

**De 3e harmonische**

o8-262 pmo

11 december 2008

© Phase to Phase BV, Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens Phase to Phase BV is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

Phase to Phase BV is niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

## INHOUD

1	Inleiding .....	4
2	Het gedrag van de harmonischen .....	4
2.1	Simulatie .....	4
2.2	Simulatie vijfde harmonische met harmonische stroominjecties.....	6
2.3	Simulatie derde harmonische met harmonische stroominjecties .....	7
3	Modellering.....	8
3.1	Verbinding en kabel .....	8
3.2	Frequentieafhankelijkheid netvoeding .....	10
3.3	Frequentieafhankelijkheid overige componenten.....	10
4	Slotopmerkingen.....	11

1 INLEIDING

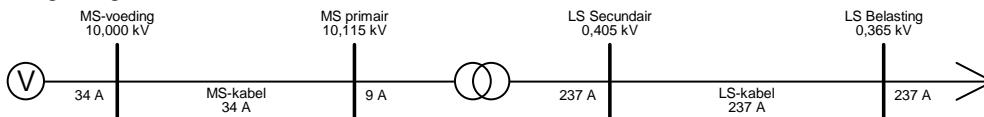
In alle elektriciteitsnetten komen hogere harmonischen voor als gevolg van niet-lineaire bronnen, zoals gelijkrichters en converters. Vision *Network analysis* bevat een harmonischen module voor berekening van de stromen en spanningen bij hogere frequenties in het net.

Er zijn diverse manieren om de componenten van een net te modelleren, afhankelijk van de mate van detaillering en asymmetrie in het net. In Vision *Network analysis* is gekozen voor modellering, gebaseerd op een symmetrisch driefasensysteem en met driefasensymmetrische harmonische bronnen.

In een symmetrisch net met gebalanceerde harmonische bronnen komen alleen oneven harmonischen voor. De harmonische veelvouden van 3 manifesteren zich alleen in het homopolaire systeem en zijn nog niet in Vision *Network analysis* gemodelleerd. Dit rapport beschrijft de modellering ten behoeve van de bestudering van deze harmonischen.

2 HET GEDRAG VAN DE HARMONISCHEN

Het gedrag van de harmonischen laat zich het beste toelichten aan de hand van een voorbeeldnet.

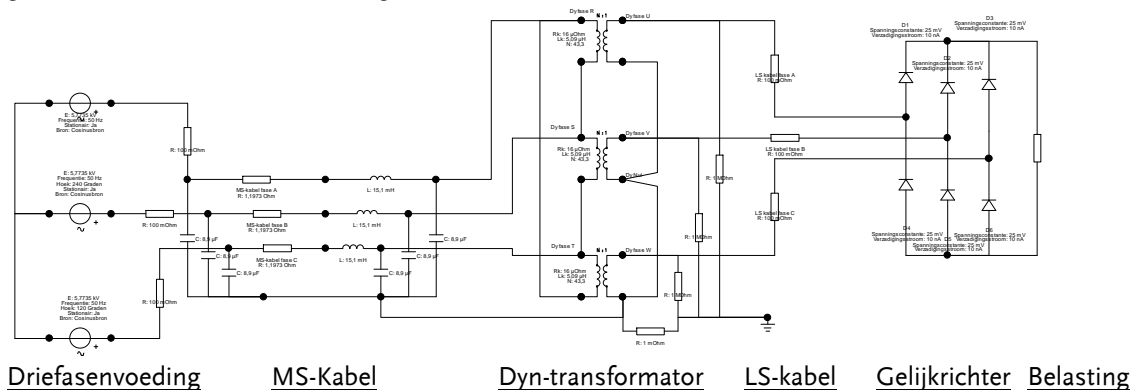


Hierin onderscheiden we:

- MS-voeding
- MS-kabel
- MS/LS-transformator
- LS-kabel
- Belasting

2.1 Simulatie

In dit voorbeeldnet bevindt de belasting zich achter een gelijkrichter. Dit systeem is gemodelleerd in het programma Vision *Transients*, waarmee in het tijddomein gerekend kan worden. Hiermee kunnen de golfvormen als gevolg van de niet-lineaire componenten nauwkeurig bestudeerd worden. Het gemodelleerde net is hieronder afgebeeld.



Driefasenvoeding

MS-Kabel

Dyn-transformator

LS-kabel

Gelijkrichter

Belasting

De harmonischen, die we kunnen verwachten bij een gelijkrichter, kunnen we berekenen met onderstaande formule:

$$h = (n \cdot p) \pm 1$$

Hierin is:

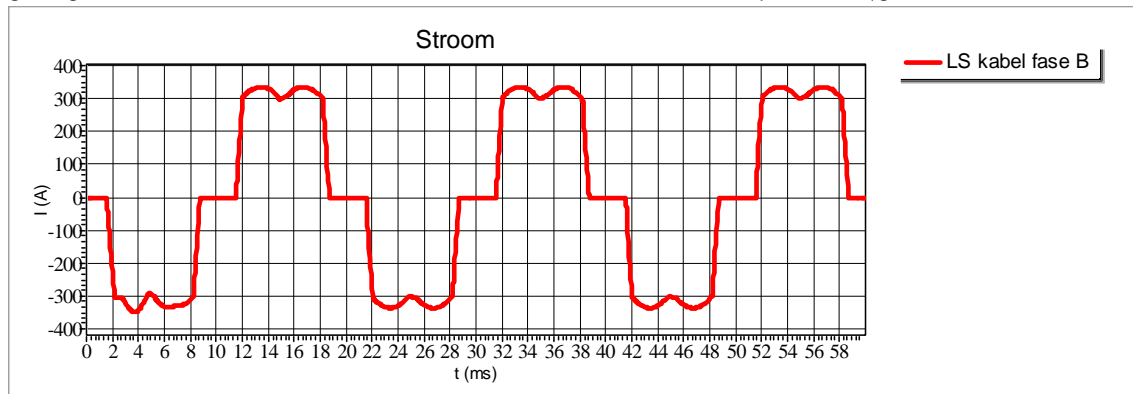
$n$ : 1, 2, 3, ...

$p$ : 6, 12, 24, ... (aantal pulsen)

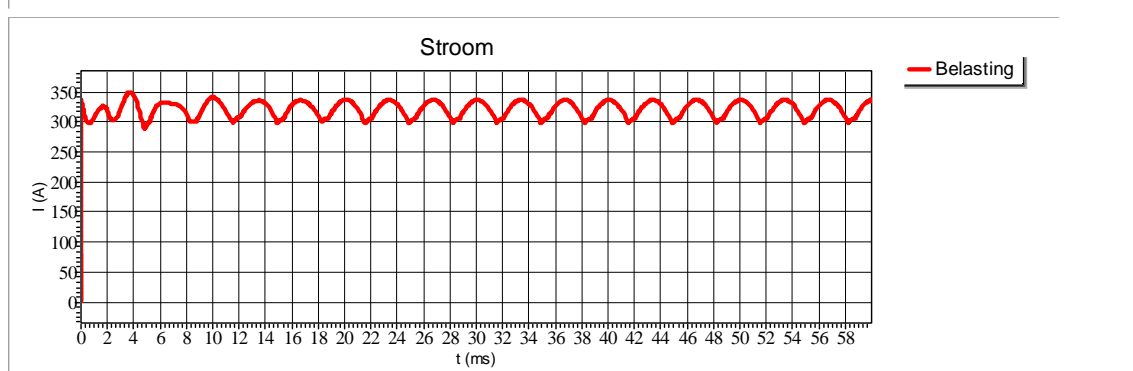
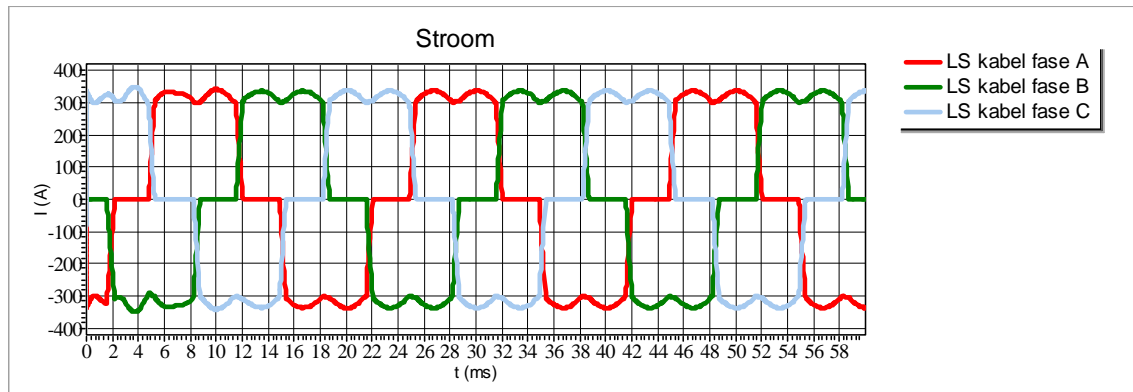
Voor een 6-pulsige gelijkrichter zijn de te verwachten harmonischen:  $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19$ , etc.

De verwachting is dat alle harmonischen, die zich in het LS-net in het normale en inverse systeem bevinden, ook in het MS-net zichtbaar zullen zijn.

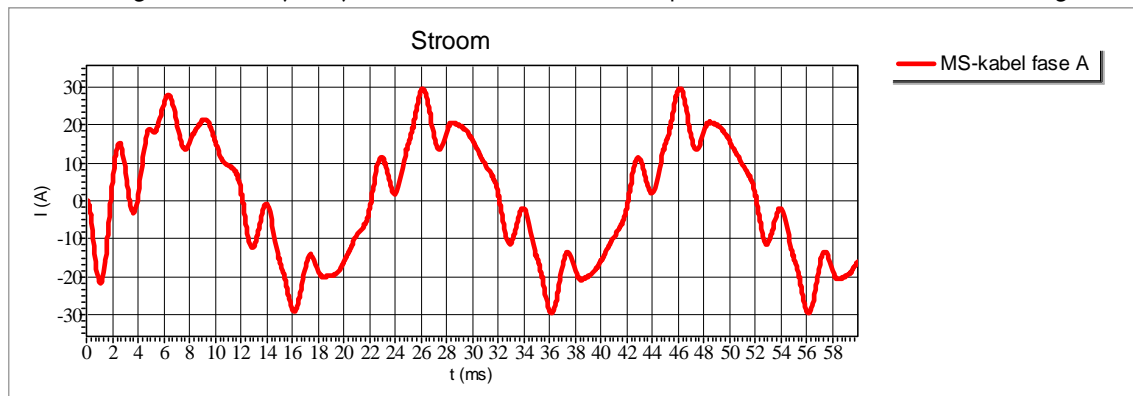
In onderstaande afbeelding is goed te zien hoe de stroom door een enkele geleider aan LS-zijde als gevolg van het schakelen van de diodes een forse harmonische component krijgen.



Onderstaande afbeelding illustreert hoe de stromen door de drie fasen elkaar afwisselen, zodat aan de gelijkgerichte zijde door de belasting een gerimpelde gelijkstroom vloeit.

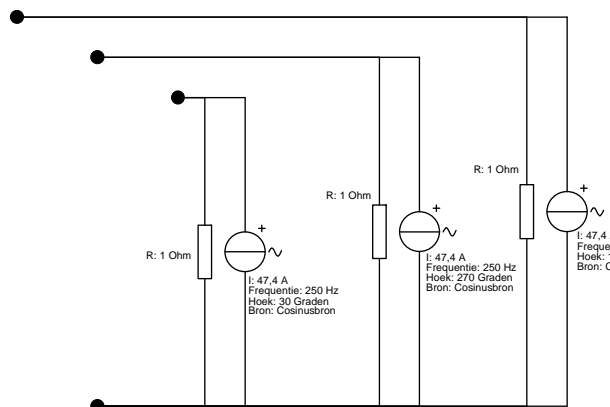


Onderstaande afbeelding illustreert hoe de harmonische stromen zichtbaar worden in het MS-net. Hoewel de golfvorm afwijkt, zijn dezelfde harmonische componenten als in het LS-net aanwezig.



### 2.2 Simulatie vijfde harmonische met harmonische stroominjecties

Om het harmonische gedrag verder te bestuderen, worden de gelijkrichter en de belasting vervangen door een equivalente driefasenbelasting van 1 Ohm en een harmonische injectie met stroombronnen.

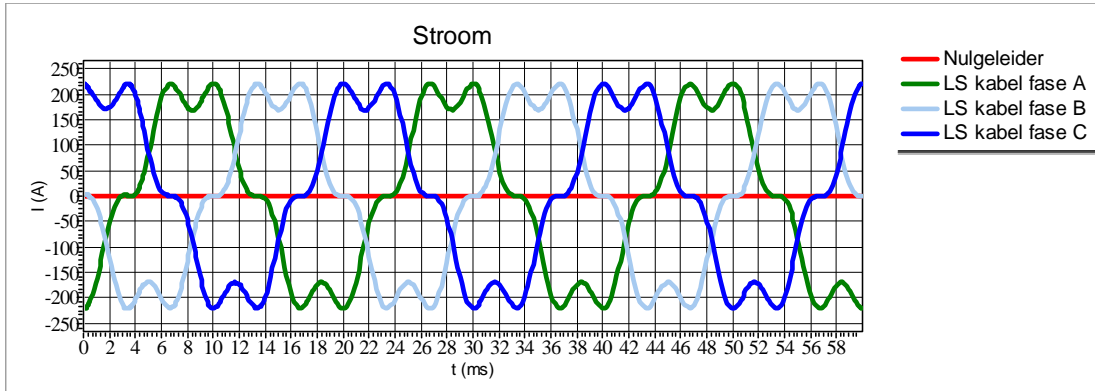


De weerstanden representeren de belasting voor de 50 Hz grondfrequentie. De waarden zijn zodanig gekozen dat dezelfde belastingstroom vloeit als in de situatie met de gelijkrichter.

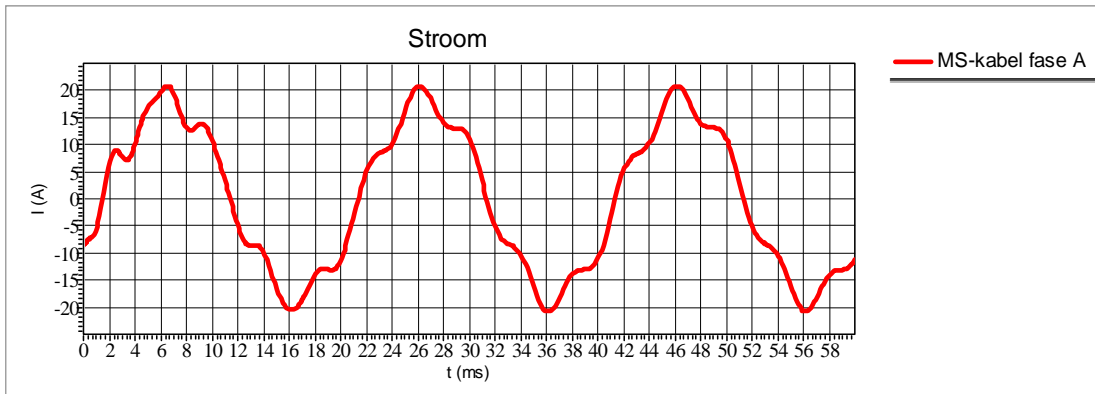
De drie stroombronnen zijn ingesteld op:

- frequentie: 250 Hz (injectie van de 5e harmonische stroomcomponent)
- hoeken van de stroombronnen zijn afgestemd op de hoeken van de 50 Hz spanningen
- stroomsterkte:  $I_{250 \text{ Hz}} = I_{50 \text{ Hz}} / 5$

De stroombronnen zijn aangesloten op een gemeenschappelijke nul, die ook verbonden is met het sterpunt van de transformator. De verwachting is echter dat er geen stroom via de nul naar de transformator zal lopen, aangezien de vijfde harmonische zich in het normale systeem bevindt. Onderstaande afbeelding illustreert dit.



Aan de MS-zijde is de vijfde harmonische ook zichtbaar. Onderstaande afbeelding geeft de stroom door fase A weer.



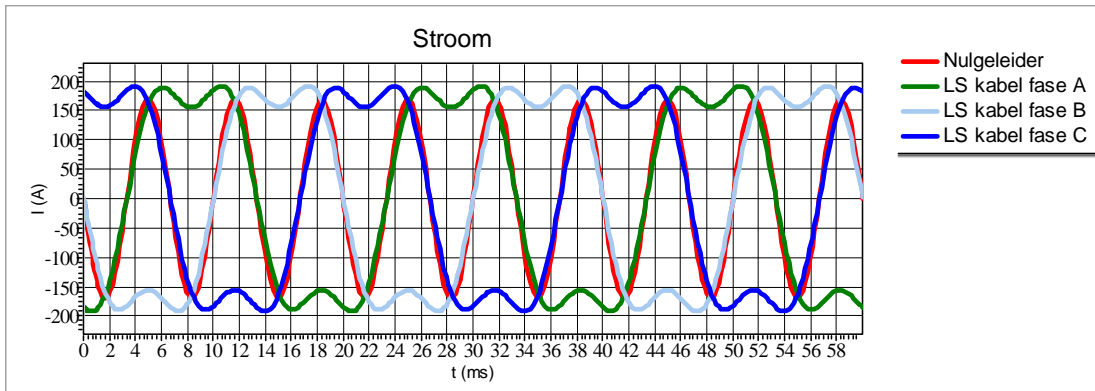
### 2.3 Simulatie derde harmonische met harmonische stroominjecties

In het volgende voorbeeld wordt in plaats van de vijfde harmonische een derde harmonische stroom geïnjecteerd. Deze harmonische komt voor in netten met assimilatieverlichting.

De drie stroombronnen zijn ingesteld op:

- frequentie: 150 Hz (injectie van de 3e harmonische stroomcomponent)
- hoeken van de stroombronnen zijn afgestemd op de hoeken van de 50 Hz spanningen
- stroomsterkte:  $I_{150\text{ Hz}} = I_{50\text{ Hz}} / 3$

De stroombronnen zijn aangesloten op een gemeenschappelijke nul, die ook verbonden is met het sterpunt van de transformator. De verwachting is dat er een stroom door de nul zal lopen, aangezien de derde harmonische zich in het homopolaire systeem bevindt. Onderstaande afbeelding illustreert dit.

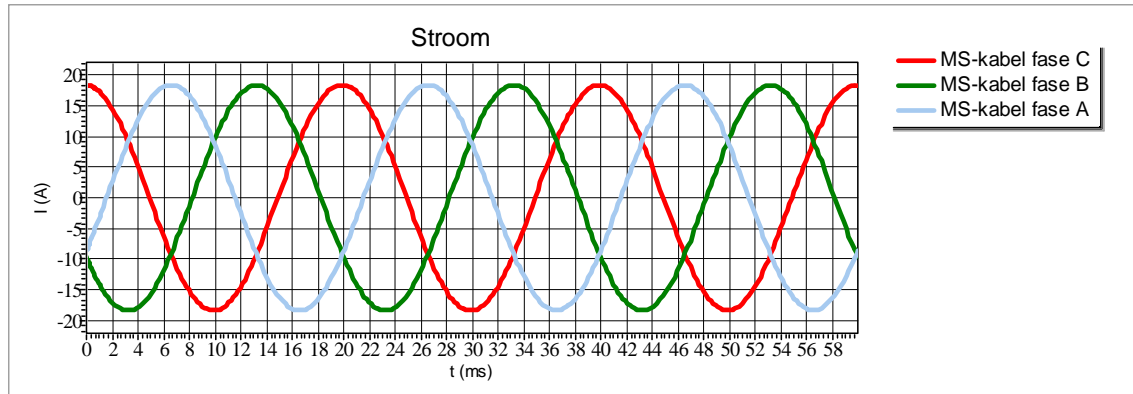


Uit de berekening blijkt dat in dit voorbeeld de amplitude van de 3e harmonische stroom bijna even groot is als de amplitude van de vervuilde 50 Hz-fasestromen:

$$I_N = 3 \cdot I_{150\text{ Hz}}$$

$$|I_N| \cong |I_{50\text{ Hz}}|$$

Bovendien blijkt uit de berekening dat de derde harmonische door de Dy-transformator niet in het MS-net voorkomt. Onderstaande afbeelding illustreert dit.

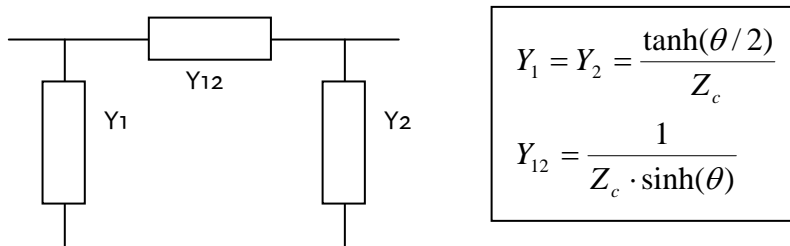


Een symmetrische derde harmonische (of oneven veelvoud daarvan) bevindt zich altijd in het homopolaire stelsel en vloeit via nulgeleider, afscherming en aarde.

### 3 MODELLERING

#### 3.1 Verbinding en kabel

Voor harmonischen in het normale en inverse systeem worden de verbinding en de kabel gemodelleerd met het model van de lange lijn.



Waarin  $Z_c$  de karakteristieke impedantie is en  $\theta$  de karakteristieke hoek:

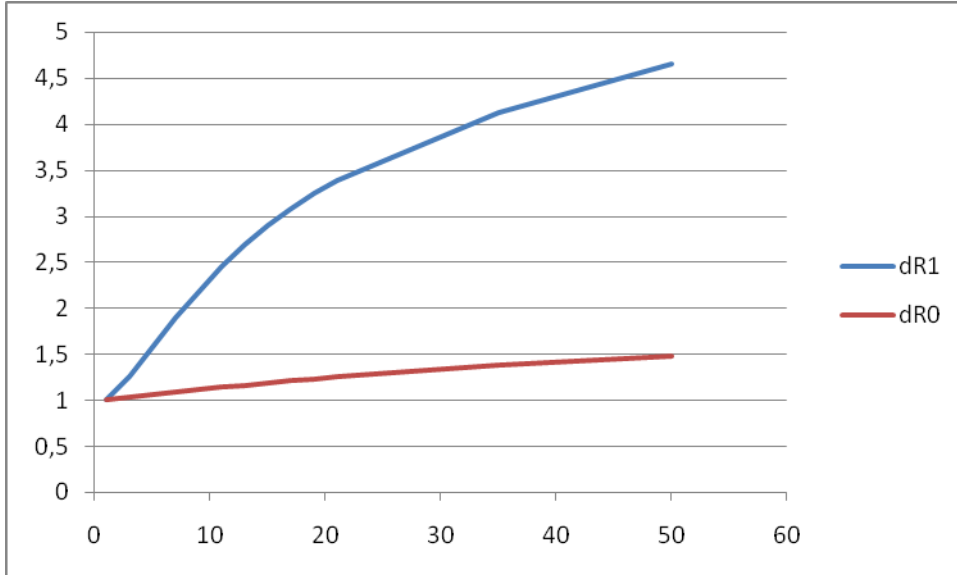
$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad [\Omega]$$

$$\theta = l \cdot \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Voor het vaststellen van het model voor andere frequenties, waaronder de derde harmonische, moet een ingewikkelder model gebruikt worden, vanwege de invloed van de aarde. Dit vraagt om invoergegevens die de meeste assetmanagers niet hebben. Om die reden zoeken we naar een eenvoudiger methode, die uitgaat van de bekende homopolaire impedantie.



In het homopolaire systeem volgt de stroom het pad dat gezamenlijk bepaald wordt door fasegeleider, nulgeleider, afscherming en aarde. Met een programma voor het berekenen van elektromagnetische veldsterktes kunnen alle impedanties van een kabelsysteem nauwgezet berekend worden. Onderstaande afbeelding geeft de normale en de homopolaire weerstand weer als functie van het harmonische ordenummer (h).



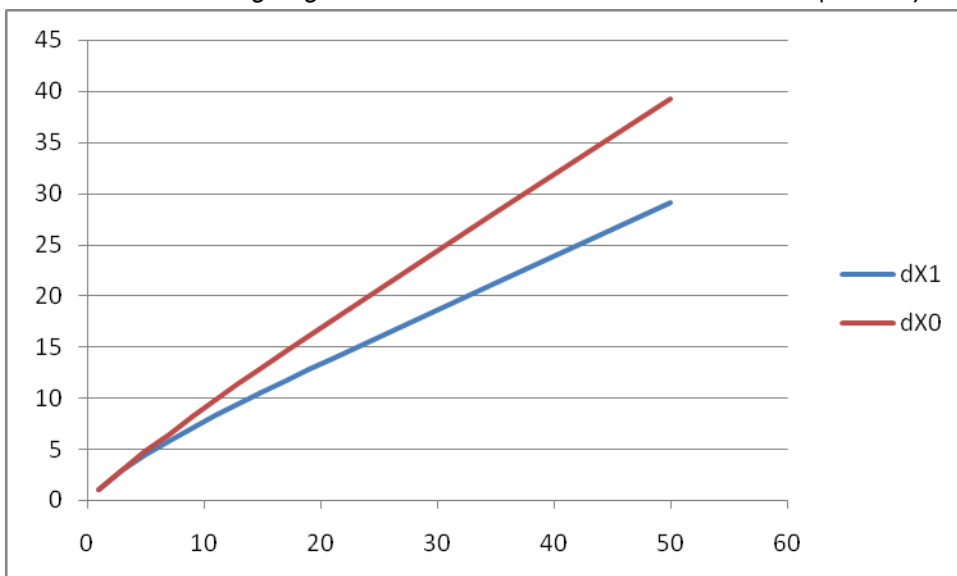
Uit de berekening volgt dat de normale weerstand in veel gevallen ongeveer evenredig is met de wortel van het harmonische ordenummer. Dit is het gevolg van het skineffect en het proximityeffect.

$$R_1(h) \cong \sqrt{h} R_{1(50\text{ Hz})}$$

Echter, uit de berekening blijkt dat de homopolaire weerstand niet veel groter wordt bij hogere frequentie. Dat komt doordat het homopolaire circuit niet alleen fasegeleiders, maar ook nulgeleiders, afschermingen en aarde omvat. De invloed van skineffect en proximityeffect zijn in dit stelsel veel kleiner dan in het normale stelsel. Dit wordt benaderd door de homopolaire weerstand constant te houden:

$$R_0(h) \cong R_{0(50\text{ Hz})}$$

Uit dezelfde berekening volgt de reactantie voor het normale en het homopolaire systeem:



Uit deze resultaten blijkt dat de reactantie in het normale systeem bij benadering recht evenredig is met het harmonische ordenummer:

$$X_1(h) \cong h X_1(50 \text{ Hz})$$

Uit deze resultaten blijkt dat de ook reactantie in het homopolaire systeem ongeveer recht evenredig is met het harmonische ordenummer:

$$X_0(h) \cong h X_0(50 \text{ Hz})$$

### 3.2 Frequentieafhankelijkheid netvoeding

De netvoeding staat model voor een extern voedend netwerk, waarin in werkelijkheid onder andere kabels, bovengrondse lijnen, generatoren en transformatoren voorkomen. Het is dus niet mogelijk om daar een universeel model voor op te stellen. In de literatuur wordt daarom volstaan met een eenvoudig model.

Normaal systeem:

$$Z_1(h) = \sqrt{h} \cdot R_{1(50\text{Hz})} + jh \cdot X_{1(50\text{Hz})}$$

Homopolair systeem:

$$Z_0(h) = R_{0(50\text{Hz})} + jh \cdot X_{0(50\text{Hz})}$$

Sterpuntsimpedantie:

$$Z_{e,0}(h) = 3(R_{e,0(50\text{Hz})} + jh \cdot X_{e,0(50\text{Hz})})$$

### 3.3 Frequentieafhankelijkheid overige componenten

Voor een aantal componenten, zoals de transformator en de generator, is de waarde van de reactantie recht evenredig met het harmonische ordenummer  $h$ . De waarde van de weerstand is evenredig met de wortel van  $h$ . Dit geldt zowel voor het normale als het homopolaire systeem.

Normaal systeem:

$$Z_1(h) = \sqrt{h} \cdot R_{1(50\text{Hz})} + jh \cdot X_{1(50\text{Hz})}$$

Homopolair systeem:

$$Z_0(h) = \sqrt{h} \cdot R_{0(50\text{Hz})} + jh \cdot X_{0(50\text{Hz})}$$

Sterpuntsimpedantie:

$$Z_{e,0}(h) = 3(R_{e,0(50\text{Hz})} + jh \cdot X_{e,0(50\text{Hz})})$$

#### 4 SLOTOPMERKINGEN

De implementatie van de berekening van de 3e harmonische en de oneven veelvouden daarvan is gepland voor de volgende upgrade van Vision.

Er zal een functionaliteit worden ingebouwd voor het berekenen van de stroom door het homopolaire circuit, bestaande uit nulgeleider, PE en alternatieve retour (aarde). De vaststelling van de stroom door de nulgeleider zal door de gebruiker zelf moeten gebeuren omdat de gedetailleerde configuratie en de impedanties van het retourcircuit niet in Vision zijn opgenomen. Overigens, voor LS-netten vloeit de retour voornamelijk door nul en PE, waardoor deze handberekening niet moeilijk zal zijn.