkelijke som van de drie fasestromen vervoert. Uit Figuur 6 kan duidelijk opgemerkt worden dat de nulgeleider enkel 3^{de} orde harmonischen bevat.



Figuur 4: Stroombeeld van een driefasig systeem met 100 gelijke spaarlampen in elke fase (L1: volle lijn, L2: streepjeslijn, L3: stipjeslijn)



Figuur 5: Stroombeeld van de nulgeleiderstroom bij een driefasig systeem met 100 gelijke spaarlampen in elke fase



Figuur 6: Frequentiespectrum van de stroom door een fasegeleider (zwart) en de nulgeleiderstroom (blauw) bij een driefasig systeem met 100 gelijke spaarlampen in elke fase

De RMS-waarde van de stroom door de fasedraden bedraagt 14.59A. De stroom door de nulgeleider bedraagt in dit geval 25.28A. Dit is een aanzienlijke verhoging. Indien de stroomvoerende kabel op de belastingstroom (de fasestroom) gedimensioneerd is, kan deze gemakkelijk oververhit geraken door de overschrijdende nulgeleiderstroom. Bovendien wordt die overstroom niet altijd gedetecteerd, aangezien de nulgeleider niet moet beveiligd zijn in een TT- of TN-net indien de sectie gelijk is aan de sectie van de fasegeleiders. Dit kan onherroepelijke schade aan de elektrische installatie teweeg brengen. Bij het dimensioneren moet aandachtig omgesprongen worden met dergelijke situaties. Het AREI schrijft namelijk voor dat de nulgeleider gehalveerd mag worden vanaf secties boven de 35mm² bij symmetrische en evenwichtige belas-

tingen, maar zoals de Franse NFC15-100 en de Nederlandse NEN1010 dicteren dat de nulgeleider een grotere sectie moet bedragen bij het voeden van verbruikers met 3^{de} orde harmonische stroomcomponenten. Het is dan ook aan te raden de laatst vermelde richtlijnen te volgen.

4 Conclusie

Nulgeleiderstromen konden vroeger nul verondersteld worden bij het voeden van drie-fasige symmetrische en evenwichtige verbruikers. Door de massale invoer van vermogen elektronische componenten die passieve gelijkrichters bevatten, worden niet-lineaire stromen onttrokken uit het net. Die stromen bevatten naast de fundamentele 50Hz-component ook andere frequenties, harmonischen genaamd. De derde orde harmonischen kunnen zich echter enkel sluiten via de nulgeleider, waardoor zelfs bij het voeden van symmetrische en evenwichtige niet-lineaire belastingen een zeer grote nulgeleiderstroom ontstaat. Bij de dimensionering is het aan te raden een normering zoals de NFC15-100 of de NEN1010 te volgen. Bij de uitbating van dergelijk systeem is het belangrijk om ook de nulgeleider altijd van een overstromdetectie te voorzien.

5 Laagspanningsinstallaties: ontwerp en exploitatie

Deze problematiek en gelijkaardige hedendaagse problemen komen uitgebreid aan bod in de postacademische opleiding *Laagspanningsinstallaties: ontwerp en exploitatie*. Niet enkel een continue verandering in technologie en exploitatie, maar ook een evoluerende regelgeving maakt het een noodzaak om als ontwerper en/of uitbater de vereiste kennis te beheersen en bij te schaven. Deze vijfdaagse opleiding werd opgesteld om dergelijke kennis over te dragen. De cursist heeft na het volgen van de cursus een ruime kennis verworven omtrent het dimensioneren van laagspanningsinstallaties en de huidige power quality gerelateerde problemen en oplossingen.

In de eerste drie dagen ligt de focus volledig bij het dimensioneren van laagspanningsinstallaties. Het beveiligen van de installatie en zijn gebruikers wordt hierin uitgebreid besproken met de nadruk op de Belgische regelgeving. De laatste twee dagen worden gewijd aan het zoeken naar de oorsprong van harmonische vervuiling en zijn impact op de elektrische installatie. Daarbij staan de begrippen power quality en niet-lineaire verbruikers centraal.