

# Driefasenet

## WEGWIJZER

In leereenheid 2 (paragraaf 2.1) hebben we het opwekken van een sinusvormige wisselspanning verduidelijkt. Figuur 2.1 stelde het werkingsprincipe ervan eenvoudig voor. Tussen de uitlopers van de bewegende spoel ontstaat een sinusvormige wisselspanning. Die spanning noemen we een eenfasige wisselspanning. We kunnen echter ook gelijktijdig drie identieke spoelen, die onderling  $120^\circ$  verschoven zijn, in hetzelfde magnetisch veld laten draaien. Dat geeft ons drie gelijke wisselspanningen met dezelfde frequentie en grootte. Ze zijn enkel  $120^\circ$  t.o.v. elkaar verschoven. Een stelsel van drie dergelijke spanningen noemen we een driefasespanning. Door die spanningen onderling te koppelen, ontstaat een driefasenet.

Het gebruik van een driefasenet heeft twee grote voordelen:

- 1 Synchrone en asynchrone elektrische motoren werken optimaal bij aansluiting op een driefasenet.
- 2 Het transport van elektrische energie kan veel economischer gebeuren in vergelijking met een eenfasig net.

In de praktijk zullen we het driefasenet zowat overal terugvinden voor het transport en de distributie van elektrische energie.

Een driefasenet voor de distributie van energie kan worden uitgevoerd met drie of vier geleiders. De distributie van energie voor klein verbruik, zoals bij woningen en kleine bedrijven, gebeurt via een driefasenet met vier geleiders. Men beschikt in dat geval over twee spanningen. De fasespanning (bv. 230 V) dient voor het voeden van eenfasige verbruikers terwijl de andere, een gekoppelde spanning (bv. 400 V), gebruikt wordt voor het aansluiten van driefasige verbruikers zoals bv. motoren.

## 8.1 Ontstaan van een driefasespanning

### 8.1.1 Driefasige wisselspanninggenerator

#### Leerdoelen

Hierna kan je:

- het begrip ‘fase’ definiëren bij wisselspanninggeneratoren.
- het verband tussen de opbouw van een eenfasige en een driefasige wisselspanninggenerator verklaren.
- de klemmen van een driefasige generator benoemen met de genormaliseerde symbolen.
- het opwekken van een driefasespanning verklaren en het verband met het opwekken van een eenfasige spanning toelichten.
- verklaren waarom de fasen van een driefasige generator geschakeld worden.
- het klemmenbord van een driefasige generator tekenen.
- de twee uitvoeringsvormen van driefasige generatoren in verband brengen met het vermogen van wisselspanninggeneratoren.

In leereenheid 2 hebben we aangetoond dat er een sinusvormige spanning gegenereerd wordt in een winding (spoel) die met constante rotatiefrequentie (snelheid) draait in een magnetisch veld. De wikkeling of spoel waarin de spanning gegenereerd wordt, noemen we **de fase** van de generator. Figuur 2.1 stelt dus een tweepolige, eenfasige wisselspanninggenerator voor. De sinusvormige spanning die opgewekt wordt door de generator noemen we een eenfasige wisselspanning.

Figuur 8.1 stelt drie tweepolige, eenfasige wisselspanninggeneratoren voor waarvan de fasen (spoelen die spanningen genereren) onderling  $120^\circ$  verschoven zijn. We plaatsen de drie fasen op eenzelfde rotor (telkens  $120^\circ$  verschoven) die in hetzelfde magnetisch veld in tegenwijzerzin draait.

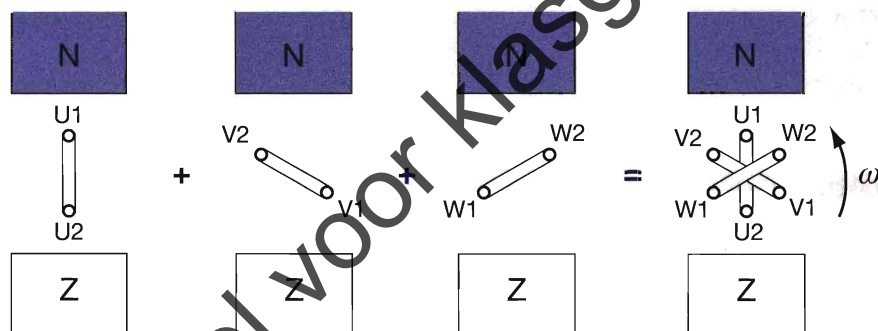


Fig. 8.1 Verband tussen eenfasige generatoren en driefasige generator

De klemmen waarvan we de spanning van de fasen afnemen, benoemen we met een hoofdletter: U voor de eerste fase, V voor de tweede fase en W voor de derde fase. Elke fase heeft een beginpunt en een eindpunt. Het beginpunt benoemen we met een cijfer 1 na de letter, het eindpunt met een cijfer 2. In elke fase wordt een sinusvormige spanning gegenereerd. De spanning over een fase noemen we een fasespanning en stellen we voor door een hoofdletter met als index het nummer van de fase ( $E_1$ ,  $E_2$  en  $E_3$ ). De drie fasespanningen zijn onderling  $120^\circ$  verschoven. Dit stelsel van drie spanningen noemen we een driefasespanning. Een driefasespanning nemen we in principe af van zes klemmen.

Om het aantal klemmen dat nodig is om een driefasespanning ter beschikking te hebben te beperken, zullen we de driefasige generator schakelen. We kunnen de generator in ster of in driehoek



schakelen. Om een driefasige generator met dezelfde verbindingsplaatjes in **ster** of in **driehoek** te kunnen schakelen, worden de fasen diagonaal aan de klemmen verbonden. Figuur 8.2 stelt het klemmenbord van een driefasige generator voor.

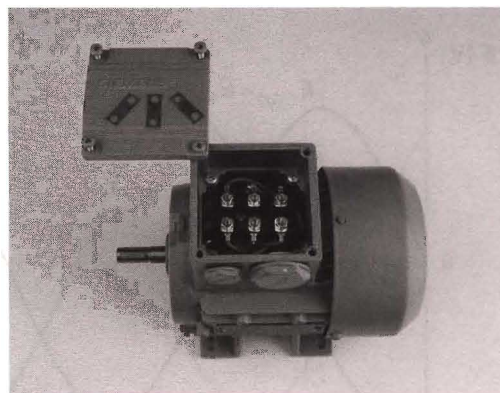
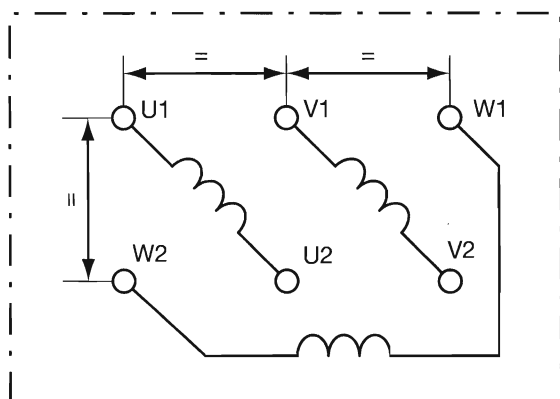


Fig. 8.2 Klemmenbord van een driefasige generator

Motorklemmenbord en verbindingsplaatjes

De beginpunten van de fasen zijn verbonden met de bovenste klemmen van het klemmenbord. De verticale en horizontale afstand tussen de klemmen onderling is gelijk.

## Toelichting

*Wisselspanninggeneratoren met groot vermogen*

In de voorgestelde principewerking staan de polen stil en draaien de fasen. In de praktijk vinden we die uitvoering terug voor generatoren met klein vermogen. Voor driefasige generatoren met groot vermogen laten we de polen draaien (rotor) en de fasen worden dan op de stator geplaatst. Figuur 8.2 stelt het statorklemmenbord van een generator met draaiende polen voor. Wat de principewerking betreft, zijn beide uitvoeringen identiek.

## 8.1.2 Driefasespanning

### Leerdoelen

Hierna kan je:

- het begrip driefasespanning definiëren.
- een driefasespanning voorstellen in een spanning-tijd-diagram en daaruit de vectoriële voorstelling afleiden.
- uit de vectoriële voorstelling van een driefasespanning de wiskundige uitdrukking van de driefasespanning afleiden met de fasehoek in graden en radialen.
- de hoofdeigenschap van een driefasespanning geven.
- op een willekeurig ogenblik in het spanning-tijd-diagram de hoofdeigenschap van een driefasespanning via ogenblikkelijke waarden en vectorieel duiden.
- aan de hand van goniometrische en complexe berekeningen de hoofdeigenschap van een driefasespanning bewijzen.

### a Definitie

Een driefasespanning is een stelsel van drie sinusvormige spanningen met dezelfde frequentie en maximale waarde, die onderling over  $1/3$  periode verschoven zijn.

b Sinusvormige en vectoriële voorstelling

In het spanning-tijd-diagram van figuur 8.3 is het verloop van een driefasespanning en de bijhorende vectoriële voorstelling op het tijdstip  $t_1$  weergegeven.

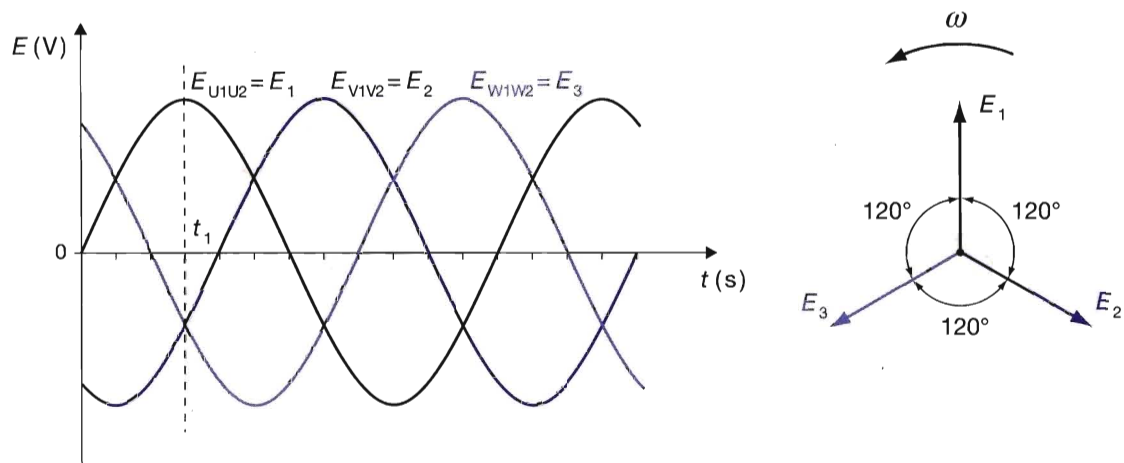


Fig. 8.3 Sinusvormige en vectoriële voorstelling van een driefasespanning

c Wiskundige uitdrukking van een driefasespanning

De wiskundige uitdrukking van een driefasespanning kunnen we afleiden uit het vectorendiagram dat hoort bij tijdstip  $t = 0$  in het spanning-tijd-diagram van figuur 8.3.

Als we de fase van elke fasespanning uitdrukken in **graden** wordt de wiskundige uitdrukking:

$$\begin{cases} e_1 = E_m \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot t}{T} \right] \\ e_2 = E_m \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot t}{T} \right] - 120^\circ \\ e_3 = E_m \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot t}{T} - 240^\circ \right] = E_m \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot t}{T} + 120^\circ \right] \end{cases}$$

Als we de fase van elke fasespanning uitdrukken in **radialen** wordt de wiskundige uitdrukking:

$$\begin{cases} e_1 = E_m \cdot \sin (\omega \cdot t) \\ e_2 = E_m \cdot \sin \left[ \omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right] \\ e_3 = E_m \cdot \sin \left[ \omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3} \right] = E_m \cdot \sin \left[ \omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right] \end{cases}$$

d Hoofdeigenschap of grondstelling van een driefasespanning

We bekijken even aandachtig figuur 8.3. Als we op een willekeurig tijdstip de ogenblikkelijke waarden van de drie spanningen samentellen, rekening houdend met hun teken, **stellen** we vast

dat de algebraïsche som altijd nul is. Een of twee ogenblikkelijke waarden van de spanningen zijn altijd positief terwijl op datzelfde moment de andere waarden negatief zijn.

Wiskundig drukken we dat uit als:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

De uitdrukking noemen we de hoofdeigenschap of grondstelling van een driefasespanning.

We komen tot dezelfde vaststelling als we volgens figuur 8.3 de vectoriële som van de spanningen maken (figuur 8.4). Het beginpunt en het eindpunt van de samenstellende vectoren vallen samen, waaruit we kunnen besluiten dat de resulterende spanning nul is.

De hoofdeigenschap van een driefasespanning kunnen we ook schrijven als:

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = 0$$

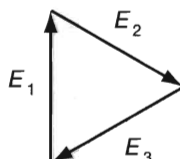


Fig. 8.4 Vectorieel bewijs van de hoofdeigenschap van een driefasespanning

We kunnen de hoofdeigenschap ook wiskundig bewijzen.

$$\begin{aligned} e_1 + e_2 + e_3 &= \\ E_m \cdot \sin \alpha + E_m \cdot \sin (\alpha - 120^\circ) + E_m \cdot \sin (\alpha - 240^\circ) &= \\ E_m \cdot [\sin \alpha + \sin (\alpha - 120^\circ) + \sin (\alpha - 240^\circ)] & \end{aligned}$$

Uit de goniometrie volgt:

$$\begin{aligned} \sin (\alpha - 120^\circ) &= \\ \sin \alpha \cdot \cos 120^\circ - \sin 120^\circ \cdot \cos \alpha &= \\ -0,5 \cdot \sin \alpha - 0,866 \cdot \cos \alpha & \end{aligned}$$

en

$$\begin{aligned} \sin (\alpha - 240^\circ) &= \\ \sin \alpha \cdot \cos 240^\circ - \sin 240^\circ \cdot \cos \alpha &= \\ -0,5 \cdot \sin \alpha + 0,866 \cdot \cos \alpha & \end{aligned}$$

zodat

$$e_1 + e_2 + e_3 = E_m [\sin \alpha - 0,5 \cdot \sin \alpha - 0,866 \cdot \cos \alpha - 0,5 \cdot \sin \alpha + 0,866 \cdot \cos \alpha] = E_m \times 0 = 0$$

Overeenkomstig het vectorendiagram van figuur 8.3 schrijven we de complexe uitdrukkingen van de fasespanningen:

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= E_m \angle 90^\circ = 0 + j \cdot E_m \\ \bar{E}_2 &= E_m \angle -30^\circ = 0,866 \cdot E_m - j \cdot 0,5 \cdot E_m \\ \bar{E}_3 &= E_m \angle -150^\circ = -0,866 \cdot E_m - j \cdot 0,5 \cdot E_m \\ \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3 &= 0 + j \cdot E_m + 0,866 \cdot E_m - j \cdot 0,5 \cdot E_m - 0,866 \cdot E_m - j \cdot 0,5 \cdot E_m = \\ (0 + 0,866 \cdot E_m - 0,866 \cdot E_m) + j(E_m - 0,5 \cdot E_m + 0,5 \cdot E_m) &= 0 + j0 = 0 \end{aligned}$$





In het labboek vind je mogelijke opdrachten en demonstraties rond genereren en sinusvormige voorstelling van een driefasespanning.

## 8.2 Schakelen van driefasige generatoren

### 8.2.1 Driehoekschakeling van een driefasige generator

#### Leerdoelen

Hierna kan je:

- het principe van de driehoekschakeling van een driefasige generator toelichten.
- de verbindingen van het klemmenbord van een in driehoek geschakelde generator schetsen, de klemmen en de lijnen benoemen.
- het begrip 'lijn' definiëren bij een driefasenet.
- toelichten waarom er geen stroom vloeit in een onbelaste in driehoek geschakelde generator.
- de lijnspanningen van een driefasige generator benoemen en aanduiden op een elektrisch schema.
- het schakelschema van een in driehoek geschakelde generator tekenen en alle spanningen correct aanduiden.

We schakelen een driefasige generator in driehoek door het eindpunt van een fase te verbinden met het beginpunt van de volgende fase. Bij het klemmenbord van een driefasige generator horen drie geleidende plaatjes. Om de generator in driehoek te schakelen, verbinden we telkens een beginpunt met het eindpunt eronder door middel van een plaatje (figuur 8.5).

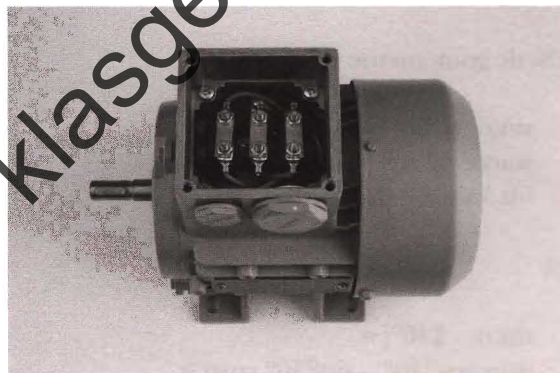
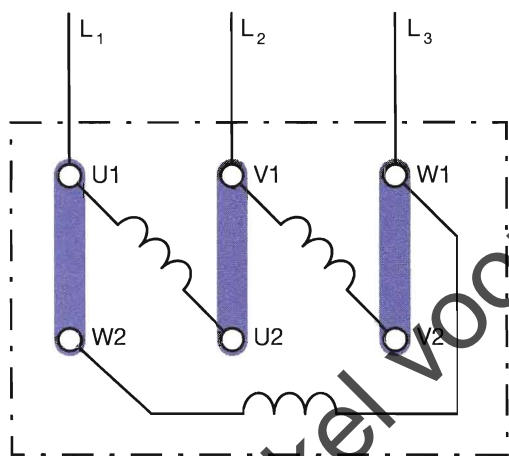


Fig. 8.5 Klemmenbord van een in driehoek geschakelde generator

Motorklemmenbord in driehoek

Door de driefasige generator in driehoek te schakelen, beperken we het aantal klemmen dat we nodig hebben om de driefasespanning van de generator af te nemen van 6 tot 3. Aan het beginpunt van elke fasewikkeling verbinden we een netgeleider. Een geleider van het net die verbonden is met een beginpunt van een fase van de driefasige generator noemen we **een lijn**. Een lijn benoemen we met een hoofdletter L en een index die de volgorde van de lijnen aangeeft. Een driefasige generator die in driehoek geschakeld is, voedt altijd een driegeleidernet ( $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$ ).

Door het bevestigen van de twee rechtse plaatjes aan het klemmenbord (figuur 8.5) **schakelen** we de drie fasen in serie (figuur 8.7). De zin van een fasespanning duiden we aan met een **pijl** die wijst van het eindpunt naar het beginpunt van elke fase. We beschouwen de fasespanning als de span-

ning op het beginpunt t.o.v. het eindpunt. Uit de hoofdeigenschap van de driefasespanning weten we dat de spanning over de serieschakeling op elk ogenblik gelijk is aan de som van de fasespanningen, die gelijk is aan nul. In de praktijk meten we dit altijd even na met een voltmeter tussen de klemmen U1 en W2 (figuur 8.6).

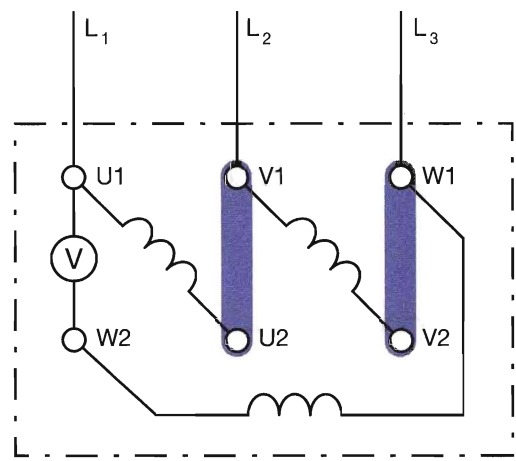


Fig. 8.6 Controlemeting op het klemmenbord van een in driehoek geschakelde generator

Als we de driehoekschakeling vervullen door het derde geleidende plaatje te bevestigen, zal er geen spanning over die geleidende verbinding staan en zal er geen stroom door dit plaatje of door de driehoekschakeling (figuur 8.6) vloeien.

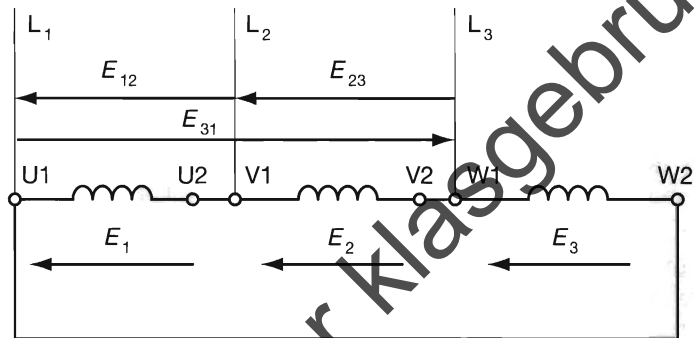


Fig. 8.7 Principe van een driehoekschakeling van een driefasige generator

De spanning tussen twee lijnen noemen we een lijnspanning. We benoemen de lijnspanningen met een hoofdletter een dubbele index  $E_{12}$ ,  $E_{23}$  en  $E_{31}$ .

De eerste lijnspanning  $E_{12}$  is de spanning van  $L_1$  t.o.v.  $L_2$ . We duiden ze aan met een pijl van  $L_2$  naar  $L_1$ . Uit figuur 8.7 blijkt dat:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{12} &= \vec{E}_1 \\ \vec{E}_{23} &= \vec{E}_2 \\ \vec{E}_{31} &= \vec{E}_3 \end{aligned}$$

Bij een driehoekschakeling is een lijnspanning  $U_L$  van het verdeelnet altijd gelijk aan een fasespanning  $U_f$  van de generator.



In figuur 8.8 stellen we de fasespanningen en de lijnspanningen voor in het schakelschema van een driefasige generator die in driehoek geschakeld is.

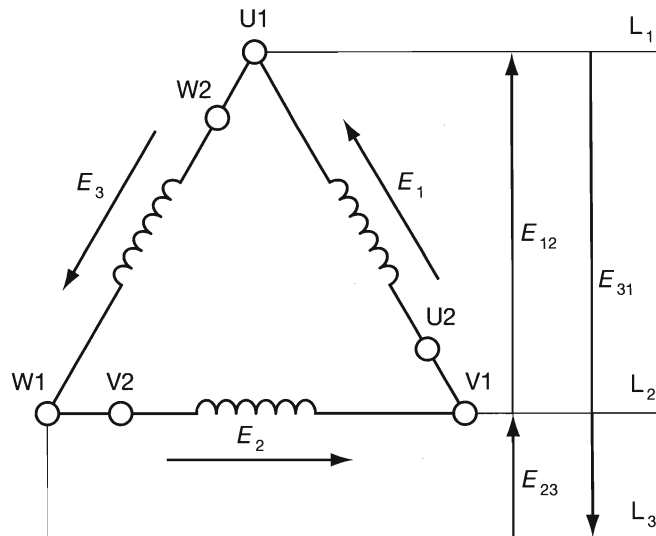


Fig. 8.8 Schakelschema van een driefasige in driehoek geschakelde generator

### 8.2.2 Sterschakeling van een driefasige generator

#### Leerdoelen

Hierna kan je:

- het principe van de sterschakeling van een driefasige generator toelichten.
- de verbindingen van het klemmenbord van een in ster geschakelde generator schetsen, de klemmen en de lijnen benoemen.
- het begrip 'lijn' definiëren bij een driefasenet.
- het schakelschema van een in ster geschakelde generator tekenen en alle spanningen correct aanduiden.
- aan de hand van de spanningswet van Kirchhoff het verband tussen de lijnspanningen en de fasespanningen toelichten.
- het momenteel verloop van de lijnspanningen afleiden uit het momenteel verloop van de fasespanning.
- uit het momenteel verloop van fase- en lijnspanning de vectoriële voorstelling afleiden.
- uit de vectoriële voorstelling de waarde en de faseverschuiving van de lijnspanning overeenkomstig de fasespanning afleiden.
- de genormaliseerde waarden van de netspanning toelichten.
- de correcte aanduiding plaatsen bij de klemmen van een driefasenet.

We schakelen een driefasige generator in ster door alle eindpunten aan elkaar te verbinden. De verbinding van de eindpunten noemen we het sterpunt of het nulpunt van de schakeling. De eindpunten verbinden we op het klemmenbord met de bijhorende plaatjes (figuur 8.9).



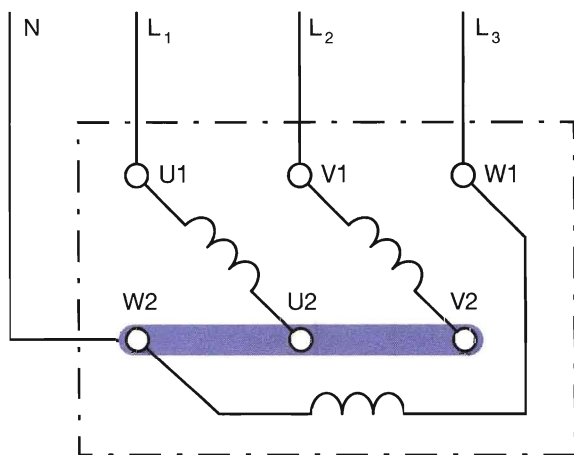
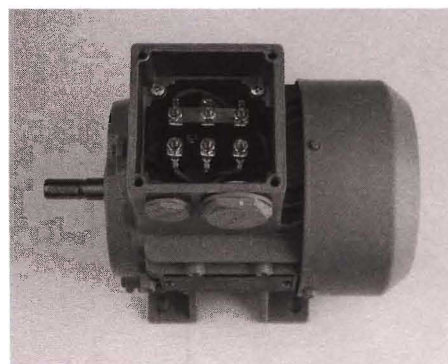


Fig. 8.9 Klemmenbord van een in ster geschakelde generator



Motorklemmenbord in ster

Door de driefasige generator in ster te schakelen beperken we het aantal klemmen dat we nodig hebben om de spanning van de generator af te nemen van 6 tot 4 (de 3 beginpunten en het sterpunt). Aan het beginpunt van elke fase verbinden we een geleider van het net. De geleider van het net die verbonden is met een beginpunt van een fase van de driefasige generator noemen we **een lijn**. Een lijn benoemen we met een hoofdletter L en een index die de volgorde van de lijnen aangeeft. Een driefasige generator die in ster geschakeld is, kan een driegeleidernet ( $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$ ) voeden. We kunnen ook een geleider verbinden aan het nulpunt van de generator. De geleider die verbonden is aan het nulpunt van de generator noemen we de nulgeleider en we benoemen hem met een hoofdletter N. Een driefasige generator die in ster geschakeld is kan een viergeleidernet ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  en N) voeden.

In figuur 8.10 stellen we de fasespanningen en de lijnspanningen voor in het schakelschema van een driefasige generator die in ster geschakeld is. De zin van een fasespanning duiden we aan met een pijl die wijst van het eindpunt naar het beginpunt. We beschouwen de fasespanning als de spanning op het beginpunt t.o.v. het eindpunt.

De spanning tussen twee lijnen noemen we een lijnspanning. We benoemen de lijnspanningen met een hoofdletter en een dubbele index:  $E_{12}$ ,  $E_{23}$  en  $E_{31}$ .

De eerste lijnspanning  $E_{12}$  is de spanning van  $L_1$  t.o.v.  $L_2$ . We duiden ze aan met een pijl van  $L_2$  naar  $L_1$ .

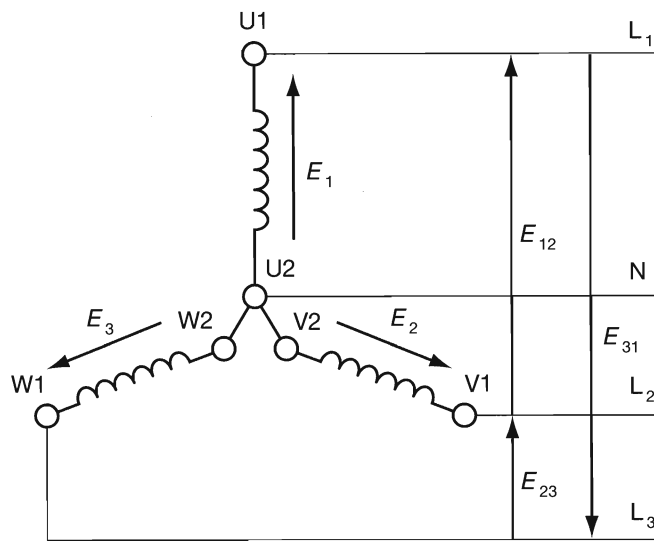


Fig. 8.10 Schakelschema van een driefasige in ster geschakelde generator

Als we de spanningswet van Kirchhoff toepassen op de fase- en lijnspanningen van figuur 8.10, bekomen we de volgende vergelijkingen:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 - \vec{E}_{12} - \vec{E}_2 &= 0 \text{ of } \vec{E}_{12} = \vec{E}_1 - \vec{E}_2 \text{ of } e_{12} = e_1 - e_2 \\ \vec{E}_2 - \vec{E}_{23} - \vec{E}_3 &= 0 \text{ of } \vec{E}_{23} = \vec{E}_2 - \vec{E}_3 \text{ of } e_{23} = e_2 - e_3 \\ \vec{E}_1 - \vec{E}_{31} - \vec{E}_3 &= 0 \text{ of } \vec{E}_{31} = \vec{E}_3 - \vec{E}_1 \text{ of } e_{31} = e_3 - e_1 \end{aligned}$$

Uit de bovenstaande vergelijkingen kunnen we besluiten dat bij een in ster geschakelde generator elke lijnspanning op elk ogenblik het verschil (vectorieel verschil) is van twee fasespanningen. Bij het schrijven van het verschil gebruiken we de volgorde van de indexen van de beschouwde lijnspanning. Bijvoorbeeld: bij de lijnspanning  $E_{23}$  trekken we van de tweede fasespanning de derde fasespanning af. De lijnspanningen noemen we soms ook de gekoppelde spanningen.

In het spanning-tijd-diagram (figuur 8.11) stellen we het verloop voor van de fase- en lijnspanningen van een driefasige generator die in ster geschakeld is.

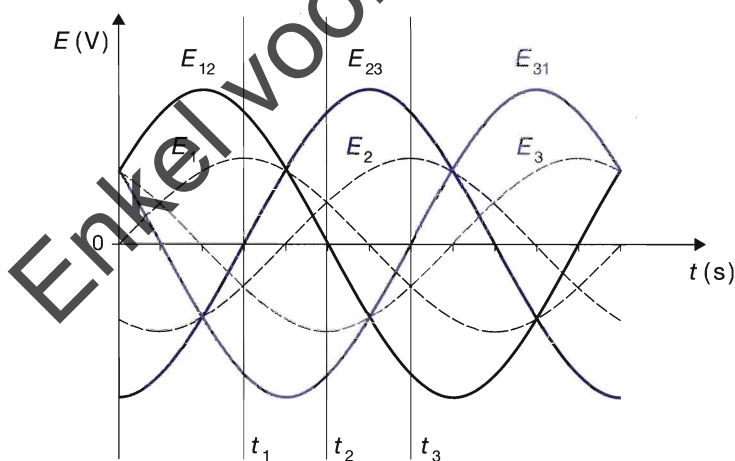
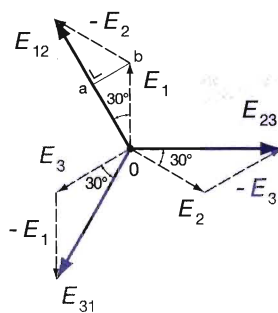


Fig. 8.11 Verloop van fase- en lijnspanningen van een in ster geschakelde generator

In figuur 8.12 construeren we met de kop-aan-staart-methode de lijnspanningen uit de fasespanningen op het ogenblik  $t_1$  in figuur 8.11.





**Fig. 8.12** Vectorendiagram van de spanningen van een in ster geschakelde generator

Uit de figuren 8.11 en 8.12 blijkt dat een lijnspanning van een in ster geschakelde generator  $30^\circ$  voorijlt op de fasespanning waarvan het cijfer als eerste voorkomt in de aanduiding van de lijnspanning. De lijnspanning  $U_{23}$ , bijvoorbeeld, ijlt  $30^\circ$  voor op de tweede fasespanning  $U_2$ . Uit figuur 8.11 blijkt ook dat de 3 lijnspanningen samen een driefasespanning vormen.

In figuur 8.12 is de lengte van de vector die de eerste lijnspanning voorstelt gelijk aan tweemaal de lengte van het lijnstuk  $[oa]$ . In principe nemen we lengte van de vector die een **sinus**vormige grootte voorstelt gelijk aan de maximale waarde.

$$E_{l2m} = 2 \times |oa| = 2 \cdot E_{1m} \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot E_{1m} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot E_{1m}$$

Aangezien de maximale waarden van de sinusvormige lijn- en fasespanning telkens  $\sqrt{2}$  maal groter is dan de effectieve waarde, kunnen we de vergelijking ook in effectieve waarden schrijven.

$$E_{l2} = \sqrt{3} \cdot E_1$$

De gekoppelde spanning of de lijnspanning van een in ster geschakelde generator is gelijk aan de fasespanning vermenigvuldigd met  $\sqrt{3}$ .

Van een in ster geschakelde generator kunnen we drie eenfasige spanningen afnemen, telkens tussen een lijn en de nulgeleider. Van een in ster geschakelde generator kunnen we ook een driefasespanning afnemen waarvan de waarde gelijk is aan  $\sqrt{3}$  maal de waarde van een fasespanning.

De basiswaarde voor de spanning van het distributienet is nu 230 V. Voor een in ster geschakelde generator waarvan de fasespanning 230 V is, bedraagt de lijnspanning ongeveer 400 V. Als de generator een driegeleidernet voedt, worden de klemmen gemerkt met de aanduiding 3 x 400. Als de generator een viergeleidernet voedt, worden de klemmen gemerkt met de aanduiding 3N400.



In het labboek vind je mogelijke opdrachten en demonstraties rond schakelen van driefasige generatoren.

## 8.3 Belasten van een driefasige generator

### Leerdoelen

Hierna kan je:

- de begrippen een- en driefasige verbruikers toelichten.
- de schakeling van verbruikers op een driefasenet toelichten.
- een evenwichtige en onevenwichtige belasting onderscheiden.
- verantwoorden om een driefasige motor in ster of in driehoek te schakelen.
- de spanningen en stromen berekenen die voorkomen als een driefasige belasting in driehoek aangesloten is op een in driehoek geschakelde generator.
- door toepassing van de stroomwet van Kirchhoff aantonen dat een lijnstroom bij een in driehoek geschakelde generator of belasting het vectorieel verschil is van twee fasestromen.
- uit het vectorendiagram afleiden dat een lijnstroom  $\sqrt{3}$  maal groter is dan een fasestroom als een evenwichtige belasting in driehoek aangesloten is op een in driehoek geschakelde generator.
- de spanningen en stromen berekenen die voorkomen als een driefasige belasting in ster aangesloten is op een in ster geschakelde generator door een viergeleidernet.
- het belang van de nulgeleider bij een evenwichtige belasting toelichten.
- het belang van de nulgeleider bij een onevenwichtige belasting toelichten.
- de gevolgen van een breuk in de nulgeleider bij een onevenwichtige belasting in ster toelichten.
- de ster-driehoektransformatie toepassen als de omzettingsformules gegeven zijn.

### 8.3.1 Eenfasige verbruikers

Een verbruiker met impedantie  $Z$  of een parallelschakeling van verbruikers met vervangingsimpedantie  $Z$  noemen we een eenfasige belasting. Een eenfasige belasting kunnen we aansluiten tussen twee lijnen van een drie- of viergeleidernet of tussen een lijn en de nulgeleider van een viergeleidernet.

### 8.3.2 Driefasige verbruikers

Drie eenfasige belastingen die in ster of in driehoek geschakeld zijn tussen de lijnen van een distributienet noemen we een driefasige belasting. Als de driefasige belasting in ster aangesloten is op een viergeleidernet, kan de nulgeleider van het net verbonden worden aan het sterpunt van de belasting.

Als een driefasige belasting bestaat uit drie eenfasige belastingen met dezelfde impedantie ( $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$ ) noemen we dit een evenwichtige of symmetrische belasting.

Als niet alle impedanties van een driefasige belasting gelijk zijn, noemen we dit een onevenwichtige of asymmetrische belasting.

### 8.3.3 Schakelen van het statorklemmenbord van driefasige motoren

De stator (het vaststaande deel) van een draaistroommotor bevat altijd drie identieke wikkelingen of fasen. De ster- en de driehoekschakeling van de fasen is identiek aan de schakelingen van een driefasige generator. De stator van een draaistroommotor vormt een driefasige evenwichtige belasting.

De keuze voor sterschakeling of driehoekschakeling hangt af van de spanningsaanduiding op de kenplaat van de motor en van de spanning van het distributienet.

De spanningsaanduiding 230/400 op de kenplaat van de motor betekent:

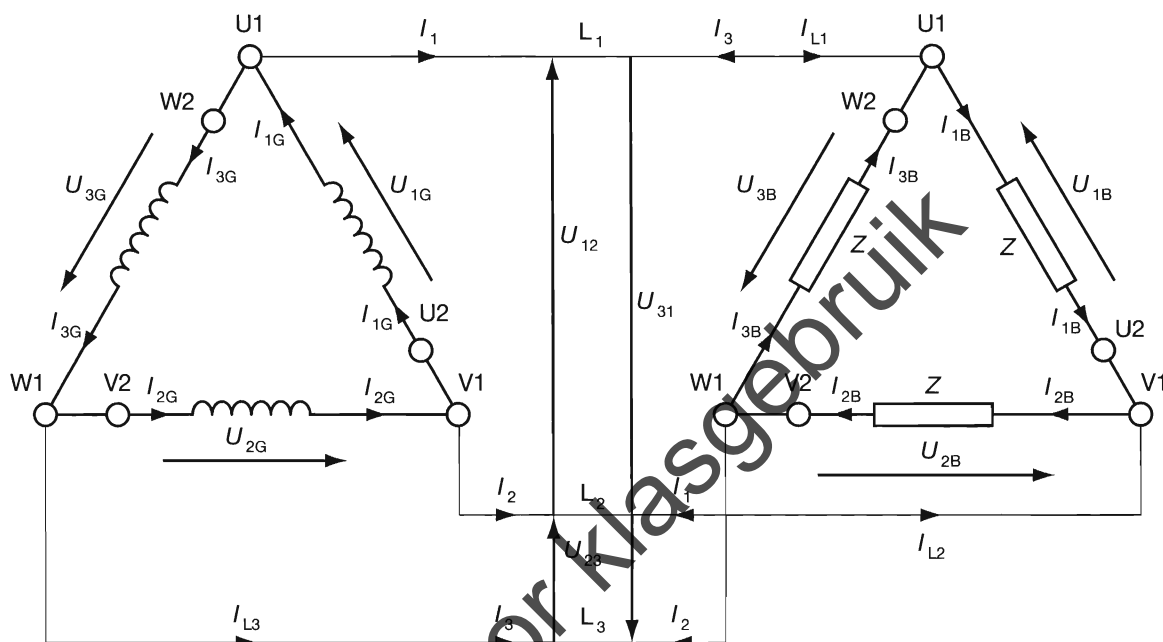
- de motor wordt in driehoek aangesloten op een net waarvan de lijnspanning **gelijk is** aan de laagste spanning ( $3 \times 230$ );
- de motor wordt in ster aangesloten op een net waarvan de lijnspanning gelijk is aan de hoogste spanning ( $3 \times 400$  of  $3N400$ ).

### 8.3.4 Mogelijke belastingssituaties op een driefasenet

De spanningen die we bij de generatoren telkens door  $E$  voorstelden, duiden op de gegenereerde spanningen. Bij de studie van de mogelijke belastinggevallen zullen we de klemspanningen aanduiden met het symbool  $U$ .

*a Evenwichtige belasting in driehoek aangesloten op een in driehoek geschakelde generator*

In figuur 8.13 stellen we het elektrisch schema voor van de stator van een draaistroommotor die in driehoek aangesloten is op een in driehoek geschakelde generator.



**Fig. 8.13** Generator in driehoek en evenwichtige belasting in driehoek

De eerste fasespanning van de generator  $U_{1G}$  (aangeduid met een pijl van eindpunt naar beginpunt) staat tussen de eerste en de tweede lijn  $U_{12}$  (aangeduid met een pijl van lijn 2 naar lijn 1) en is de eerste fasespanning van de belasting  $U_{1B}$  (aangeduid met een pijl van eindpunt naar beginpunt). Voor elke fase van generator en verbruiker kunnen we dezelfde redenering maken.

Bij een in driehoek geschakelde generator of belasting is elke lijnspanning gelijk aan een fasespanning.

Aangezien er spanning over een fase van de belasting staat, vloeit er stroom door die fase. De eerste fase van de generator levert een fasestroom ( $I_{1G}$  van eindpunt naar beginpunt), de stroom vloeit door lijn 1 ( $I_1$  naar de belasting), door de eerste fase van de belasting ( $I_{1B}$  van beginpunt naar eindpunt) en door lijn 2 ( $I_2$  terug naar de bron). Voor elke fase van de generator en de verbruiker kunnen we dezelfde redenering maken.

We beschouwen in elke lijn een lijnstroom die vloeit van de bron naar de belasting.



Als we in elk knooppunt van de driehoekschakeling van **zowel generator als belasting** de stroomwet van Kirchhoff toepassen, komen we tot het volgende besluit:

$$\begin{aligned}\vec{I}_{L1} &= \vec{I}_1 - \vec{I}_3 \\ \vec{I}_{L2} &= \vec{I}_2 - \vec{I}_1 \\ \vec{I}_{L3} &= \vec{I}_3 - \vec{I}_2\end{aligned}$$

In een lijn moeten we schrijven dat de lijnstroom dezelfde zin heeft als een fasestroom, maar de tegengestelde zin van de andere fasestroom.

$$\vec{I}_{L1} = \vec{I}_1 - \vec{I}_3$$

In een hoekpunt van de generator moeten we schrijven dat de som van de stromen die erin toekomen, gelijk is aan de som van de stromen die ervan wegvloeien.

$$\vec{I}_{1G} = \vec{I}_{L1} + \vec{I}_3 \text{ of } \vec{I}_{L1} = \vec{I}_{1G} - \vec{I}_{3G}$$

In een hoekpunt van de belasting moeten we schrijven dat de som van de stromen die erin toekomen, gelijk is aan de som van de stromen die ervan wegvloeien.

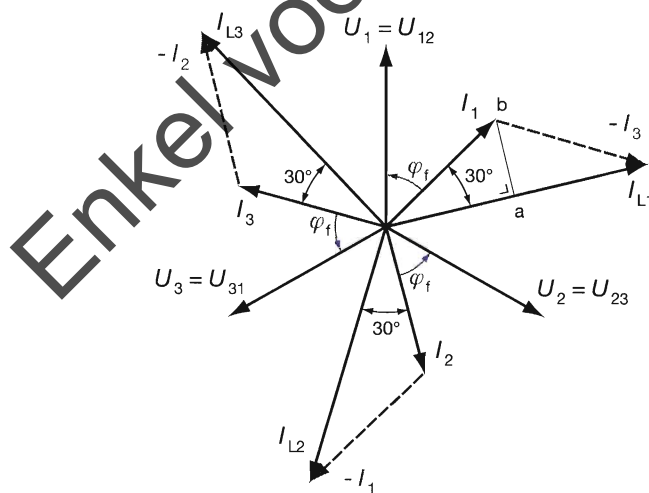
$$\vec{I}_{1B} = \vec{I}_{L1} + \vec{I}_{3B} \text{ of } \vec{I}_{L1} = \vec{I}_{1B} - \vec{I}_{3B}$$

De laatste twee vergelijkingen kunnen we voor de driehoekschakeling schrijven als:

$$\vec{I}_{L1} = \vec{I}_1 - \vec{I}_3$$

Bij een in driehoek geschakelde generator of belasting is elke lijnstroom het vectorieel verschil van twee fasestromen.

Bij een evenwichtige belasting zijn de drie fasestromen even groot en evenveel verschoven  $\varphi_f$  t.o.v. de spanning erover. In analogie met de driefasespanning noemen we het stelsel van de drie fasestromen bij een evenwichtige belasting in driehoek ook een driefasestroom. In figuur 8.14 construeren we elke lijnstroom met de kop-aan-staartmethode uit een fasestroom en het tegengestelde van de vorige fasestroom.



**Fig. 8.14** Vectorendiagram van een in driehoek geschakelde evenwichtige belasting

Uit figuur 8.14 blijkt dat een lijnstroom van een in driehoek geschakelde evenwichtige belasting  $30^\circ$  naaijlt op de fasestroom met dezelfde index. De lijnstroom  $I_{L1}$ , bijvoorbeeld, ijlt  $30^\circ$  na op de eerste fasestroom  $I_1$ . Uit figuur 8.14 blijkt ook dat de 3 lijnstromen samen een driefasestroom vormen.

In figuur 8.14 is de lengte van de vector die de eerste lijnstroom voorstelt gelijk aan tweemaal de lengte van het lijnstuk [oa]. In principe nemen we lengte van de vector die een sinusvormige grootheid voorstelt gelijk aan de maximale waarde.

$$I_{L1m} = 2 \times |oa| = 2 \cdot I_{1m} \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot I_{1m} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot I_{1m}$$

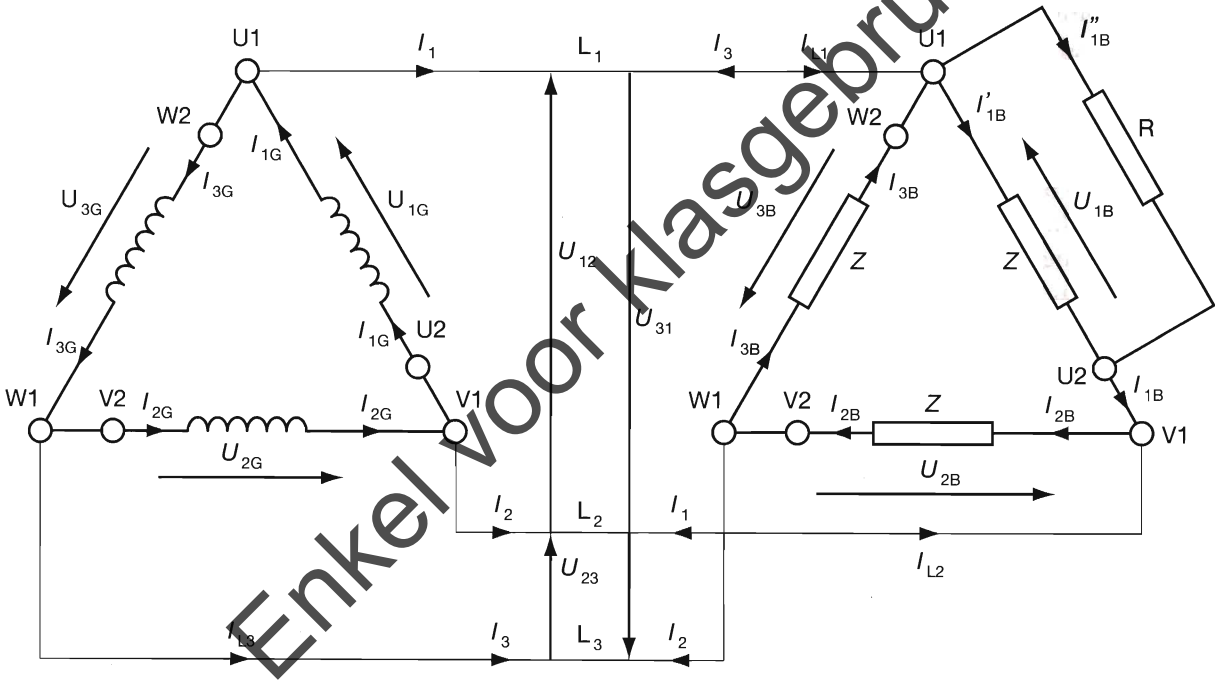
Aangezien de maximale waarden van de sinusvormige lijn- en fasestroom telkens  $\sqrt{2}$  maal groter is dan de effectieve waarde, kunnen we de vergelijking ook in effectieve waarden schrijven.

$$I_{L1} = \sqrt{3} \cdot I_1$$

De lijnstroom van een in driehoek geschakelde evenwichtige belasting is gelijk aan de fasestroom vermenigvuldigd met  $\sqrt{3}$ .

*b Onevenwichtige belasting in driehoek aangesloten op een in driehoek geschakelde generator*

De belasting van figuur 8.14 kunnen we bijvoorbeeld in onevenwicht brengen door een gelijkstroomweerstand parallel op de eerste fase te schakelen (figuur 8.15).



**Fig. 8.15** Generator in driehoek en onevenwichtige belasting in driehoek

In figuur 8.15 is de eerste fase van de belasting de parallelschakeling van een motorfase en een gelijkstroomweerstand. De stroom door de eerste fase van de belasting  $I_{1B}$  is de resultante van de stroom door de motorfase  $I'_{1B}$  en de stroom door de gelijkstroomweerstand  $I''_{1B}$  (figuur 8.16). De eerste fase is aangesloten tussen twee lijnen. Het onevenwicht in de eerste fase beïnvloedt twee lijnstromen.

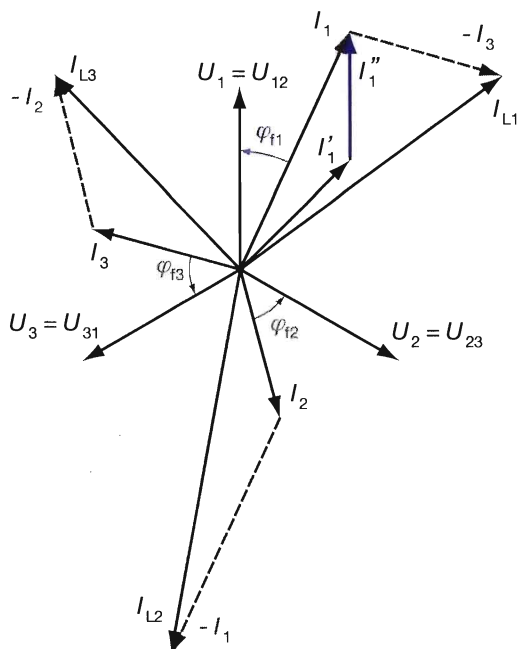


Fig. 8.16 Vectorendiagram van een in driehoek geschakelde onevenwichtige belasting

In het vectorendiagram van figuur 8.16 zien we duidelijk dat de drie fasestromen samen geen driefasestroom meer vormen. De eigenschap dat een lijnstroom het vectoriële verschil is van twee fasestromen blijft geldig bij een onevenwichtige belasting. In de onevenwichtige belasting is niet meer geldig dat elke lijnstroom  $\sqrt{3}$  maal groter is dan een fasestroom en dat elke lijnstroom  $30^\circ$  voorijlt op een fasestroom. De drie lijnstromen vormen samen ook geen driefasestroom meer.

c Belasting in ster aangesloten op een in ster geschakelde generator

– Evenwichtige belasting in ster op een viergeleidersnet

In figuur 8.17 stellen we het elektrisch schema voor van de stator van een draaistroommotor die in ster aangesloten is op een in ster geschakelde generator. De nulgeleider verbindt het sterpunt van de generator n met het nulpunt 0 van de belasting.

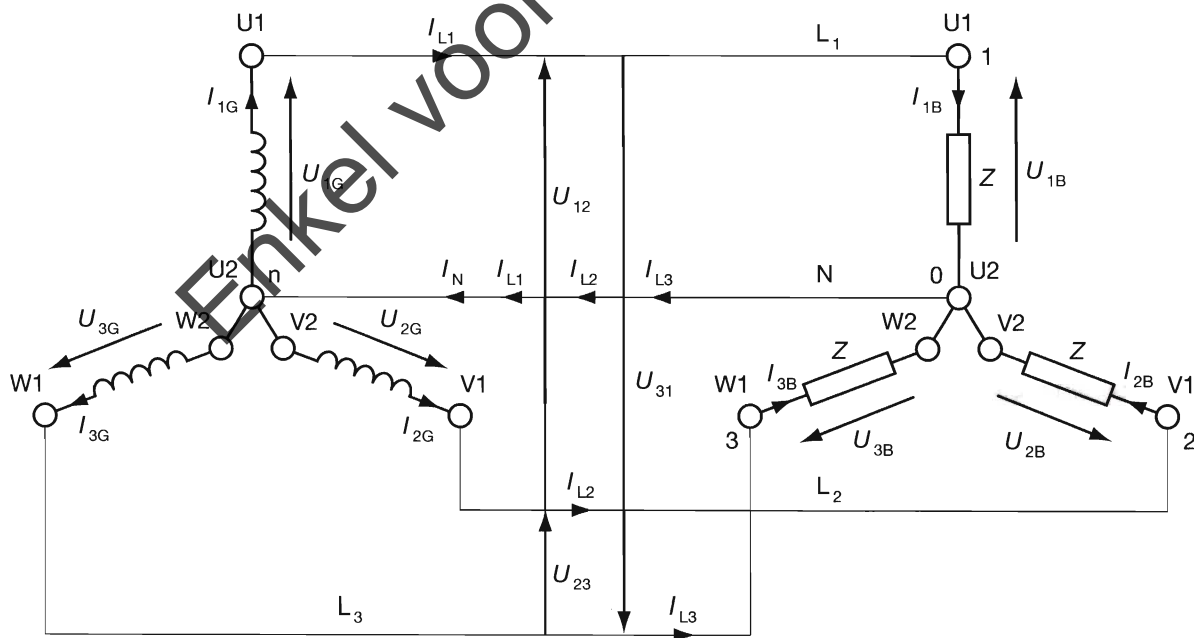


Fig. 8.17 Generator in ster en evenwichtige belasting in ster



De eerste fasespanning van de generator  $U_{1G}$  (aangeduid met een pijl van eindpunt naar beginpunt) staat tussen de eerste lijn en de nulgeleider en is de eerste fasespanning van de belasting  $U_{1B}$  (aangeduid met een pijl van eindpunt naar beginpunt). Voor elke fase van generator en verbruiker kunnen we dezelfde redenering maken.

Bij een in ster geschakelde evenwichtige belasting op een viergeleidernet is elke fase van de belasting parallel geschakeld op een fase van de generator. Over elke fase van de belasting staat dan een fasespanning die gelijk is aan een lijnspanning van het net gedeeld door  $\sqrt{3}$ .

Aangezien er spanning over een fase van de belasting staat, vloeit er stroom door die fase. De eerste fase van de generator levert een fasestroom  $I_{1G}$  (van eindpunt naar beginpunt), de stroom vloeit door de eerste lijn  $I_{L1}$  (naar de belasting), door de eerste fase van de belasting  $I_{1B}$  (van beginpunt naar eindpunt) en door de nulgeleider  $I_{L1}$  (terug naar de bron). Voor elke fase van generator en verbruiker kunnen we dezelfde redenering maken.

$$I_L = I_f = \frac{U_f}{Z}$$

Bij een in ster geschakelde bron of belasting is elke lijnstroom gelijk aan een fasestroom.

Bij een evenwichtige belasting zijn de drie fasestromen even groot en evenveel  $\varphi_f$  verschoven t.o.v. de spanning erover. Bij een evenwichtige belasting in ster is het stelsel van de drie fasestromen een driefasestroom.

De drie lijnstromen vloeien door de nulgeleider terug naar de bron. We beschouwen de zin van de stroom door de nulgeleider  $I_N$  van de belasting naar de bron. Als we de stroomwet van Kirchhoff toepassen in het nulpunt van de generator of van de belasting bekommen we de volgende vergelijking:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_{L1} + \vec{I}_{L2} + \vec{I}_{L3} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

Naar analogie met de driefasespanning kunnen we voor een driefasestroom de grondstelling of hoofdeigenschap formuleren:

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 0$$

Bij een evenwichtige belasting die in ster geschakeld is op een viergeleidernet vloeit er geen stroom door de nulgeleider:

$$\vec{I}_N = 0$$

– Evenwichtige belasting in ster op een driegeleidernet

In de vorige paragraaf toonden we aan dat er geen stroom door de nulgeleider vloeit als een evenwichtige belasting in ster aangesloten is op een viergeleidernet. Als we de nulgeleider als een ideale geleider beschouwen, staat er ook geen spanning tussen het nulpunt van de generator en het nulpunt van de belasting 0;  $U_{n0} = 0$ . Als we in figuur 8.17 de nulgeleider weglaten, is de evenwichtige belasting in ster aangesloten op een driegeleidernet. Het weglaten van de nulgeleider wijzigt de spanningen, stromen en impedanties niet. Een breuk in de nulgeleider heeft bij een evenwichtige belasting geen gevolgen. In de praktijk sluiten we een evenwichtige belasting in ster enkel met 3 lijnen aan.

– Onevenwichtige belasting in ster op een viergeleidernet

De belasting van figuur 8.17 kunnen we bijvoorbeeld in onevenwicht brengen door een gelijkstroomweerstand parallel op de eerste fase te schakelen. De eerste fase van de belasting is de

parallelschakeling van een motorfase en een gelijkstroomweerstand. De stroom door de eerste fase van de belasting  $I_{1B}$  is de resultante van de stroom door de motorfase  $I'_{1B}$  en de stroom door de gelijkstroomweerstand  $I''_{1B}$  (figuur 8.18). De eerste fasestroom is gelijk aan de eerste lijnstroom. Het onevenwicht in de eerste fase beïnvloedt slechts 1 lijnstroom.

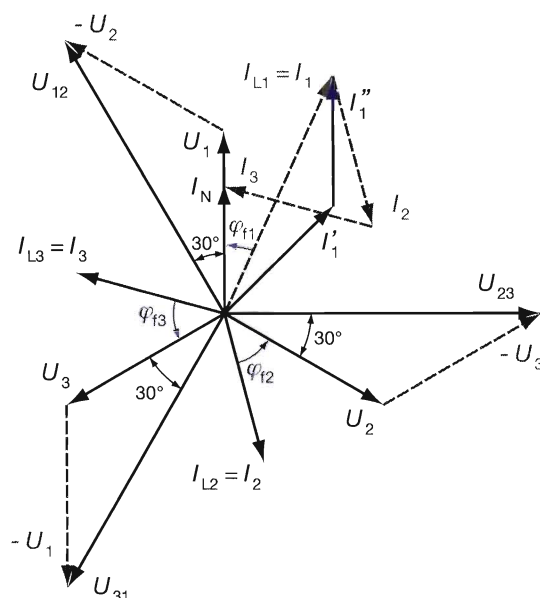


Fig. 8.18 Vectorendiagram van een onevenwichtige belasting in ster aangesloten op een viergeleidersnet

In het vectorendiagram van figuur 8.18 zien we duidelijk dat de drie fasestromen samen geen driefasestroom meer vormen. De vectoriële som van de fasestromen is niet meer gelijk aan nul. Door de nulgeleider vloeit nu de vectoriële som van de stromen.

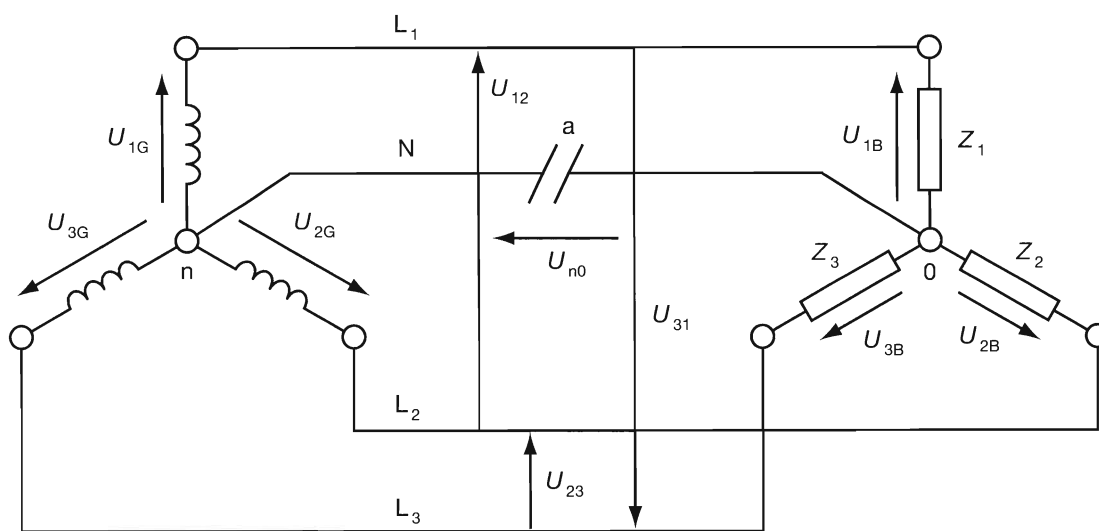
## Toelichting

### Vectorendiagram van generator en belasting

De vectorendiagrammen van figuren 8.16 en 8.18 stellen de vectoren van de grootheden van de belasting voor. Behalve voor de splitsing van  $I_1$  in zijn componenten  $I'_1$  en  $I''_1$ , gelden de vectoren ook voor de grootheden van de generator.

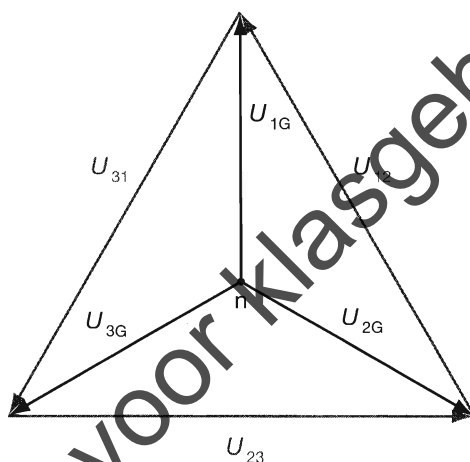
### – Onevenwichtige belasting in ster op een driegeleidersnet

De studie van dit belastingsgeval vraagt speciale aandacht. Dit belastingsgeval komt in de praktijk enkel voor als er een breuk  $\gamma$  optreedt in de nulgeleider van een onevenwichtige belasting die aangesloten is op een viergeleidersnet (figuur 8.19). Bij de onevenwichtige belasting uit de vorige paragraaf vloeit door de nulgeleider de vectoriële som van de stromen  $I_1$ ,  $I_2$  en  $I_3$ . Door het verwijderen van de nulgeleider krijgen we in dit geval  $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 0$ , omdat de stroomterugvoer door de nulgeleider niet kan gebeuren. De symmetrie tussen de fasespanningen van de belasting is hierdoor verbroken en de beschikbare lijnspanning verdeelt zich over de verschillende impedanties.



**Fig. 8.19** Breuk in de nulgeleider bij een onevenwichtige belasting in ster op een viergeleidernet

De grootste impedantiewaarde zal het grootste deel van de aangelegde spanning opnemen. In figuur 8.20 stellen we het vectorendiagram van de spanningen van de in ster geschakelde generator voor. Dit vectorendiagram is identiek aan het vectorendiagram van de spanningen aan de verbruiker bij evenwichtige belasting of onevenwichtige belasting aangesloten op een viergeleidernet.



**Fig. 8.20** Spanningsvectorendiagram van een ster geschakelde generator

Figuur 8.21 geeft een mogelijk spanningsvectorendiagram bij een onevenwichtige belasting zonder nulgeleider. Uit de vergelijking tussen de figuren 8.20 en 8.21 blijkt dat de nulpunten  $n$  en  $0$  niet meer op dezelfde potentiaal zijn. We drukken dat verschijnsel uit door te zeggen dat het nulpunt van de belasting verschoven is t.o.v. het nulpunt van de generator. De spanningsvector  $\vec{U}_{0n}$  geeft de grootte aan van het spanningsverschil van het nulpunt van de belasting  $0$  t.o.v. het sterpunt van de generator  $n$ .



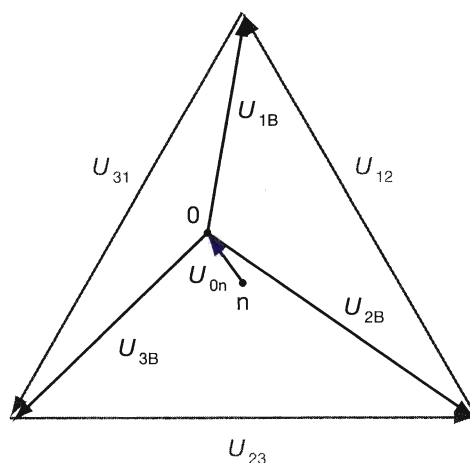


Fig. 8.21 Spanningsvectorendiagram van een onevenwichtige belasting zonder nulgeleider

## Toelichtingen

### Spanningsverdeling

Naargelang van de samenstelling van de onevenwichtige belasting ( $Z_1$ ,  $Z_2$  en  $Z_3$ ) zal de potentiaal van het nulpunt wijzigen. Het gevolg is dat de impedanties telkens onderhevig zijn aan andere spanningswaarden. Het ene toestel (impedantie) krijgt dan te veel spanning, terwijl een ander toestel te weinig krijgt. Meestal zijn de toestellen voorzien om op een spanning van bv. 230 V te werken. Daaruit kunnen we besluiten dat een onevenwichtige belasting in ster in de praktijk niet gewenst is (overbelasting/beschadiging van de apparatuur).

### Breuk in de nulgeleider

Als in figuur 8.17 de belasting onevenwichtig is, dan zal elke impedantie de fasespanning opnemen. Als nu in de nulgeleider een onderbreking (slecht contact) zou optreden, dan ontstaat de hierboven beschreven toestand. Een driefasig distributienet met een nulgeleider is praktisch altijd asymmetrisch belast. Een te vrezen defect is dan ook dat de nulgeleider zou worden onderbroken. Om dat te vermijden, worden geen smeltveiligheden in de nulgeleider opgenomen. Zo worden ook vierpolige (automatische) schakelaars uitgevoerd met een nulcontact, zodat bij het sluiten van de schakelaar de nulgeleider voor de lijnen wordt doorverbonden. Bij het openen zal hij dan als laatste onderbroken worden.

### Ster-driehoektransformatie

Het oplossen van vraagstukken wordt soms vereenvoudigd door een in driehoek geschakelde belasting te vervangen door een equivalente in ster geschakelde belasting, of omgekeerd (figuur 8.22). Met een equivalente schakeling bedoelen we een schakeling die met dezelfde lijnspanningen dezelfde lijnstromen uit het net opneemt of aan het net levert.

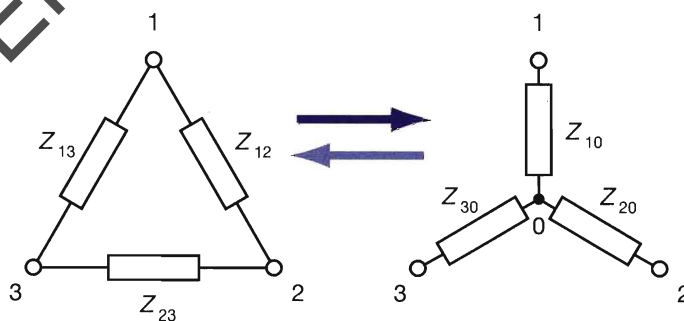


Fig. 8.22 Ster-driehoektransformatie

Van driehoek naar ster gebruiken we de volgende formules:

$$\overline{Z}_{10} = \frac{\overline{Z}_{12} \cdot \overline{Z}_{13}}{\overline{Z}_{12} + \overline{Z}_{23} + \overline{Z}_{13}}$$

$$\overline{Z}_{20} = \frac{\overline{Z}_{12} \cdot \overline{Z}_{23}}{\overline{Z}_{12} + \overline{Z}_{23} + \overline{Z}_{13}}$$

$$\overline{Z}_{30} = \frac{\overline{Z}_{13} \cdot \overline{Z}_{23}}{\overline{Z}_{12} + \overline{Z}_{23} + \overline{Z}_{13}}$$

Van ster naar driehoek gebruiken we de volgende formules:

$$\overline{Z}_{12} = \frac{\overline{Z}_{10} \cdot \overline{Z}_{20}}{\overline{Z}_{30}} + \overline{Z}_{10} + \overline{Z}_{20}$$

$$\overline{Z}_{13} = \frac{\overline{Z}_{10} \cdot \overline{Z}_{30}}{\overline{Z}_{20}} + \overline{Z}_{10} + \overline{Z}_{30}$$

$$\overline{Z}_{23} = \frac{\overline{Z}_{20} \cdot \overline{Z}_{30}}{\overline{Z}_{10}} + \overline{Z}_{20} + \overline{Z}_{30}$$

*Berekenen van alle spanningen en stromen bij een onevenwichtige belasting in ster aangesloten op een driegeleidernet*

Het net wordt gevoed door een generator (in ster of in driehoek geschakeld) waarvan het stelsel van de drie lijnspanningen een driefasespanning vormt.

Als we de belasting die in ster geschakeld is met de ster-driehoektransformatie omzetten in een equivalent driehoekschakeling, dan staat over elke impedantie een lijnspanning.

De complexe uitdrukking van een fasestroom van de in driehoekgeschakelde belasting is gelijk aan de complexe uitdrukking van een lijnspanning gedeeld door de complexe uitdrukking van de impedantie die erop aangesloten is.

De complexe uitdrukking van een lijnstroom is het verschil van de complexe uitdrukkingen van de twee fasestromen door de fasen waarop de lijn aangesloten is.

Als we de lijnstromen nu sturen door de oorspronkelijke sterschakeling, dan wordt elke lijnstroom de fasestroom van een fase van de belasting.

De complexe uitdrukking van de fasespanning van een fase van de in ster geschakelde belasting is het product van de complexe uitdrukking van de fase- of lijnstroom erdoor en de complexe uitdrukking van de impedantie ervan.

Als we de spanningswet van Kirchhoff toepassen op het elektrisch schema van figuur 8.19, dan kunnen we de nulpuntverschuiving berekenen met een van de volgende formules:

$$\overline{U}_{0n} = \overline{U}_{1G} - \overline{U}_{1B}$$

$$\overline{U}_{0n} = \overline{U}_{2G} - \overline{U}_{2B}$$

$$\overline{U}_{0n} = \overline{U}_{3G} - \overline{U}_{3B}$$

*Andere mogelijke belastingsgevallen*

Naast de belastingsgevallen die we in de voorgaande paragrafen besproken hebben is het ook mogelijk dat:

- een in ster geschakelde belasting aangesloten is op een driegeleidernet dat gevoed wordt door een in driehoek geschakelde generator;
- een in driehoek geschakelde belasting aangesloten is op een driegeleidernet dat gevoed wordt door een in ster geschakelde generator.

De waarden van en de onderlinge verschuivingen tussen de grootheden van de generator kan je op eenvoudige wijze afleiden uit de besproken belastingsgevallen.

#### *Distributienetten*

Bij distributienetten is de voedingsgenerator of -transformator praktisch altijd in ster geschakeld met het nulpunt aan de aarde. De sterschakeling heeft, buiten het voordeel dat ze de meest economische uitvoering is, ook nog het voordeel dat er twee verschillende spanningen ter beschikking staan, bv. 230 V en 400 V. Eenfasige belastingen worden gevoed met 230 V en driefasige verbruikers met 400 V. Volgens het algemeen reglement op de elektrische installaties bestaan er drie systemen van verbindingen met de aarde (art. 79). We gaan daar in een volgende paragraaf even verder op in.

#### *Belang van de faseverschuiving tussen lijn- en fasegrootheden*

Een duidelijk inzicht in de onderlinge faseverschuivingen tussen de onderscheiden lijn- en fase-spanningen en lijn- en fasestromen is belangrijk voor de aansluiting van meet- en stuurapparatuur (vermogen- en energiemeting en vermogenelektronica).

#### *Aansluiting van particuliere verbruikers op het distributienet*

Bepaalde stroomverdelers geven de voorkeur aan een eenfasige aansluiting.

De argumenten hiervoor zijn:

- de meetapparatuur is goedkoper;
- de belastingsverdeling gebeurt door de distributiemaatschappij zelf;
- de nadelige gevolgen van een onderbreking van de nulgeleider zijn uitgesloten.



In het labboek vind je mogelijke opdrachten en demonstraties rond belasten van driefasige generatoren.

## 8.4 Systemen van verbindingen met de aarde

### Leerdoelen

Hierna kan je:

- het doel van de systemen van verbinding met de aarde toelichten.
- een systeem van verbinding met de aarde omschrijven aan de hand van de betekenis van de letter in de naam.
- de keuzecriteria voor een systeem van verbinding met de aarde opnoemen.
- het schema van een systeem van verbinding met de aarde schetsen.
- de foutlus volgen op het schema van een systeem van verbinding met de aarde voor een gegeven fout.
- het toepassingsgebied van een systeem van verbinding met de aarde afleiden uit de impedantie van de foutlus.

### 8.4.1 Doel van de aardverbinding

De systemen van verbindingen met de aarde gebruiken we om personen te beveiligen tegen elektrische schokken bij onrechtstreekse aanraking.

#### Toelichtingen

##### *Onrechtstreekse aanraking*

Een onrechtstreekse aanraking is een aanraking door een persoon van een toevallig onder spanning staande massa.

### Massa

De term 'massa' betekent meestal een genaakbaar metalen deel van elektrisch materieel dat onder spanning kan komen door een fout in het isolatiemateriaal dat de massa moet isoleren van de actieve delen.

### Actieve delen

De term 'actieve delen' betekent meestal de geleiders en geleidende delen van elektrisch materieel dat bij normaal gebruik onder spanning kan staan, met inbegrip van de geleidende delen rechtstreeks verbonden met de nulgeleider.

## 8.4.2 Bestaande systemen

Er bestaan drie systemen van verbindingen met de aarde. Elk systeem wordt voorgesteld door een code die bestaat uit ten minste twee en eventueel uit drie of vier letters.

De eerste letter geeft de relatie aan tussen het **verdeelnet** en de aarde:

- T: rechtstreekse verbinding van een punt met de aarde (de beginletter van het Franse woord *terre*);
- I: – hetzij isolatie van alle actieve delen ten overstaan van de aarde,  
– hetzij verbinding van een punt met de aarde via een impedantie.

De tweede letter geeft de relatie aan tussen de massa's van de **elektrische installatie** en de aarde:

- T: rechtstreeks geaarde massa's onafhankelijk van een eventuele aarding van een punt van het verdeelnet;
- N: massa's verbonden met de geaarde geleider van het verdeelnet (bij wisselstroom wordt normaal de nulgeleider geaard).

De eventuele derde en/of vierde letter, telkens door een streepje gescheiden van de eerste twee, bepalen de uitvoering van de nulgeleider en van de beschermingsgeleider:

- S: de functies van nulgeleider en beschermingsgeleider worden verzekerd door afzonderlijke geleiders (de beginletter van het Franse woord *séparé* of het Engelse woord *separate*, dat gescheiden betekent);
- C: een enkele geleider vervult zowel de functie van nulgeleider als die van beschermingsgeleider (PEN-geleider) (de beginletter van het Franse woord *commun* of het Engelse woord *common*, dat gezamenlijk betekent).

De drie systemen van aardverbinding, op deze manier bepaald, zijn:

- de varianten TN-C, TN-C-S en TN-S van het TN-systeem;
- het TT-systeem;
- het IT-systeem.

De keuze tussen de drie systemen wordt hoofdzakelijk door drie beschouwingen ingegeven:

- de continuïteit van de uitbating;
- de beveiliging van personeel en goederen;
- beschouwingen van economische aard.



8.4.3 Beschrijving van de systemen

a De varianten van het TN-systeem

Bij het TN-systeem is een punt van het net rechtstreeks geaard en de massa's van de elektrische installatie zijn met dat punt verbonden door middel van beschermingsgeleiders. Naargelang van de uitvoering van de nulgeleider en de beschermingsgeleider worden drie varianten voorzien.

– TN-C-systeem (figuur 8.23)

De functie van nulgeleider en van beschermingsgeleider wordt vervuld door dezelfde geleider in het hele net. De gemeenschappelijke geleider noemen we de PEN-geleider.

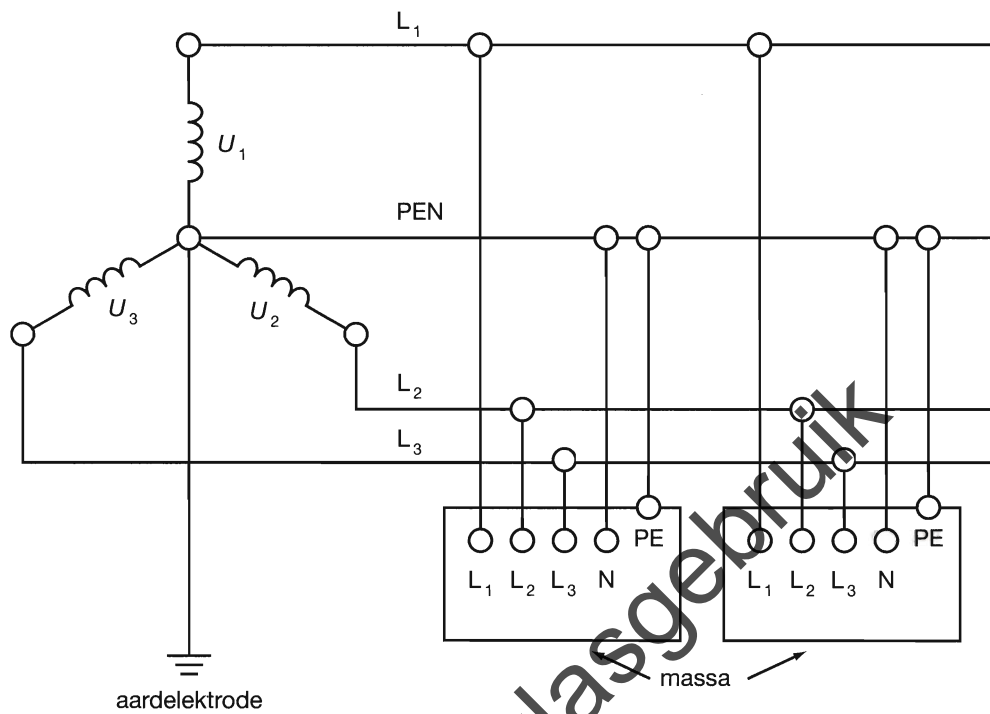
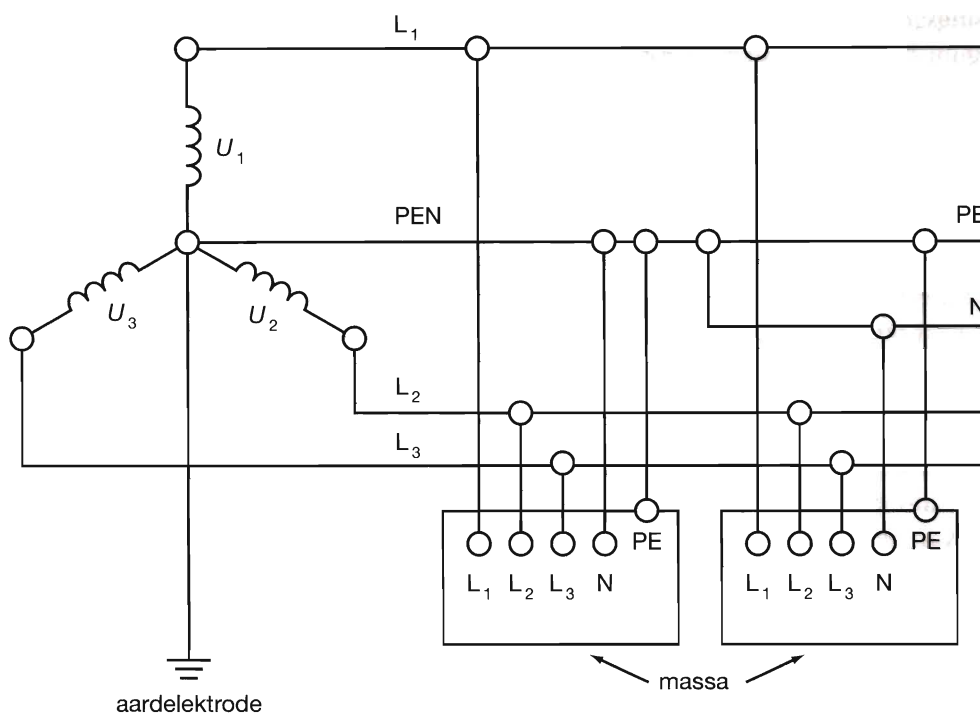


Fig. 8.23 TN-C-systeem

– TN-C-S-systeem (figuur 8.24)

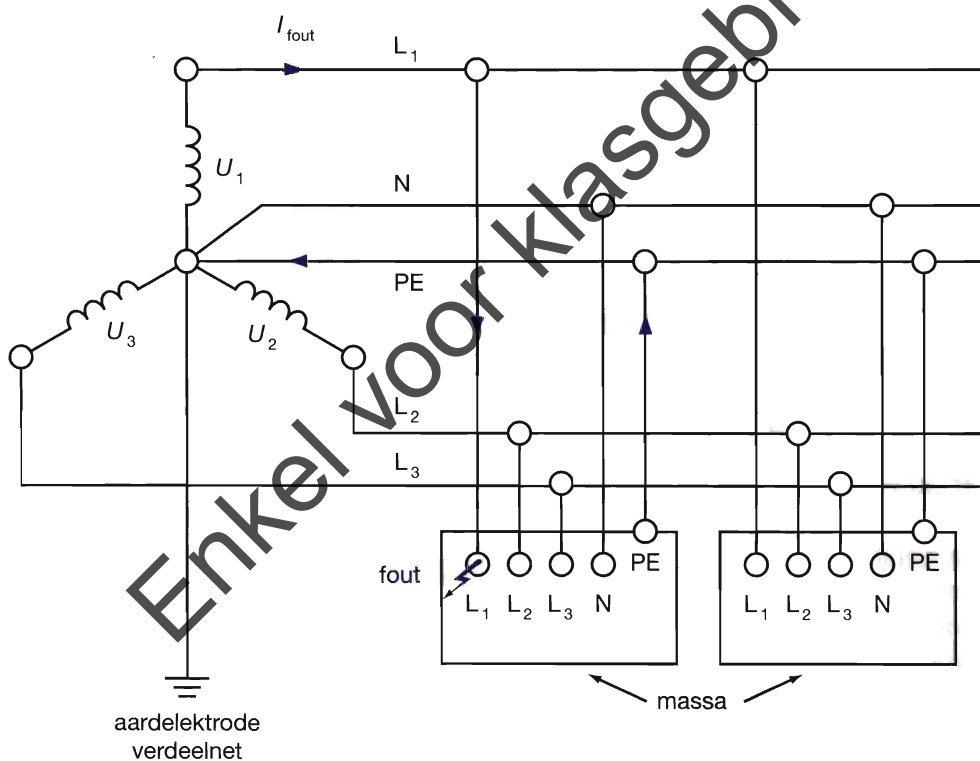
De functie van nulgeleider en van beschermingsgeleider wordt vervuld door dezelfde geleider in een deel van het net. Na een opsplitsing van de PEN-geleider in een gescheiden nulgeleider (N) en een beschermingsgeleider (PE), mogen de twee geleiders niet opnieuw samengevoegd worden.



**Fig. 8.24** TN-C-S-systeem

– TN-S-systeem (figuur 8.25)

De nulgeleider en de beschermingsgeleider zijn afzonderlijke geleiders in het hele net.



**Fig. 8.25** TN-S-systeem met fout

Toepassingsgebied:

Als in figuur 8.25 een isolatiefout optreedt in het eerste toestel tussen lijn 1 en de massa, dan zal er vanuit de bron een foutstroom ( $I_{\text{fout}}$ ) vloeien door lijn 1, door de fout, door de massa, door de beschermingsgeleider terug naar de bron. De weg die de foutstroom volgt, noemen we de foutlus. In het TN-systeem is de impedantie van de foutlus erg klein. De foutlus bestaat volledig uit elektrisch goed geleidende delen. De foutstroom is dan ook vrij groot zodat de normale overstrombeveiliging voor de automatische onderbreking zal zorgen. Het TN-systeem wordt voor distributiesystemen aangewend in openbare verlichtingsnetten. Dat de nulgeleider verbonden is met de massa's, is een groot voordeel. De aanschafprijs van een dergelijk net is het minst hoog en het systeem geeft duidelijkheid in alle situaties. Het onderhoud van een TN-net is eenvoudig.

b TT-systeem (figuur 8.26)

Bij een TT-systeem is een punt van het verdeelnet rechtstreeks geaard en zijn de massa's van de elektrische installatie verbonden met aardelektroden die elektrisch gescheiden zijn van de aardelektrode van het verdeelnet.

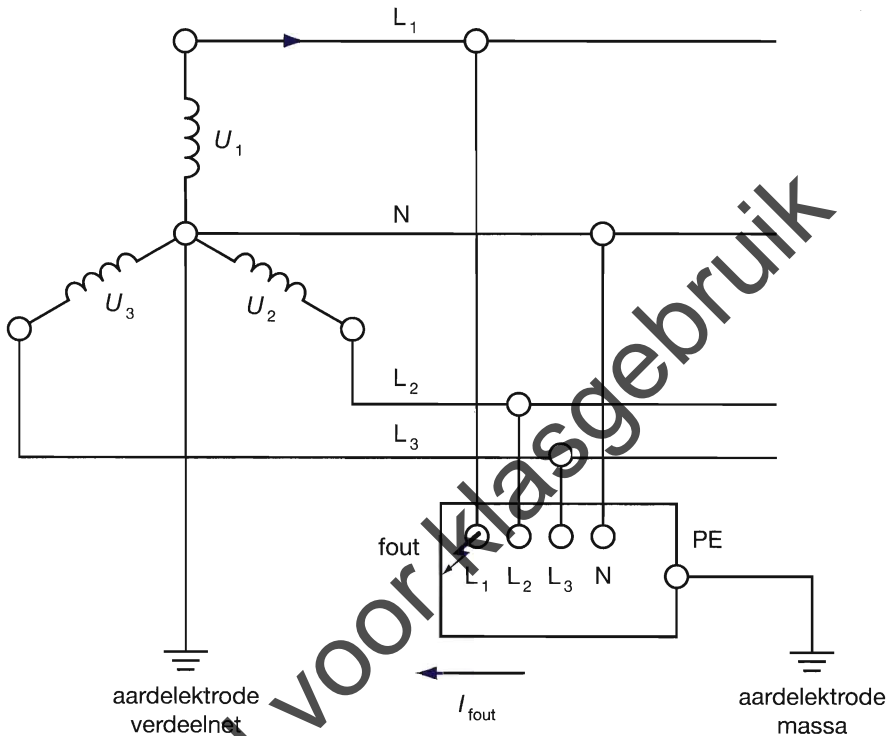


Fig. 8.26 TT-systeem met fout

Toepassingsgebied:

Bij dit systeem, dat algemeen wordt toegepast voor laagspanningsdistributie, is de foutlus deels gevormd door goede elektrische geleiders en deels door de aarde. De impedantie van de foutlus is dus vrij groot ( $15 \Omega$  à  $100 \Omega$ ) zodat de foutstroom vrij beperkt is. De automatische onderbreking gebeurt door een differentieelinrichting.

c IT-systeem (figuur 8.27)

Bij een IT-systeem is geen enkel punt van het verdeelnet rechtstreeks geaard, terwijl de massa's van de elektrische installatie wel geaard zijn.

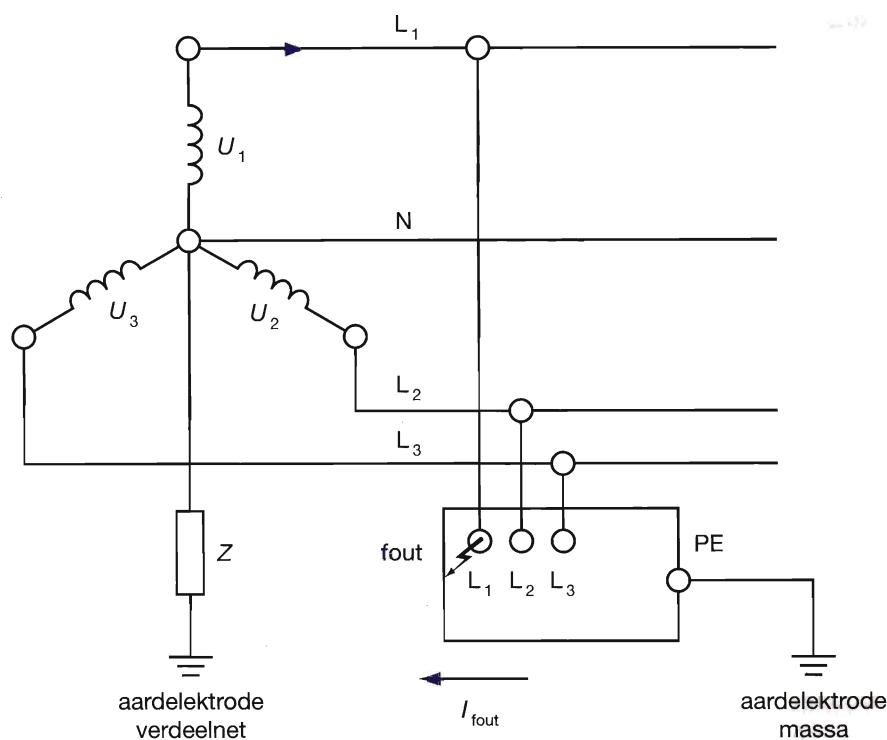


Fig. 8.27 IT-systeem met fout

Toepassingsgebied:

De foutstroom is uiterst beperkt gezien de erg hoge impedantie van de foutlus.

Dit systeem wordt hoofdzakelijk gebruikt als de continuïteit van de uitbating primeert, omdat bij een eerste isolatiefout de installatie toch in dienst kan blijven. Een tweede isolatiefout op een andere fase zou evenwel een kortsluiting, gevoed door de lijnspanning veroorzaken. Daarom moet, van bij het ontstaan van de eerste fout, via een detectie- en alarmsysteem onmiddellijk werk gemaakt worden van de foutlokalisatie. In distributienetten is dat niet mogelijk en daarom wordt dit systeem daar niet toegepast. Ook bij industriële installaties is de mogelijkheid voor foutlokalisatie dikwijls niet aanwezig.



In het labboek vind je mogelijke opdrachten en demonstraties rond systemen van verbindingen met de aarde.

## 8.5 Voorbeelden

- 1 Een driefasige generator genereert in elke fase een spanning van 230 V. Welke spanningen krijg je als je de generator
  - a in ster schakelt en de nulgeleider naar buiten brengt (viergeleidernet)?
  - b in driehoek schakelt?

Gegeven:  $U_f = 230 \text{ V}$

Gevraagd: fase- en lijnspanning bij ster- en driehoekschakeling



Oplossing: a Sterschakeling

Tussen de nulgeleider N en een van de lijndraden  $L_1$ ,  $L_2$  of  $L_3$ : fasespanning  $U_f = 230$  V. Tussen de lijndraden  $L_1$ ,  $L_2$  en  $L_3$  onderling:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_f = 398 \text{ V}$$

b Driehoekschakeling

Hier is  $U_f = U_L = 230$  V

- 2 Een in driehoek geschakelde verbruiker neemt een fasestroom op van 16 A. Bereken de waarde van de stroomsterkte die een A-meter, geschakeld in lijn  $L_1$ , aanduidt.

Gegeven: driehoekschakeling;  $I_f = 16$  A

Gevraagd:  $I_{L1}$

Oplossing:  $I_{L1} = I_f \cdot \sqrt{3} = 16 \cdot \sqrt{3} = 27,7$  A

- 3 Een driefasige generator is in driehoek geschakeld. Elke fasewikkeling genereert een spanning van 230 V en voedt een in ster geschakelde motor. De A-meter in de lijndraad duidt een stroomsterkte van 10 A aan.

Bereken

- de stroomsterkte door een fasewikkeling van de generator en de motor;
- de lijnspanning;
- de spanning over elke spoel van de motor.

Gegeven: generator in driehoekschakeling

$$U_{fG} = 230 \text{ V}$$

$$I_L = 10 \text{ A}$$

motor in sterschakeling

Gevraagd:  $I_{fG}$ ,  $I_{fB}$ ,  $U_L$ ,  $U_{fB}$

Oplossing: Fasestroom van de generator:

$$I_{fG} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ A}$$

Fasestroom van de motor:

$$I_{fB} = I_L = 10 \text{ A}$$

Lijnspanning:

$$U_L = U_{fG} = 230 \text{ V}$$

Fasespanning van de motor:

$$U_{fB} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ V}$$

## 8.6 Opdrachten

- 1 Een driefasige kooikermotor is in driehoek aangesloten op een driefasenet waarvan de lijnspanning 230 V is. Bereken de fasestroom als de A-meter in de lijndraad 15 A aangeeft. Bereken de impedantie van een enkele wikkeling van de motor.
- 2 Een in driehoek geschakelde inductiemotor neemt 60 A op uit het net. Bereken de stroomsterkte door de motorspoelen.
- 3 Een driefasige generator is in ster geschakeld. De amplitude van de fasespanning is 200 V. Welke spanning zal een voltmeter die tussen de lijndraden werd geschakeld aangeven?
- 4 Een driefasenet met 230 V lijnspanning - 50 Hz wordt belast met drie identieke in ster geschakelde impedanties. Elke impedantie is samengesteld uit een gelijkstroomweerstand van  $18\ \Omega$  in serie met een inductantie van  $12\ \Omega$ . Bereken de spanning over elke impedantie, de stroomsterkte door elke impedantie, de faseverschuiving tussen fasespanning en fasestroom en de waarde van de lijnstroom.



Op de cd-rom vind je een diagnostische toets en extra taken.

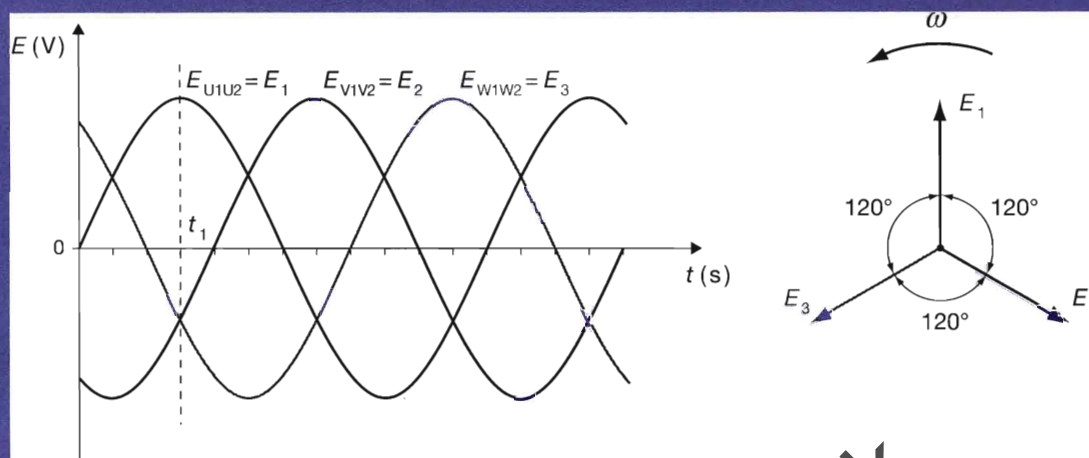
Enkel voor klasgebruik

# SYNTHESE

## Driefasenet

Een **driefasespanning** is een stelsel van drie sinusvormige spanningen met dezelfde frequentie en maximale waarde, die onderling over 1/3 periode verschoven zijn.

Sinusvormige en vectoriële voorstelling van een driefasespanning:



Wiskundige uitdrukking van een sinusvormige spanning:

$$\begin{cases} e_1 = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ e_2 = E_m \cdot \sin\left[\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right] \\ e_3 = E_m \cdot \sin\left[\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right] = E_m \cdot \sin\left[\omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right] \end{cases}$$

De hoofdeigenschap of grondstelling van een driefasespanning:

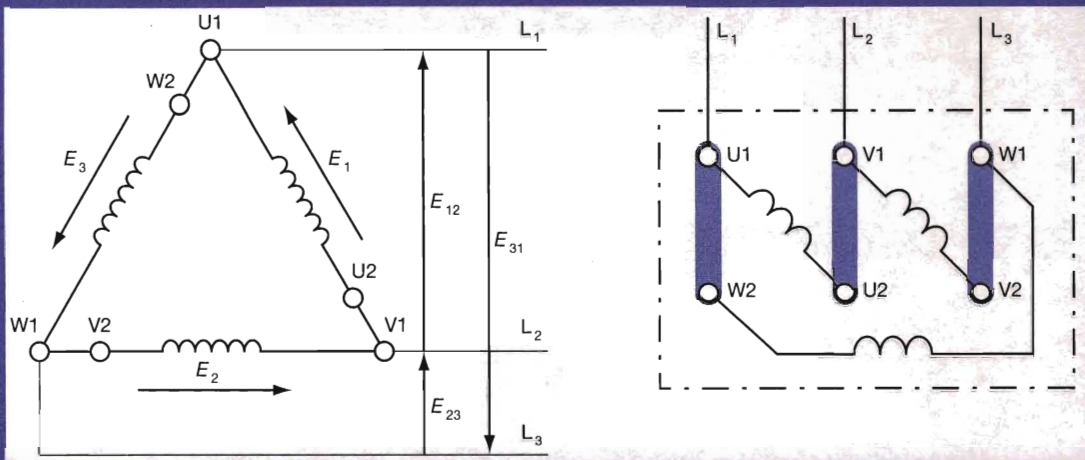
$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = 0 \quad \text{of} \quad e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

Voor een driefasestroom vervangen we in het voorgaande  $E$  door  $I$ .

Een **driefasige generator** wekt een driefasespanning op. Een wikkeling van de generator, waarin een spanning gegenereerd wordt, noemen we een fase. De driefasespanning nemen we in principe van de driefasige generator af van 6 klemmen. Om het aantal klemmen te beperken, schakelen we de generator. In de generatorfasen zal pas stroom vloeien als we de generator belasten. Op gelijk welk driefasenet kunnen willekeurige belastingen in ster of driehoek aangesloten worden. Als we drie gelijke impedanties aansluiten, dan spreken we over een evenwichtig belast net. Is dit niet het geval, dan is het net onevenwichtig belast.



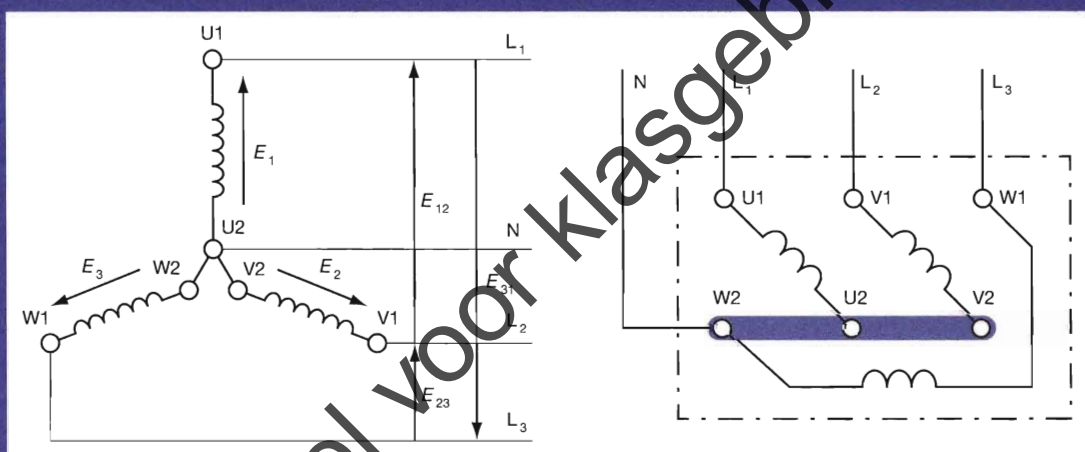
We kunnen een generator **in driehoek schakelen**:



Om de driefasespanning van de generator af te nemen sluiten we 3 lijnen aan op de beginpunten van de generator. De generator voedt een driegeleidernet. Elke lijnspanning van de generator is gelijk aan een fasespanning.

Als we een evenwichtige belasting aansluiten op de generator, is een lijnstroom  $\sqrt{3}$  maal groter dan een fasestroom. Als we een onevenwichtige belasting aansluiten is de enig bruikbare eigenschap: een lijnstroom is het vectorieel verschil van twee fasestromen.

We kunnen een generator **in ster schakelen**:



Om de driefasespanning van de generator af te nemen sluiten we 3 lijnen aan op de beginpunten van de generator. De generator voedt een driegeleidernet. Elke lijnspanning van de generator is  $\sqrt{3}$  maal groter dan een fasespanning.

Als we een nulgeleider aansluiten op het nulpunt van de generator kunnen we ook drie eenfasige spanningen van de generator afnemen, telkens tussen de nulgeleider en een lijn. De generator voedt een viergeleidernet.

Een lijnstroom is altijd gelijk aan een fasestroom.

Als we een evenwichtige belasting aansluiten, heeft de nulgeleider geen enkel nut.

Als we een onevenwichtige belasting aansluiten, is de stroom door de nulgeleider gelijk aan de vectoriële som van de drie fasestromen.



Als we een onevenwichtige belasting in ster schakelen op een driefasenet zonder nulgeleider, zal de spanningsverdeling over de belastingsimpedanties ook onevenwichtig zijn. Een onderbreking in de nulgeleider zal bij een onevenwichtige belasting veelal schadelijke gevolgen hebben. Daarom beveiligen we de nulgeleider bij dit belastingsgeval niet.

Voor het berekenen van de voorkomende spanningen en stromen zullen we voor elk **belastingsgeval** apart de schakeling analyseren en systematisch alle spanningen en stromen berekenen.

**De systemen van verbindingen met de aarde** gebruiken we om personen te beveiligen tegen elektrische schokken bij onrechtstreekse aanraking.

De drie systemen van aardverbinding zijn:

- de varianten TN-C, TN-C-S en TN-S van het TN-systeem;
- het TT-systeem;
- het IT-systeem.

De keuze tussen de drie systemen wordt hoofdzakelijk door drie beschouwingen ingegeven:

- de continuïteit van de uitbating;
- de beveiliging van personeel en goederen;
- beschouwingen van economische aard.

Enkel voor klasgebruik