

**Harmonischen in Vision**  
**Modellering componenten**

o8-161 pmo

4 augustus 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	Modellering componenten .....	5
2.1	Verbinding en kabel .....	5
2.2	Transformator .....	6
2.3	Driewikkelingstransformator .....	6
2.4	Netvoeding .....	7
2.5	Belasting .....	7
2.6	Condensator .....	8
2.7	Filter .....	8
2.8	Spoel .....	8
2.9	Synchrone generator en motor .....	9
2.10	Asynchrone generator en motor .....	9
3	Referenties .....	9

1 **INLEIDING**

Modellering componenten:

- verbindingen, kabels
- transformatoren
- elementen

De harmonische stroominjectie vindt plaats middels de belastingen.

De berekening vindt globaal in twee stappen plaats:

- eerst wordt een initiële loadflow uitgevoerd voor het vaststellen van de hoeken in het 50 Hz-systeem,
- vervolgens worden de berekeningen uitgevoerd aan het gelineariseerde model voor harmonische frequenties.

Door de harmonische stroominjecties treden harmonische spanningen op in het netwerk. Deze harmonische spanningen en de stromen worden voor elke frequentie uitgerekend. De harmonischen hebben invloed op de RMS-waarde van de spanningen en de stromen. De RMS-waarden worden als volgt berekend:

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} |V_m|^2} \quad [\text{kV}]$$

Met:  $V_m$  : de effectieve waarde van de harmonische gekoppelde spanning in kV

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} |I_m|^2} \quad [\text{A}]$$

Met:  $I_m$  : de effectieve waarde van de harmonische stroom in A

De Total Harmonic Distortion (THD) is een maat voor de totale harmonische vervuiling en kan berekend worden voor zowel de spanningen als de stromen.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^{\infty} |V_m|^2}}{|V_1|} \cdot 100\%$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} |I_n|^2}}{|I_1|} \cdot 100\%$$

Het actieve vermogen van een signaal, waarin harmonischen voorkomen, is:

$$P_{av} = \sum_{m=1}^{\infty} \sqrt{3} \cdot |V_m| \cdot |I_m| \cdot \cos(\varphi_m - \theta_m)$$

Met:

$V_m$  : de effectieve waarde van de harmonische gekoppelde spanning in kV

$I_m$  : de effectieve waarde van de harmonische spanning in A

$\varphi_m$  : de hoek van de spanningsvector

$\theta_m$  : de hoek van de stroomvector

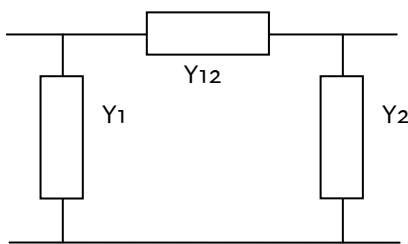
2 **MODELLERING COMPONENTEN**

De voor harmonische frequenties gemodelleerde componenten zijn:

- Verbinding en kabel
- Transformator
- Driewikkelingstransformator
- Netvoeding
- Belasting
- Condensator
- Filter
- Spoel
- Synchronische generator en motor
- Asynchrone generator en motor

2.1 **Verbinding en kabel**

De verbinding en de kabel worden gemodelleerd met het model van de lange lijn (Acha, 2001, par 10.3), (Arrilaga, 1997, par. 3.5.1).



$$Y_1 = Y_2 = \frac{\tanh(\theta/2)}{Z_c}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{Z_c \cdot \sinh(\theta)}$$

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

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

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

Hierin is:

- $R$  : weerstand in Ohm/km
- $L$  : zelfinductie in H/km
- $G$  : shuntweerstand in S/km
- $C$  : capaciteit in F/km
- $l$  : lengte in km
- $h$  : harmonische orde nummer
- $\omega$  : basishoekfrequentie

Als C niet is ingevuld, is de impedantie:  $Z(h)=R+jhX$

In de admittantiematrix worden opgenomen:

$$y_1 = y_2 = Y_1 / Y_{base} = Y_1 * Z_{base} \quad [pu]$$

$$y_{12} = Y_{12} / Y_{base} = Y_{12} * Z_{base} \quad [pu]$$

Voor andere langselementen, zoals smoorspoelen geldt:

$$y_{12} = \left( \frac{1}{R + jhX} \right) * Z_{base} \quad [pu]$$

$$y_1 = y_2 = \left( \frac{G + jhB}{2} \right) * Z_{base} \quad [pu]$$

## 2.2 Transformator

In de complexe overzetverhouding is de hoekverdraaiing door de schakelwijze en door een eventuele fasedraaiing verwerkt. Het klokgetal is een geheel getal tussen 0 en 11. De fasedraaiing is in graden. Onderstaande afleiding geldt voor een transformator met de trappenschakelaar aan de primaire zijde.

$$n = \frac{U_{nom,sec} / U_{b,sec}}{(U_{nom,prim} + U_{trapstand}) / U_{b,prim}}$$

$$normale\ systeem : cov = n \cdot e^{-j\left(\frac{fasedraaiing \cdot 2\pi}{360} + \frac{klokgetal \cdot 2\pi}{12}\right)}$$

$$inverse\ systeem : cov = n \cdot e^{+j\left(\frac{fasedraaiing \cdot 2\pi}{360} + \frac{klokgetal \cdot 2\pi}{12}\right)}$$

Voor het inverse systeem geldt:

$$h \bmod 3 = 2$$

De impedantie van het normale systeem wordt als volgt bepaald:

$$r = \left( \frac{P_k}{1000 \cdot S_{nom}} \cdot \frac{U_{nom,sec}^2}{S_{nom}} \right) / Z_{base,sec} \quad [pu]$$

$$z = \left( \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{nom,sec}^2}{S_{nom}} \right) / Z_{base,sec} \quad [pu]$$

$$x = h \cdot \sqrt{z^2 - r^2} \quad [pu]$$

$$z(h) = \sqrt{h} \cdot r + jh \cdot x \quad [pu]$$

Referentie: Arrillaga, 1985, Arrillaga, 1997, par. 4.3.1.

## 2.3 Driewikkelingstransformator

De afleiding is analoog aan de afleiding voor de tweewikkelsingtransformator. Bij deze transformatoren is nog geen additionele fasedraaiing gemodelleerd.

$$normale\ systeem : cov_{ij} = n \cdot e^{-j\left(\frac{klokgetal \cdot 2\pi}{12}\right)}$$

$$inverse\ systeem : cov_{ij} = n \cdot e^{+j\left(\frac{klokgetal \cdot 2\pi}{12}\right)}$$

Voor de reactanties geldt:

$$x_{ij} = h \cdot \sqrt{z_{ij}^2 - r_{ij}^2} \quad [pu]$$

$$z_{ij}(h) = \sqrt{h \cdot r_{ij}} + jh \cdot x_{ij} \quad [pu]$$

#### 2.4 Netvoeding

De netvoeding wordt gemodelleerd met een vaste spanningsbron achter de kortsluitimpedantie. De reactantie wordt bepaald door de inductie en de frequentie.

$$y_{netvoeding}(h) = \frac{1}{r_{netvoeding} + jh \cdot x_{netvoeding}} \quad [pu]$$

#### 2.5 Belasting

Er bestaan zeer veel mogelijkheden om de belasting te modelleren. Het uiteindelijke model is afhankelijk van de soort individuele belastingen (verlichting, motoren, etc). Gekozen is voor het model van referentie Arrillaga, 1997, par. 4.3.2, dat geldt voor typisch huishoudelijke (domestic) belastingen.

$$Y_{belasting} = \frac{1}{\sqrt{h} \cdot R_{50} + jh \cdot X_{50}} \quad [S]$$

Waarin:

$$Y_{50} = \frac{|P|}{U_{nom}^2} - j \frac{|Q|}{U_{nom}^2} \quad [S]$$

$$R_{50} = \text{Re} \left\{ \frac{1}{Y_{50}} \right\} \quad X_{50} = \text{Im} \left\{ \frac{1}{Y_{50}} \right\} \quad [Ohm]$$

De belasting wordt absoluut genomen, zodat bij levering dezelfde impedantie resulteert.

In het pu-systeem geldt:

$$z = \frac{1}{p - jq} \quad [pu]$$

$$z(h) = \sqrt{h} \cdot \text{Re}\{z_{50}\} + jh \cdot \text{Im}\{z_{50}\} \quad [pu]$$

$$y(h) = 1/z_h \quad [pu]$$

In geval van een harmonische loadflow wordt voor elke hogere harmonische een stroom geïnjecteerd. Van deze stroom zijn per frequentie de absolute waarde en de hoek ten opzichte van de hoek van de complexe spanning van de grondharmonische in de gewone loadflow. Voor de grootte van de belastingstroom voor element  $j$  op knooppunt  $i$  geldt  $I_{inj,j,50}$  (met  $P$  in MW,  $Q$  in Mvar en  $U$  in kV):

$$I_{inj,j,50} = \sqrt{\frac{P_{L,j}^2 + Q_{L,j}^2}{\sqrt{3} \cdot U_{nom,i}}} \cdot 1000 \quad [A]$$

De complexe stroominjectie per element  $j$  op knooppunt  $i$  is dan:

$$I_{inj,j,h} = I_{inj,j,50} \cdot \frac{\text{percentage}_{j,h}}{100\%} \cdot \frac{1}{I_{base,i}} \cdot e^{j \cdot \text{hoek}_{j,h} \cdot \pi / 180} \quad [pu]$$

De totale stroominjectie op het knooppunt  $i$  is dan per harmonische  $h$ :

$$I_{inj,i,h} = \sum_j I_{inj,j,h} \cdot e^{jh(\text{loadflowhoek}_{i,h} - 30 \cdot \text{klokgetal}_i)\pi / 180} \quad [pu]$$

## 2.6 Condensator

De condensator is een shuntelement. De admittantie wordt vanuit de capaciteit bepaald. De geleiding wordt nul verondersteld.

$$y_{cond}(h) = \frac{jh \cdot Q_{cond}}{U_{nom}^2} \cdot Z_{base} \quad [pu]$$

Referentie: WG 36-05, Elektra 77.

## 2.7 Filter

Uitgangspunt is het reactieve vermogen van de condensator bij de nominale frequentie:  $Q_c$ . De reactantie van de condensator bij de basisfrequentie wordt als volgt berekend:

$$X_c = \frac{U_{nom}^2}{Q_c} \cdot \frac{h_f^2}{h_f^2 - 1} \quad [Ohm]$$

Hierin is  $h_f$  het quotiënt van de filterfrequentie en de systeemfrequentie. De inductie van de spoel bij de basisfrequentie wordt als volgt berekend:

$$X_L = \frac{X_c}{(h_f)^2} \quad [Ohm]$$

De weerstand van het filter wordt bepaald uit de gewenste kwaliteitsfactor  $q$ . Deze ligt doorgaans tussen 20 en 30.

$$R = \frac{h_f \cdot X_L}{q} \quad [Ohm]$$

Dan is de admittantie van het filter voor een harmonische frequentie met ordenummer  $h$ :

$$y_{filter}(h) = \frac{1}{R + j(h \cdot X_L - X_c / h)} \cdot Z_{base} \quad [pu]$$

Referentie: Acha, 2001.

## 2.8 Spoel

De spoel is een shuntelement. De admittantie wordt vanuit de inductie bepaald. De geleiding wordt nul verondersteld. Dan is de shuntadmittantie gelijk aan:



$$y_{spoel}(h) = \frac{-jh \cdot Q_{spoel}}{U_{nom}^2} \cdot Z_{base} \quad [pu]$$

### 2.9 Synchronische generator en motor

De synchronische machine is voor de harmonischen een belasting. Het model is:

$$y_{gen}(h) = \sqrt{h} \cdot r_{gen,50} + jh \cdot x_{gen,50} \quad [pu]$$

Referentie: Arrillaga, 1997, par. 4.3.1.

### 2.10 Asynchrone generator en motor

Van de asynchrone machine is de hoofdveldimpedantie verwaarloosd. Voorts wordt uitgegaan van ervaringsgetallen, zoals de verhouding van de stator- en rotorweerstand:

$$R_s = a \cdot R_M$$

$$R_r = b \cdot R_M$$

Waarin:

$R_M$  : totale motorweerstand met de rotor locked

$a$  : 0,45

$b$  : 0,55

Dan geldt voor de machineimpedantie voor harmonischen:

$$\text{Positieve systeem: } r(h) = r \cdot \left[ a \cdot \sqrt{h} + (h \cdot b \cdot \sqrt{h-1} / (h-1)) \right] \quad [pu]$$

$$\text{Negatieve systeem: } r(h) = r \cdot \left[ a \cdot \sqrt{h} + (-h \cdot b \cdot \sqrt{h-1} / (-h-1)) \right] \quad [pu]$$

En voorts:

$$x(h) = jh \cdot x \quad [pu]$$

Referentie: Arrillaga, 1997, par. 4.3.3.

## 3 REFERENTIES

- Acha, 2001: Enrique Acha, Manuel Madrigal: "Power System Harmonics", 2001, John Wiley & Sons
- Arrillaga, 1985: J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger: "Power System Harmonics", 1985, John Wiley & Sons
- Arrillaga, 1997: J. Arrillaga, B.C. Smith, N.R. Watson, A.R. Wood: "Power System Harmonic Analysis", 1997, John Wiley & Sons
- WG 36-05, Elektra 77 Working Group 36-05: "Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network", Cigré Elektra, no 77