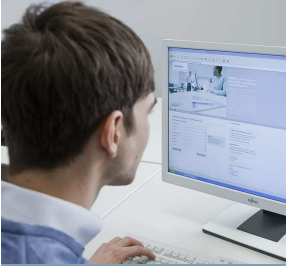


Symmetrische kortsluitberekeningen

Versie 03



Mohammed Obeid

Juni 2012

This document was produced for training purposes. Siemens assumes no responsibility for its contents.

The reproduction, transmission or use of this document or its contents is not permitted without express written authority. Offenders will be liable for damages. All rights, including rights created by patent grant or registration of a utility model or design, are reserved.

© Siemens AG 2012



www.siemens.nl/training

SIEMENS

Afstudeerscriptie

Auteur: Mohammed Nageeb Ahmed Obeid
Opleiding: Elektrotechniek
Studentnummer: 08006113
Studiejaar: 2011/2012
Datum: 1 juni 2012

Onderwijsinstelling: The Hague University of applied science
Adres: Rotterdamseweg 137
Postcode: 2628 AL, Delft
Gecommitteerde: Dhr. M.Damen
1^e stagecoach: Ir. J.B. Woudstra
2^e stagecoach: Ing. H. Olsthoorn

Bedrijf: Siemens Training / Siemens Power Academy
Adres: Werner von Siemensstraat 1
Postcode: 2712 PN, Zoetermeer
Bedrijfsmentor: Ing. C.Bongaerts

Voorwoord

Deze afstudeerscriptie is tot stand gekomen in het kader van mijn afstudeeropdracht als student Elektrotechniek (studierichting Energietechniek) aan The Hague University of applied science Delft. De afstudeeropdracht is uitgevoerd in opdracht van Siemens Power Academy.

In mijn afstudeerperiode heb ik gewerkt aan het ontwikkelen van een lesmodule voor de kortsluitberekeningen. Hiermee heb ik me verdiept in de meeste aspecten die een rol spelen bij het berekenen van de kortsluitstroom volgens de IEC60909. Dit heeft uiteindelijk geleid tot een duidelijk inzicht in de meeste verschijnselen rond de kortsluitberekeningen.

Voor de totstandkoming van deze scriptie wil ik graag een aantal mensen bedanken die mij tijdens de afstudeerperiode hebben geholpen, begeleid en gesteund. Een eerste dankwoord gaat uit naar mijn bedrijfsmentor dhr. Chris Bongaerts voor zijn begeleiding en plezierige ondersteuning om mijn eindscriptie tot een goed einde te brengen.

Ik wil Chris ook bedanken dat hij mij de kans gaf om een aantal cursussen en gesprekken bij te wonen waardoor ik een beter beeld heb gekregen van de wereld van de energietechniek.

Daarnaast wil ik mijn collega's van Siemens training bedanken voor de prettige werkomgeving waarin ik de afgelopen maanden heb mogen werken. Tevens wil ik dhr. Johan Woudstra bedanken voor zijn ondersteuning en een speciaal woord van dank aan mijn ouders die mij in de afgelopen vier studiejaar hebben gesteund.

Ten slotte wil ik Frieda de Schipper bedanken voor haar taalkundige opmerkingen en waardevolle suggesties bij de totstandkoming van mijn scriptie.

Zoetermeer, mei 2012

Mohammed Obeid

Samenvatting

Siemens Power Academy biedt een aantal cursussen aan vakmensen die een praktisch inzicht willen krijgen in de theoretische aspecten. Veel cursussen worden gegeven in vorm van een interactief college waarbij gebruik gemaakt wordt van PowerPoint presentaties met interactieve simulaties. Bij iedere cursus krijgen de deelnemers ook een cursusboek zodat zij zich meer in de lesstof kunnen verdiepen.

Voor de cursus "Kortsluitstroomberekeningen in midden- en laagspanningsnetten" was nog geen cursusboek beschikbaar. Daarom is de opdracht versterkt om een cursusboek te ontwikkelen waarin de meeste aspecten rond de kortsluitberekening fundamenteel worden toelicht.

De deelnemers van deze cursus zijn vaak mensen uit de dagelijkse praktijk met een interesse in de achtergrond van hun werk, daarom legt dit verslag eerst uit hoe de kortsluitstroom ontstaat in eenvoudige wisselstroomketens bestaande uit weerstand en spoel. Vervolgens legt dit verslag uit hoe het inschakelmoment/kortsluitmoment het gedrag van de kortsluitstroom als functie van de tijd kan beïnvloeden. Bovendien is onderzocht hoe de verhouding tussen weerstand en de spoel de grootte van de kortsluitstroom kan beïnvloeden. Hieruit is een simulatie naar voren gekomen waarmee de deelnemers het kortsluitmoment en de R/X verhouding kunnen invoeren om het gedrag van de kortsluitstroom weer te geven.

Nadat de basisprincipes van de kortsluitstroom zijn besproken, behandelt dit verslag 3 rekentechnieken namelijk Thévenin, IEC60909 en %per MVA om de kortsluitberekeningen handmatig uit te voeren. Hoewel vandaag de dag de kortsluitberekeningen met computerprogramma's worden uitgevoerd, is inzicht in de achterliggende theorie van deze rekentechnieken onmisbaar voor een juiste toepassing.

Tot slot gaat dit cursusboek dieper in op het modelleren van netcomponenten volgens de IEC60909. Vervolgens wordt het cursusboek afgesloten met een aantal berekeningsvoorbeelden om een beter beeld te vormen. Zo biedt dit cursusboek de algemene basiskennis die iedere cursist nodig heeft.

Na het volgen van deze cursus zal de deelnemer meer theoretisch inzicht hebben waarbij hij op een eenvoudige manier alle aspecten van de kortsluitberekeningen kan begrijpen en grondig verklaren.

Inhoudsopgave

Voorwoord	III
Samenvatting	IV
1 Inleiding	6
1.1 Opdrachtschrijving	6
1.2 Doelgroep.....	7
1.3 Plan van aanpak.....	7
1.4 Opbouw van de scriptie.....	7
2 Het fundamentele gedrag van wisselstroomketens	8
2.1 Inleiding.....	8
2.2 Het fundamentele gedrag van een zuiver inductieve belasting	9
2.3 Het fundamentele gedrag van een RL- circuit	12
2.4 Invloed van de plaats van de kortsluiting.....	17
2.4.1 Kortsluiting in sterke netten.....	17
2.4.2 Kortsluiting in zwakke netten	18
3 Driefasensysteem	20
3.1 Symmetrisch belast.....	20
3.2 Asymmetrisch belast.....	22
4 Berekeningsmethodieken	24
4.1 Kortsluitberekeningen volgens het theorema van Thévenin.....	24
4.2 Kortsluitberekeningen volgens de IEC60909.....	28
4.2.1 Spanningscorrectiefactor c	30
4.2.2 Impedantie correctiefactoren	31
4.2.3 Het principe van het modelleren van componenten	32
4.2.4 Uitgewerkt voorbeeld	34
4.3 Kortsluitberekeningen volgens % per MVA methode (%/MVA)	36
4.3.1 Uitgewerkt voorbeeld	38
5 Modelling van netcomponenten volgens de IEC60909	40
5.1 Netvoeding	40
5.2 Synchrone generator.....	41
5.2.1 Kortsluitimpedantie	43
5.2.2 Impedantiecorrectiefactor K_G	44
5.3 Transformator.....	48
5.3.1 Impedantiecorrectiefactor K_T	50
5.4 Asynchrone motor	51
5.5 Kabel	53
5.6 Stootkortsluitstroom.....	54
5.6.1 Niet-vermaasde netten.....	55
5.6.2 Vermaasde netten.....	57
6 Uitgewerkte voorbeelden volgens de IEC60909	60
6.1 Voorbeeld 1	60
6.2 Voorbeeld 2	65
6.3 Voorbeeld 3	74
7 Conclusies en aanbevelingen	81
7.1 Conclusies.....	81
7.2 Aanbevelingen.....	81
8 Literatuurlijst	82
9 Bijlagen	83
9.1 IEC60909 formules.....	83
9.2 Gebruikte afkortingen.....	84

1 Inleiding

Mensen die in hun werk van doen hebben met energietechniek missen soms belangrijke basiskennis. Vaak is die kennis nooit overgebracht of na een aantal jaren weggezaakt. Dan kan het gebeuren dat vakmensen bijvoorbeeld precies weten wat ze moeten doen in geval van kortsluiting, maar de basiskennis achter het ontstaan van de kortsluiting niet weten. Dat komt omdat veel opleidingen en cursussen over energietechniek of erg theoretisch zijn of zo breed dat van enige diepgang geen sprake meer is.

Siemens Power Academy biedt trainingen aan waarin wordt ingegaan op de achtergronden van de elektrische energietechniek. Deze trainingen zijn verdeeld in een aantal modules. De onderlinge samenhang van deze modules is weergegeven in figuur 1.1.

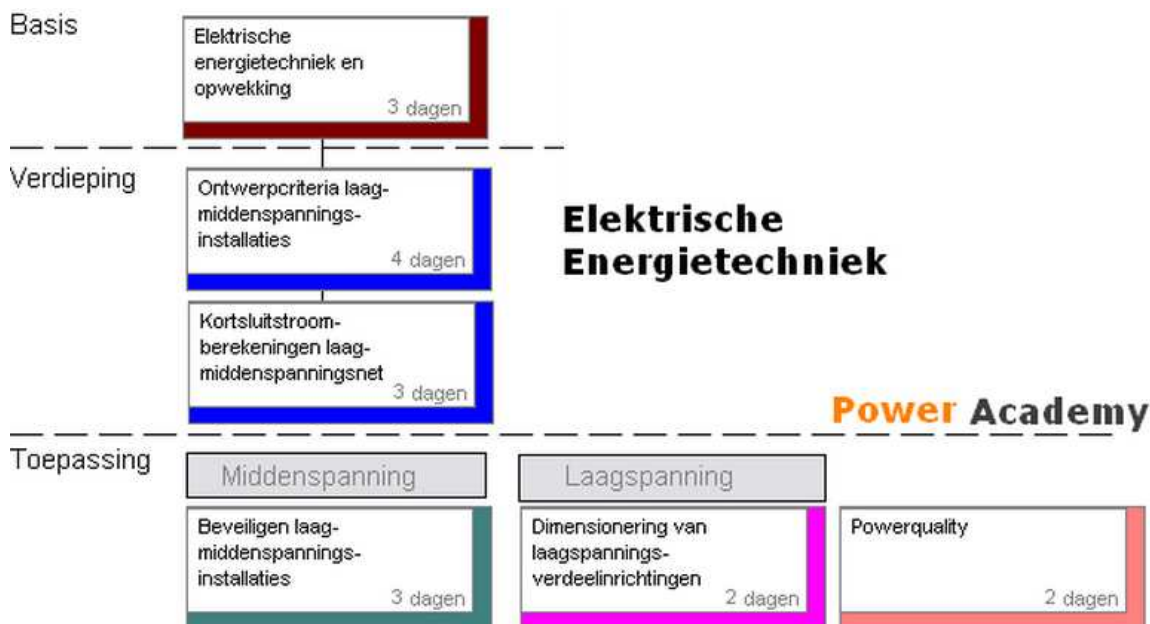


Fig.1.1. Overzicht van de modules van Siemens Power Academy

De trainingen worden gegeven in de vorm van een interactief college waarbij gebruik gemaakt wordt van PowerPoint presentaties en simulaties om de besproken principes te verduidelijken. Bij iedere training krijgen de deelnemers een cursusboek waarin ze meer toelichting kunnen krijgen op het lesmateriaal dat tijdens de cursus behandeld wordt.

1.1 Opdrachtomschrijving

Voor de module "Kortsluitstroomberekeningen laag- en middenspanningsnet" was nog geen cursusboek beschikbaar, daarom is er besloten een afstudeeropdracht op te stellen met als doel het ontwikkelen van cursusboek voor deze module.

De volgende onderwerpen worden in de module "Kortsluitstroomberekeningen laag- en middenspanningsnet" behandeld:

- Het fundamentele gedrag van de wisselstroomketens.
- Invloed van de plaats van de kortsluiting
- Kortsluitberekeningen volgens het theorema van Thévenin, de IEC60909 en %/MVA
- Het modelleren van netcomponenten op basis van IEC 60909.
- Het berekenen van symmetrische driefasen kortsluitstromen.

1.2 Doelgroep

De trainingen binnen Siemens Power Academy worden gegeven voor mensen uit de dagelijkse praktijk met interesse in de achtergrond van hun werk. De meeste deelnemers hebben geen behoefte aan veel rekenwerk met ingewikkelde formules, maar willen graag een duidelijk beeld hebben van de optredende natuurkundige verschijnselen.

1.3 Plan van aanpak

Deze afstudeeropdracht vereist veel kennis over kortsluitberekeningen. Daarom was het noodzakelijk om veel theoretische kennis te vergaren door boeken en artikelen over kortsluitberekeningen en IEC-normen te lezen en bestaande trainingen van Siemens te volgen.

Aan het begin van deze afstudeeropdracht is er een plan van aanpak gemaakt waarbij de inhoud van module centraal stond. Deze inhoud is verdeeld in hoofdstukken. Iedere week wordt bepaald welke hoofdstukken gemaakt moeten worden en iedere week of twee weken wordt een besprekingsdag met de bedrijfsmentor gepland om de gemaakte stukken kritisch te bekijken en eventuele verbeteringen in de stukken door te voeren. Als de gemaakte stukken aangepast en goedgekeurd zijn, is het hoofdstuk definitief.

Een belangrijk uitgangspunt bij het opstellen van het cursusboek is dat de volgorde van de onderwerpen van het cursusboek overeenkomt met de volgorde van de eerdere gemaakte PowerPoint presentatie van deze module.

Bovendien zijn de volgende aspecten in overleg met de bedrijfsmentor vastgesteld:

- Welke onderwerpen nog aan bod kunnen komen.
- Hoe uitgebreid de onderwerpen moeten behandeld worden.
- Op welk niveau de onderwerpen moeten behandeld worden

Een belangrijk uitgangspunt is hierbij dat de deelnemers niet worden geconfronteerd met veel formules over differentiaalvergelijkingen. Daarom is het met de bedrijfsmentor besloten om meer nadruk te leggen op de achterliggende natuurkundige principes. Bij deze module wordt van de deelnemers wel verwacht dat zij enige basiskennis van de nullast- en kortsluitproef, opbouw van generatoren en transformatoren en complexe berekeningen hebben. In deze module zullen deze onderwerpen niet uitgebreid toegelicht worden.

1.4 Opbouw van de scriptie

Het basisgedrag van de kortsluitinstroom is terug te vinden in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 staat kort de theorie met betrekking tot driefasensystemen. Hoofdstuk 4 behandelt drie rekentechnieken om kortsluitberekeningen uit te voeren. Hoofdstuk 5 gaat dieper in op het modelleren van netcomponenten volgens de IEC60909. Vervolgens wordt de lesmodule afgesloten met een aantal berekeningsvoorbeelden om een beter beeld te vormen. Zo biedt dit verslag de algemene basiskennis die iedere cursist nodig heeft.

2 Het fundamentele gedrag van wisselstroomketens

2.1 Inleiding

Kortsluitingen in midden- en laagspanningsnetten kunnen ernstige gevolgen hebben en aanleiding geven tot een kortere of een langere netuitval, waar de gebruikers hinder van ondervinden en waardoor economische schade kan ontstaan.

Een kortsluiting in een elektriciteitsnet wil eigenlijk in het kort zeggen, dat het in de spanningsbron opgewekt vermogen P niet op de plaats terecht komt waar het wordt verlangd, maar naar de spanningsbron terugkeert via een kortere weg. Figuur 2.1 laat op een vereenvoudigde manier zien hoe de bedrijfsstroom I bij een kortsluiting plaats maakt voor de kortsluitstroom I_k .

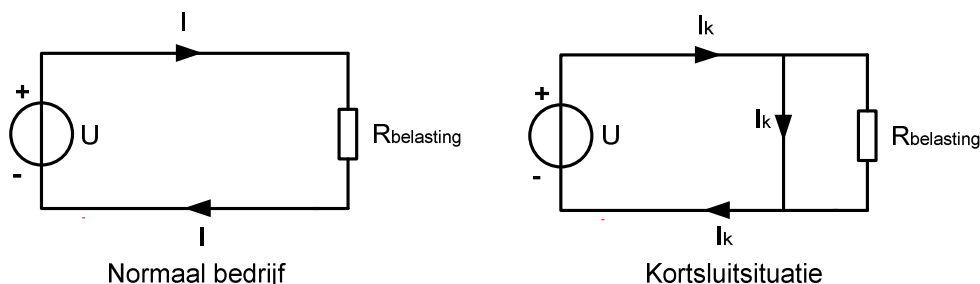


Fig.2.1. Vergelijking tussen normaal bedrijf en kortsluitsituatie

Een kortsluiting is een foutsituatie die niet altijd te voorkomen is bijvoorbeeld door defecte en verouderde isolatie, vocht, fouten door fabrikanten, montagefouten, bedieningsfouten of door weerinvloeden.

Bij kortsluiting is het van belang dat het getroffen netdeel zo snel mogelijk afgeschakeld wordt en dat het net geen andere schade ondervindt door de sluiting. Dat betekent dat de gekozen netdelen (generatoren, transformatoren, motoren en kabels) kortstondig bestand moeten zijn tegen de kortsluitstroom en dat de vermogensschakelaars in staat moeten zijn om deze kortsluitstromen af te schakelen.

De ontwerper van een elektriciteitsnet zal daarom de kortsluitstromen moeten berekenen om de geschikte netcomponenten uit te kunnen zoeken.

Vandaag de dag worden deze berekeningen met computerprogramma's zoals Vision uitgevoerd. Siemens Power Academy vindt dat iedere persoon die zich bezig houdt met de kortsluitberekeningen, de basisprincipes van de gebruikte rekentechnieken moet beheersen.

Om het basisgedrag van de kortsluitstroom goed te kunnen begrijpen, wordt in dit deel van de cursus eerst het basisgedrag van de wisselstroomketens toegelicht.

Hierin wordt het fundamentele gedrag van de kortsluitstroom toegelicht m.b.v. een wisselstroomketen bestaande uit een zuivere spoel. Vervolgens wordt er gekeken naar het gedrag van de kortsluitstroom wanneer de keten ook een ohmse weerstand heeft.

Het basisgedrag van de wisselstroomketens vereenvoudigt het beeld van de kortsluitstroom zodat in de volgende delen van de cursus deze kennis toegepast kan worden.

2.2 Het fundamentele gedrag van een zuiver inductieve belasting

In figuur 2.2 is een circuit gegeven waarbij een ideale spoel aangesloten is op een sinusvormige wisselspanning. De ideale spoel heeft geen ohmse weerstand. Tussen de spanningsbron en de spoel zit een schakelaar (S) om de kortsluiting te kunnen simuleren.

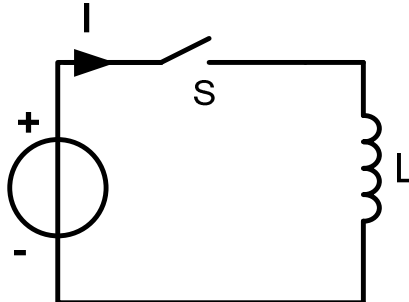


Fig.2.2. Sinusvormige spanning aangesloten op een spoel

Op het moment dat de schakelaar gesloten wordt, wil er een stroom door de spoel lopen. In de spoel zal een magnetisch veld ontstaan.

Omdat de stroom door de spoel wisselend is, leidt dat tot sinusvormig veranderend magnetisme (veranderde flux). Zolang het magnetisme verandert, zal een sinusvormige spanning opgewekt worden over de spoel. De spanning die wordt opgewekt is recht evenredig met de verandering van het magnetische veld. Hier ontstaat in feite een tweede spanningsbron in het circuit (figuur 2.3)

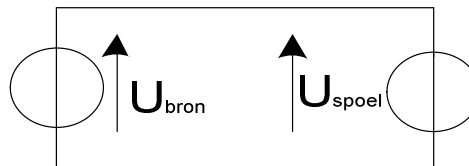


Fig.2.3. Twee spanningsbronnen waarin geldt $U_{bron} = U_{spoel}$

Zolang de bronspanning aanwezig is tracht de spoel dezelfde spanning er tegen in te zetten. Dit vraagt om veranderend magnetisme en dus om veranderende stroom.

Het verloop van de stroom is afhankelijk van het inschakelmoment. Hieronder worden alle situaties verder toegelicht:

Situatie 1

Hier wordt een situatie toegelicht wanneer de schakelaar van figuur 2.2 op de nuldoorgang van de spanning wordt gesloten. Het verloop van deze stroom t.o.v. de spanning wordt hieronder toegelicht (zie figuur 2.4):

Op het moment dat de schakelaar op de nuldoorgang van de spanning wordt gesloten, gaat er een stroom lopen die vanaf 0 begint (zie punt 2 in fig.2.4). Op dat moment is er dus geen spanning. Er moet dus in de spoel geen spanning worden opgewekt. Dit is alleen mogelijk als het magnetische veld niet verandert. Hieraan voldoet het getekende stroombeeld (punt 2).

Wanneer de spanning op de top is, is de spanning maximaal m.a.w. de spoel moet op dit moment veel spanning opwekken (punt 3) dan vraagt de spoel om een stroom die op dit moment sterk verandert (punt 4).

Als de spanning weer nul wordt, zal de spoel weer geen spanning opwekken (punt 5), dan vraagt de spoel om een stroom die op dit moment niet verandert (punt 6).

Op het moment dat de spanning maximaal negatief is (punt 7), dan vraagt de spoel weer een stroom die op dit moment sterk verandert (punt 8).

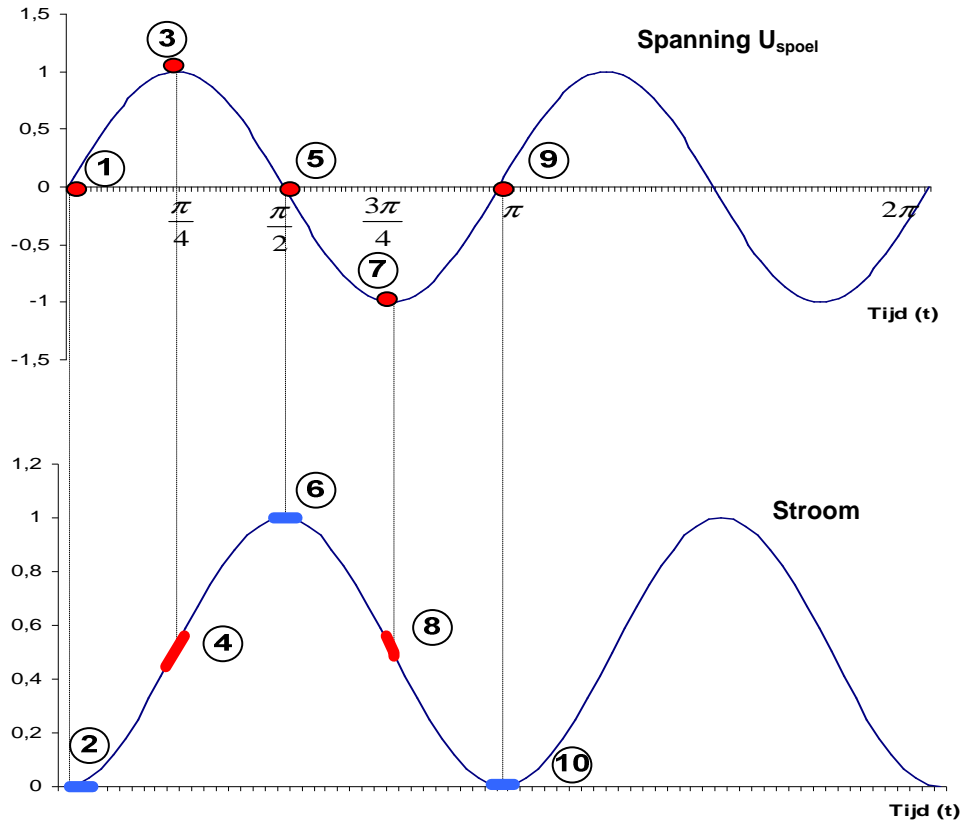


Fig.2.4. Stroombeeld van situatie1

In bovenstaand figuur (fig.2.4) is te zien dat het wisselstroombeeld sinusvormig is en 90° na-ijlt op het spanningsbeeld. Bovendien is het ook duidelijk te zien dat de stroom boven de nullijn slingert wanneer de schakelaar op de nuldoorgang van de spanning gesloten wordt. Omdat het magnetische veld in de spoel eerst moet opgebouwd worden, kan er niet instantaan een stroom gaan lopen. Mathematisch kan het gedrag van de kortsluitstroom beschrijven en ontleden in een AC en DC component. Het stroombeeld kan dus worden opgevat als de som van een gelijkstroomcomponent en wisselstroomcomponent figuur 2.5

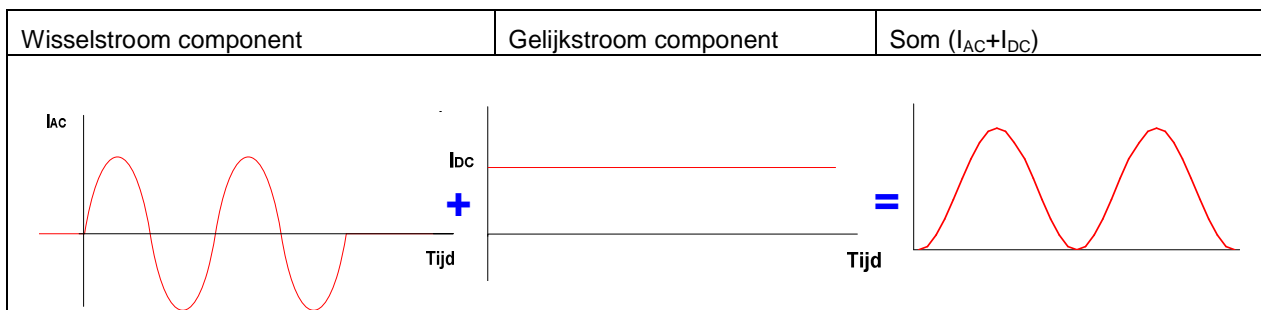


Fig.2.5. Totale kortsluitstroom = $I_{AC}+I_{DC}$

Situatie 2

Op het moment dat de schakelaar op de topwaarde van de spanning gesloten wordt (punt 1), zal er ook weer een stroom lopen die vanaf 0 begint (punt 2).

Aan de eis van het juiste veranderende magnetisme voldoet het onderstaande stroombeeld (figuur 2.6):

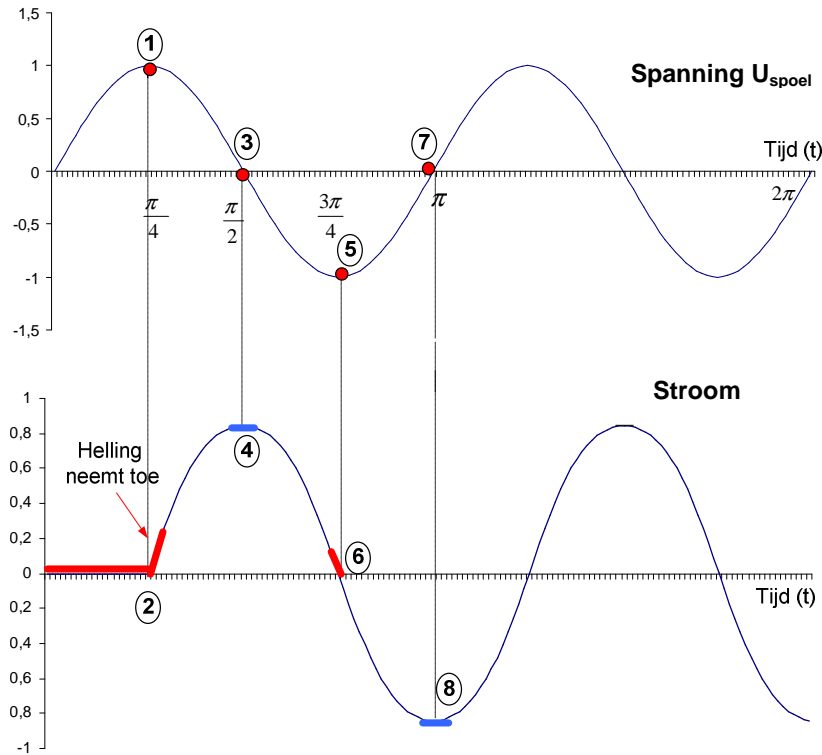


Fig.2.6. Stroombeeld van situatie 2

Op het moment van inschakelen moet de spoel veel spanning opwekken (punt 1) dan vraagt de spoel om een stroom die op dit moment sterk verandert (punt 2).

Wanneer de spanning nul wordt (punt 3), moet de spoel op dit moment geen spanning opwekken. De spoel vraagt dan om een stroom die op dat moment niet verandert (punt 4).

Op het moment dat de spanning maximaal negatief is (punt 5) moet de spoel in staat zijn om veel spanning op te wekken en dat vraagt om een stroom die op dat moment sterk verandert (punt 6). De verandering is tegengesteld in vergelijking met punt 2.

Wanneer de spanning 0V wordt (punt 7) dan vraagt de spoel een stroom die op dat moment niet verandert (punt 8) enzovoort.

Hierboven is te zien dat het verloop van de stroom zuiver sinusvormig is en er geen DC component nodig is. Er is dus geen sprake van een inschakel verschijnsel. De bronspanning gaat volgens de sinuslijn oplopen en de stroom ijlt 90° na zodanig dat de spoel de juiste spanning kan opwekken.

2.3 Het fundamentele gedrag van een RL- circuit

In figuur 2.7 is een circuit gegeven waarbij een ideale spoel met een ohmse weerstand aangesloten zijn op een sinusvormige wisselspanning.

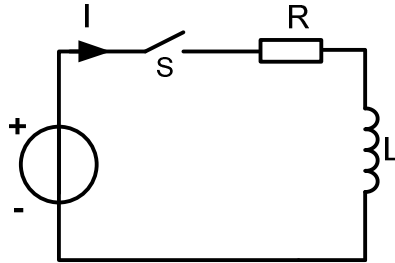


Fig.2.7. RL-circuit aangesloten op een sinusvormige spanningsbron

Hier geldt ook hetzelfde principe wanneer de schakelaar gesloten wordt namelijk: de stroom door de spoel leidt tot veranderend magnetisme en zolang het magnetisme verandert, zal er spanning opgewekt worden in de spoel. Nu geldt $U_{bron} = U_{spoel} + U_{weerstand}$

De situatie is nu ingewikkelder omdat de stroom die gaat lopen een spanningsval (spanningsverlies) veroorzaakt over de weerstand. Deze spanningsval beïnvloedt de spanning over de spoel. Alleen de wiskunde is in staat om een exact beeld te geven hoe de stroom en spanning gaan verlopen. Toch is dit ook grafisch te verklaren.

Voor de RL- circuit van fig.2.7 geldt de spanningsbetrekking:

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (2.1)$$

$$u(t) = U_{\max} \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.2)$$

Oplossing van de homogene differentiaalvergelijking:

$$i'' = K e^{-t/\tau}, \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (2.3)$$

Oplossing van de particuliere differentiaalvergelijking:

$$i' = I_{\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (2.4)$$

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R^2 + (\omega L)^2} = \frac{\sqrt{2} U_{fase}}{|Z|}, \quad \tan \varphi = \frac{\omega L}{R} = \omega \tau \quad (2.5)$$

$$i = i' + i'' = I_{\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + K e^{-t/\tau} \quad (2.6)$$

$$\text{Beginvoorwaarde: } t = 0, i = 0 \longrightarrow K = I_{\max} \sin(\alpha - \varphi) \quad (2.7)$$

$$i_k(t) = \underbrace{\frac{\sqrt{2} U_{fase}}{|Z|} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)}_{AC} + \underbrace{\frac{\sqrt{2} U_{fase}}{|Z|} \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{Rt}{L}}}_{DC} \quad (2.8)$$

De totale oplossing:

$$i_k(t) = I_{\max} \left(\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{Rt}{L}} \right) \quad (2.9)$$

Waarin:

- $\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$
- $\alpha =$ het moment van inschakelen

Het is duidelijk te zien dat de optredende stroom kan worden opgebouwd uit:

- Een wisselstroomcomponent.
- Een gelijkstroomcomponent.

In formule 7 is te zien dat de beginwaarde van de gelijkstroomcomponent afhankelijk is van het tijdstip van de sluiting en van de verhouding tussen de ohmse en de inductieve weerstand van het kortgesloten circuit (R/X verhouding).

Om het gedrag van de kortsluitstroom bij verschillende situaties te laten zien, is er een Excel simulatie ontwikkeld die gebruik maakt van bovenstaande formules.

Hieronder zullen een aantal voorbeelden kort behandeld worden waarin men kan uitgaan van een constante stroom. De R/X verhouding van het inschakelmoment zal telkens veranderd worden.

Situatie 1: (Inschakelmoment = 0° en R/X= 0,1)

Figuur 2.8 toont een circuit waarbij een ideale spoel van 10[Ω] met een ohmse weerstand van 1[Ω] aangesloten zijn op een sinusvormige wisselspanning.

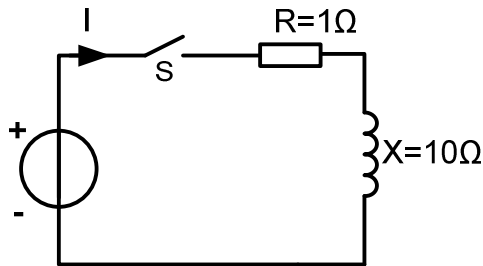


Fig.2.8. RL-circuit bestaande uit R=1Ω en X=10Ω

Hierboven is te zien dat X_L veel groter is dan R. De R/X verhouding is gelijk aan: $\frac{R}{X} = \frac{1}{10} = 0,1$

Indien de schakelaar op de nuldoorgang van de spanning gesloten wordt, gaat er een stroom lopen. Deze stroom bestaat uit: I_{AC} en I_{DC} . (figuur 2.9)

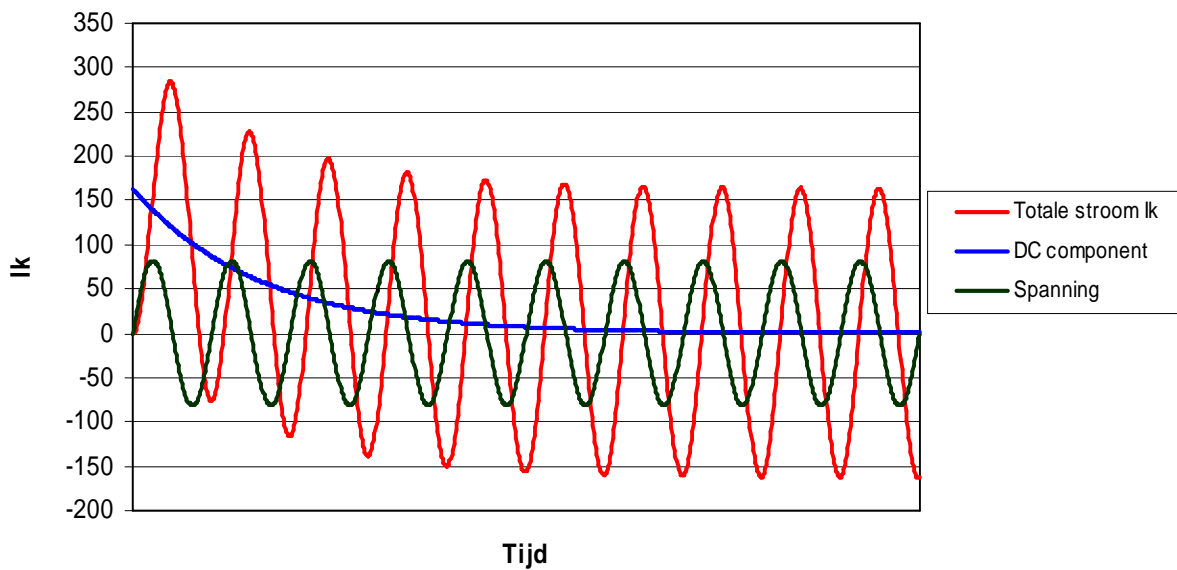


Fig.2.9. Het verloop van de totale stroom ($I_{ac}+I_{dc}$)

Situatie 2: (Inschakelmoment = 0° en $R/X= 0,4$)

In onderstaande figuur is te zien wat er gebeurt als R in verhouding tot X groter wordt. Het totale verloop van de stroom wordt hieronder weergegeven (figuur 2.10)

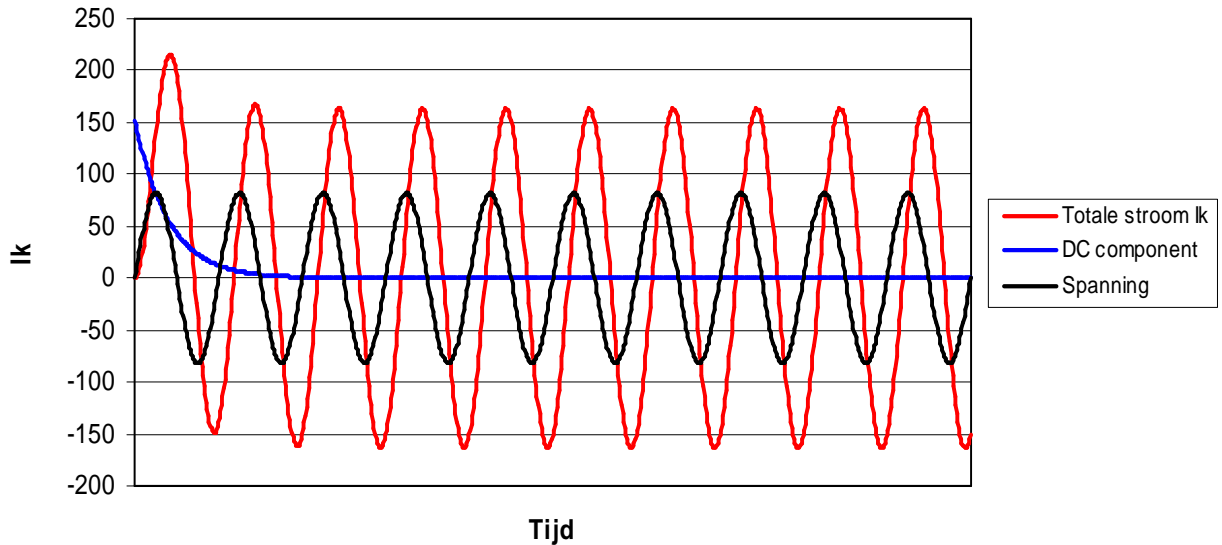


Fig.2.10. Het verloop van de totale stroom bij grotere ohmse weerstand

Het is duidelijk te zien dat de gelijkstroomcomponent sneller met de e-macht afneemt en tot een lagere piekstroom leidt.

Situatie 3: (Inschakelmoment = 90° en $R/X= 0,1$)

Op het moment dat de schakelaar op de topwaarde van de spanning gesloten wordt, zal er een stroom lopen. Het verloop van de totale stroom ziet er als volgt uit (figuur 2.11):

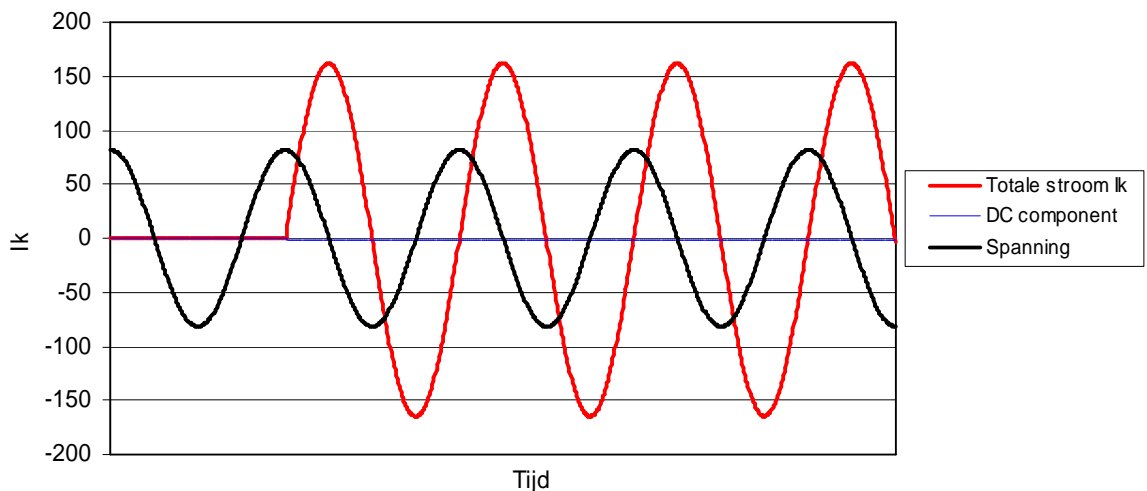


Fig.2.11. Totale stroom bij het inschakelen op de top waarde van de spanning

Hierboven is te zien dat het verloop van de stroom zuiver sinusvormig is en er geen DC component nodig is. Er is dus geen sprake van een inschakel verschijnsel.

Conclusie:

De kortsluitstroom kan worden opgebouwd uit:

- Een wisselstroomcomponent.
- Een gelijkstroomcomponent.

Bij een zuiver inductief kortsluitcircuit zal de sinus van de stroom zich boven de nullijn bevinden, wanneer de schakelaar op de nuldoorgang van de spanning wordt gesloten (het meest ongunstige moment). Dat komt omdat de gelijkstroomcomponent maximaal is.

Zit er een weerstand in het circuit dan zal de sinus van de stroom zich in eerste instantie boven de nullijn plaatsen maar in de loop van de tijd zakt de sinus langzaam naar beneden en slingert omlaag rond de nullijn. Dat komt omdat de gelijkstroomcomponent niet constant blijft maar exponentieel (met de e-macht) afloopt.

Aangetoond kan worden, dat op het moment van de sluiting:

- Geen gelijkstroomcomponent aanwezig is, indien de sluiting op de topwaarde van de spanning ($\alpha = 90^\circ$ of $\alpha = \varphi$) optreedt.
- De gelijkstroomcomponent een maximale waarde heeft voor het betrokken circuit, indien de sluiting op de nuldoorgang van de spanning ($\alpha = 0^\circ$) optreedt.

In de praktijk komt een zuiver inductieve belasting niet vaak voor want er is altijd een ohmse weerstand in het circuit (de ohmse weerstand van geleiders). De ohmse weerstand zorgt in feite voor de demping van het overgangsverschijnsel in de tijd.

2.4 Invloed van de plaats van de kortsluiting

In hoofdstuk 2.3 hebben we gezien dat de eerste topwaarde van de stroom na inschakelen groter kan zijn dan de topwaarde van de stationaire stroom die na het overgangsverschijnsel optreedt omdat de gelijkstroomcomponent erbij komt. De plaats van de kortsluiting heeft een belangrijke invloed op de overgangsverschijnselen van de kortsluitstroom. Hier wordt onderscheid gemaakt tussen kortsluitingen in sterke en zwakke netten.

2.4.1 Kortsluiting in sterke netten

Sterke netten zijn netten die vanuit de openbare voeding worden gevoed. Hierin kan men uitgaan van een constante spanning. Bij sluitingen ver verwijderd van generatoren spreekt men over een kortsluiting in sterke netten want de bijdrage van generatoren en motoren aan de beginkortsluitstroom wordt niet in rekening gebracht. In de praktijk komen kortsluitingen ver verwijderd van generatoren heel vaak voor. Deze situatie is in hoofdstuk 2.3 al behandeld met behulp van een aantal voorbeelden. Figuur 2.12 toont het algemene verloop van de kortsluitstroom in sterke netten.

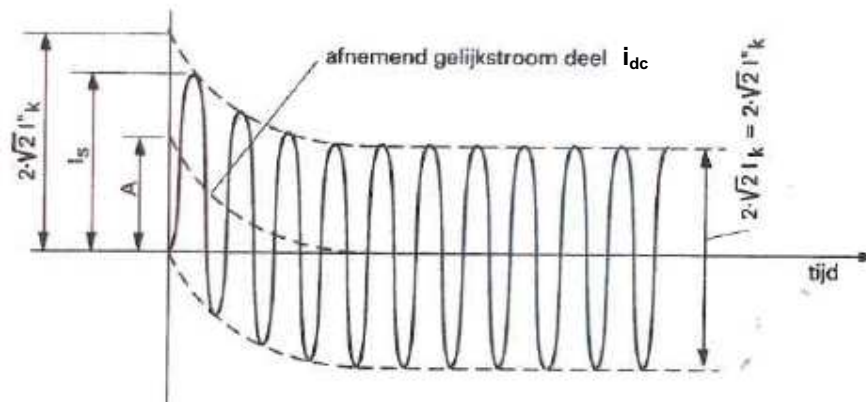


Fig.2.12. Momenteel verloop van de kortsluitstroom in een sterk net

- I''_k : beginkortsluitstroom
- I_s : stootkortsluitstroom ofwel piek-kortsluitstroom (i_p)
- i_{dc} : gelijkstroomcomponent van de kortsluitstroom.
- A : beginwaarde van de gelijkstroomcomponent (i_{dc})
- I_k : stationaire kortsluitstroom (steady-state kortsluitstroom) en in dit geval geldt $I''_k = I_k$

2.4.2 Kortsluiting in zwakke netten

Zwakke netten zijn netten die door eigenbedrijfs-generatoren worden gevoed die niet gekoppeld zijn met het openbare net.

Wanneer de plaats van de kortsluitstroom dicht bij de generator is, spreekt men over een kortsluiting in zwakke netten. In dit geval wordt de bijdrage van generatoren aan de beginkortsluitstroom wel in rekening gebracht.

Het vervangingschema van de generator omvat een spanningsbron E en een inwendige reactantie X_d . Op basis van de kortsluitproef en nullastproef kan de grootte van de inwendige reactantie X_d worden bepaald. Bij kortsluiting dicht bij de generator mag deze waarde niet gebruikt worden. De plotselinge toename van de statorstroom zorgt voor een grotere verandering van het statorveld waardoor in de rotor tijdelijke spanningen worden geïnduceerd. Dit gebeurt in de bekrachtigingswikkeling, in de demperwikkeling en in de massieve rotor die ook een geleider vormt. Dit heeft tot gevolg dat gedurende enige tijd de statorstroom groter is dan op basis van X_d kan worden verklaard.

Men verdisconteert dit door de waarde X_d direct na de kortsluiting te corrigeren. De verschillende reactanties zijn:

1. De reactantie van de dempingewikkeling van de rotor X''_d .
2. De reactantie van de bekrachtigingswikkeling van de rotor X'_d .
3. De synchrone reactantie van de generator X_d .

In onderstaande figuur wordt het algemene verloop van de kortsluitstroom in zwakke netten weergegeven:

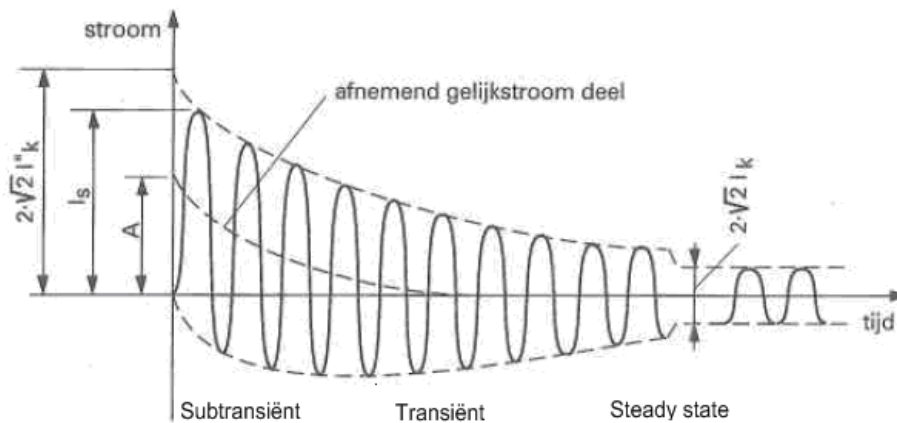


Fig.2.13. Momenteel verloop van de kortsluitstroom in een "zwak" net

Waarin:

- I''_k : beginkortsluitstroom
- I_s : stootkortsluitstroom ofwel piek-kortsluitstroom (i_p)
- i_{dc} : gelijkstroomcomponent van de kortsluitstroom.
- A : beginwaarde van de gelijkstroomcomponent (i_{dc})
- I_k : stationaire kortsluitstroom (steady-state kortsluitstroom)

In fig. 2.13 is te zien dat stationaire kortsluitstroom (steady-state kortsluitstroom) van een generator relatief klein is. De oorzaak hiervan is de grote synchrone reactantie X_d van de statorspoel.

De verhouding tussen de drie verschillende reactanties en kortsluitstromen wordt in figuur 2.14 weergegeven:

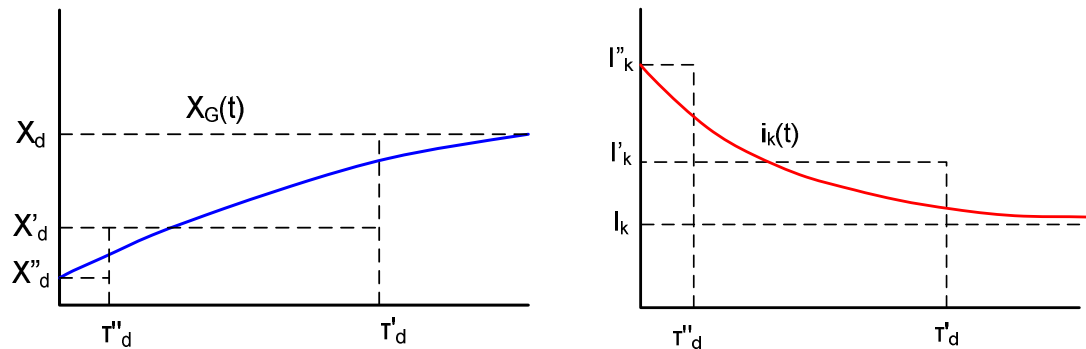


Fig.2.14. Generator reactanties (links) en de bijbehorende stromen in de loop van de tijd (rechts)

Waarin:

$X_G(t)$: totale reactantie.

$i_k(t)$: totale kortsluitstroom.

T'_d : transiënte tijdconstante

T''_d : subtransiënte tijdconstante

De demperwikkeling heeft de kleinste reactantie en reageert dus het snelst. Deze reactantie bepaalt de grootte van de sub-transiënte kortsluitstroom I''_k . De sub-transiënte kortsluitstroom komt alleen voor bij synchrone generator. De transiënte kortsluitstroom I'_k wordt veroorzaakt door de reactantie X'_d . De stationaire kortsluitstroom I_k (steady state) wordt veroorzaakt door de synchrone reactantie van de stator X_d . Bij kortsluitingen die relatief ver van een generator optreden is er geen verschil tussen sub-transiënte, transiënte en stationaire kortsluitstroom[6].

Het belang van diverse transiënte waarde van de kortsluitstroom in de praktijk:

- De sub-transiënte kortsluitstroom I''_k

Deze waarde is bepalend voor de stootkortsluitstroom en die is weer maatgevend voor mechanische sterkte van onder andere kabels en van de rails in verdeelinrichtingen.

- De transiënte kortsluitstroom I'_k :

Deze waarde is bepalend voor het uitschakelvermogen van de schakelaars die de kortsluitstroom moeten onderbreken.

- De stationaire kortsluitstroom I_k :

Deze waarde is bepalend voor de thermische belasting van alle onderdelen, onder andere kabels en leidingen.

3 Driefasensysteem

3.1 Symmetrisch belast

In hoofdstuk 2 is het fundamentele gedrag van de kortsluitstroom toegelicht aan de hand van een éénfasig systeem. In werkelijkheid wordt met 3-fasen symmetrische stelsel gewerkt. Het gebruik van driefasensysteem heeft voordelen voor het opwekken en distribueren van elektrische energie. Dit stelsel kan voorgesteld worden als een samenstelling van 3 bronnen met gelijk amplitude die onderling 120° van elkaar verschoven zijn. Alle verbruikers kunnen weergegeven worden door 3 gelijke belastingen (figuur 3.1).

Indien het stelsel symmetrisch is, zijn de stromen en de spanningen in drie fasen gelijk.

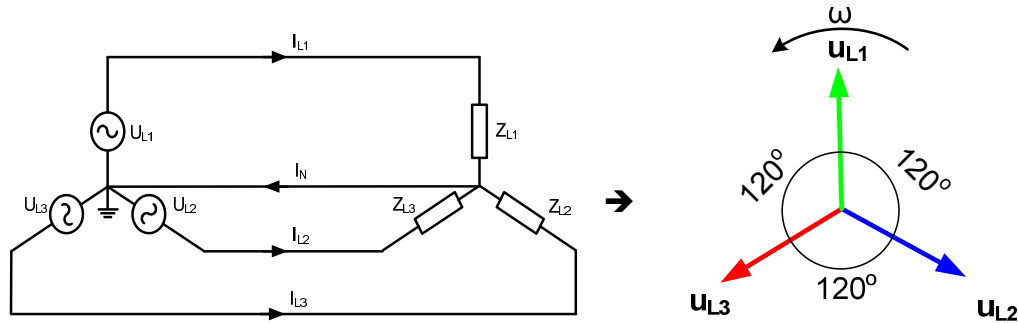


Fig.3.1. Driefasen symmetrisch stelsel (links) en de vectoriële voorstelling daarvan (rechts)

Hier geldt het volgende:

Voor de spanningen:

$$\begin{aligned} U_{L1} &= |U_{L1}| \angle 0^\circ \\ U_{L2} &= |U_{L1}| \angle 120^\circ \\ U_{L3} &= |U_{L1}| \angle -120^\circ \end{aligned} \quad |U_{L1}| = |U_{L2}| = |U_{L3}| \quad (3.1)$$

$$\text{Voor de impedanties: } Z_{L1} = Z_{L2} = Z_{L3} \quad (3.2)$$

Voor de stromen: $I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = I_N = 0$ (geen stroom zal door de nulgeleider lopen)

Bij een driefasensysteem is het mogelijk om hetzelfde vermogen over 3 of 4 kabels te transporten waar bij 3 spanningsbronnen waarvan de fasehoek gelijk is er 6 kabels nodig zijn (fig.3.2).

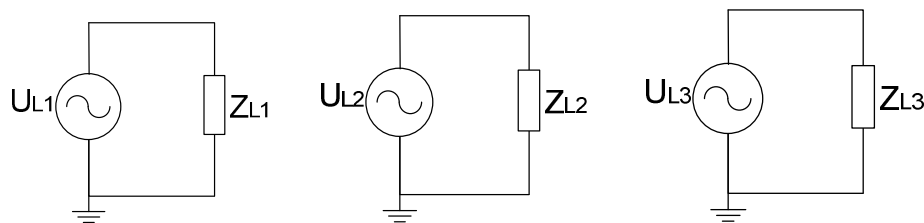


Fig.3.2. Drie 1 fase systemen.

Een symmetrische 3-fasen sluiting is een voorbeeld van een sluiting in een symmetrisch stelsel. Voor de berekeningen van de kortsluitstroom wordt uitgegaan van een symmetrische 3-fasen sluiting (figuur 3.3). Deze levert namelijk de hoogste waarde op. Wordt de installatie voor die waarde ontworpen, dan is hij bestand tegen alle voorkomende sluitingen.

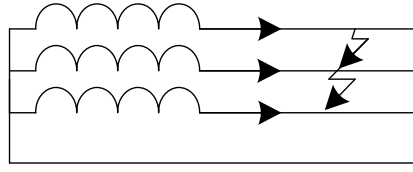


Fig.3.3. Driefasen sluiting

Bij een 3-fasen sluiting kan een 1-fasige vervangingschema worden opgesteld (figuur 3.4). De stroom en spanning van de andere twee fasen zijn gelijk. Het uitgaan van symmetrische stelsels vereenvoudigt de kortsluitberekeningen.

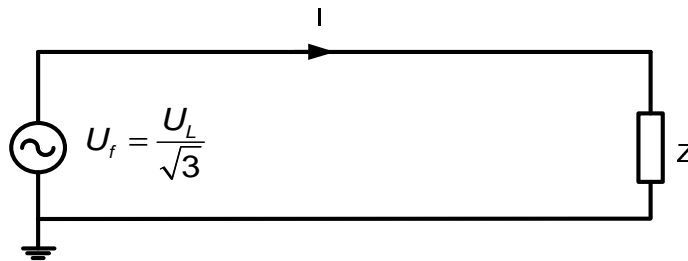


Fig.3.4. Éénfasig vervangingschema

3.2 Asymmetrisch belast

In de praktijk spreekt men over een asymmetrisch 3-fasen stelsel wanneer de fasespanningen en de belasting per fase niet gelijk zijn of de onderlinge fasehoeken afwijken van 120° .

Als gevolg daarvan zal de som van alle stromen niet gelijk zijn aan 0. In een laagspanningcircuit met een nulgeleider zal er een stroom lopen door de nulgeleider (figuur 3.5).

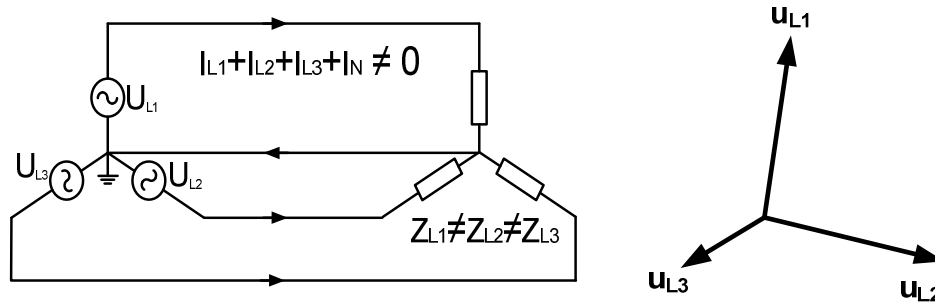


Fig.3.5. Asymmetrisch stelsel (links) en de vectoriële voorstelling daarvan (rechts)

Bij het berekenen van een 3-fasen symmetrische kortsluiting kan een éénfasig vervangingschema opgesteld worden want de fasespanningen en belastingen per fase zijn gelijk.

Het berekenen van de asymmetrische kortsluitstroom is lastiger want het is niet mogelijk om een éénfasig vervangingschema op te stellen voor het hele stelsel omdat de fasespanningen en belastingen verschillend zijn.

Er is een methode bedacht waarmee berekeningen in asymmetrisch belaste driefasenetten aanmerkelijk vereenvoudigd worden.

In principe komt deze methode erop neer dat de niet symmetrische componenten in het netwerk worden ontbonden in drie wiskundig onafhankelijke (niet gekoppelde) symmetrische systemen.

De drie afzonderlijke stelsels heten: Mee-stelsel (normaal system), Tegen-stelsel (invers system) en Homopolair systeem.

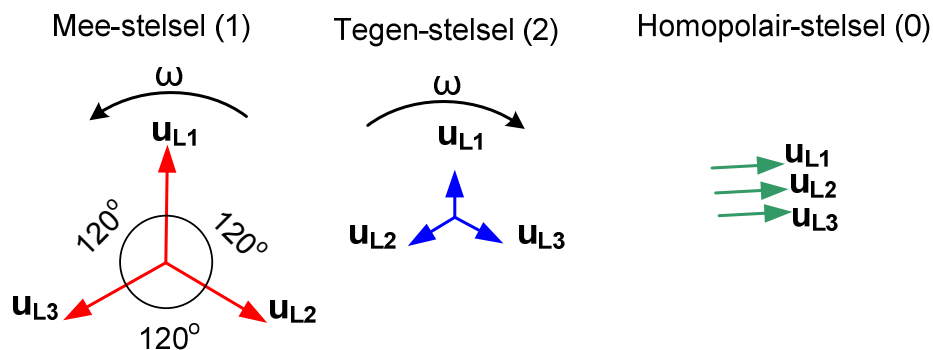


Fig.3.6. Drie afzonderlijke stelsels

- Het normale systeem heeft dezelfde draairichting als het oorspronkelijke stelsel en bestaat uit 3 spanningen van gelijke grootte en onderlinge faseverschuiving van 120° .
- Het inverse systeem heeft een tegengestelde draairichting en bestaat uit 3 spanningen van gelijke grootte en een onderlinge faseverschuiving van 120° .
- Het homopolaire systeem bestaat uit 3 spanningen van gelijke grootte en een onderlinge faseverschuiving van 0 graden.

Berekeningen kunnen met deze ongekoppelde stelsels enkelfasig worden uitgevoerd.

Het probleem is dan vereenvoudigd tot het rekenen aan drie ongekoppelde netwerken. De som van deze drie afzonderlijke stelsels leidt weer tot het oorspronkelijke asymmetrische stelsel (figuur 3.7).

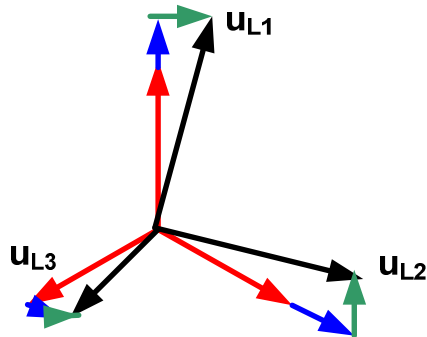


Fig.3.7. De som van deze drie stelsels leidt weer tot het oorspronkelijke asymmetrische stelsel

Deze methode noemt men de symmetrische componenten methode. Het grote voordeel van de symmetrische componenten methode is dat men op eenvoudige wijze inzicht in het gedrag van het systeem onder niet –symmetrische condities krijgt. Men gebruikt deze methode in alle gevallen waarbij geen sprake is van symmetrische componenten.

In de praktijk kunnen naast de driefase symmetrische kortsluiting nog andere niet-symmetrische kortsluitingen optreden bijvoorbeeld (figuur 3.8):

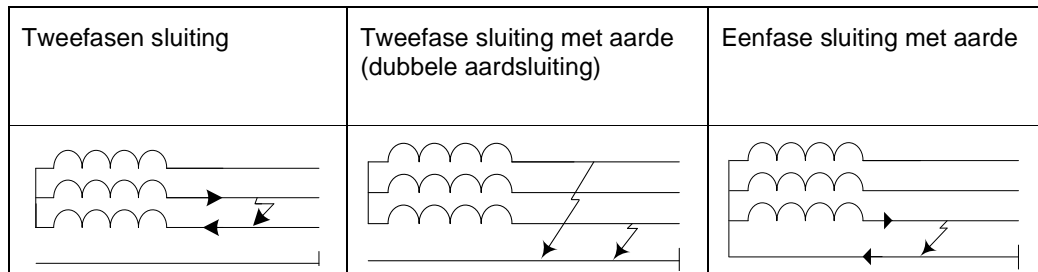


Fig.3.8. Asymmetrische kortsluitingen

Voor de berekening van de kortsluitstroom gaan we voorlopig uit van een 3-fasen sluiting want deze levert in de meeste gevallen de hoogste waarde op.

4 Berekeningsmethodieken

In hoofdstuk 2 is het gedrag van de kortsluitcircuit bestaande uit één spanningsniveau en één impedantie behandeld m.b.v. een aantal voorbeelden. In hoofdstuk 3 is vastgesteld dat bij een 3-fasen symmetrisch stelsel alle impedanties gelijk zijn. De symmetrische kortsluitstroom kan dus als volgt berekend worden:

$$I_k = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R^2 + X^2}} \quad (4.1)$$

In de praktijk komt veelvuldig voor dat men in een netwerk met zeer veel spanningsbronnen en componenten (zoals generatoren, motoren, verbruikende toestellen en transformatoren) slechts de symmetrische kortsluitstroom wil weten. Het is nu duidelijk dat men behoefte heeft aan andere methodieken om de kortsluitstroom te bepalen in grote netten.

In dit hoofdstuk worden drie rekenmethoden kort behandeld m.b.v. een aantal voorbeelden om het verschil tussen de drie methoden te verduidelijken.

4.1 Kortsluitberekeningen volgens het theorema van Thévenin

Het theorema van Thévenin geeft ons een eenvoudige methodiek om de kortsluitstroom te berekenen door een vervangingsschema op te stellen dat bestaat uit een equivalente spanningsbron met een vervangingsimpedantie in serie (figuur 4.1)

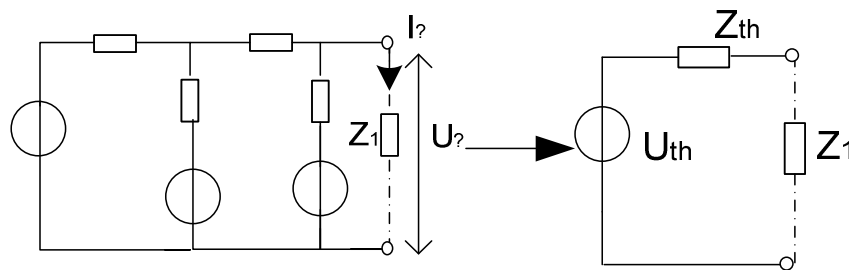


Fig.4.1. Thévenin vervangingsschema

Het theorema van Thevenin luidt als volgt:

4. Bepaal de openspanning op de plaats van de component waarvan de stroom en spanning moeten worden berekend.
5. Bepaal de inwendige impedantie als alle spanningsbronnen zijn kortgesloten.

Indien de openspanning en de inwendige impedantie zijn bepaald, kan de kortsluitstroom als

volgt berekend worden: $\frac{U_{th}}{Z_{th}}$

Het onderstaande voorbeeld geeft een duidelijke toelichting op het theorema van Thévenin:

Uitgewerkt voorbeeld 1

Tussen knooppunt 2 en 0 ontstaat een kortsluiting. Om de kortsluitstroom te kunnen bepalen moet eerst de openspanning tussen knooppunt 2 en 0 bepaald worden (figuur 4.2).

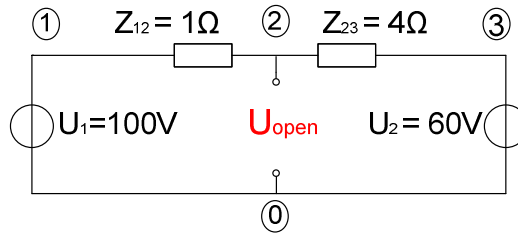


Fig.4.2. Kortsluiting treedt op tussen knooppunt 2 en 0

In dit circuit zijn er twee spanningsbronnen aangesloten. Eerst moet de totale stroombijdrage van beide spanningsbronnen bepaald worden:

De totale stroom bedraagt:

$$\frac{U_1 - U_2}{Z_{tot}} = \frac{100 - 60}{5} = 8[A]$$

De openspanning wordt dus:

$$\begin{aligned} U_{open} &= U_1 - I \cdot Z_{12} \\ &= 100V - 8 \cdot 1 = 92[V] \end{aligned}$$

Om de inwendige impedantie gezien vanuit de foutplaats te bepalen, worden de spanningsbronnen kortgesloten (figuur 4.3).

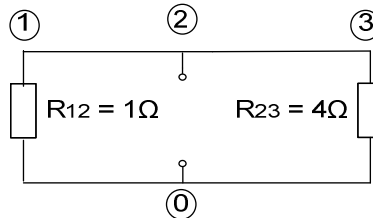


Fig.4.3. Spanningsbronnen zijn kortgesloten

De inwendige impedantie wordt dus:

$$Z_{th} = 1\Omega // 4\Omega = \frac{1 \cdot 4}{1 + 4} = \frac{4}{5} = 0,8 [\Omega]$$

Met behulp van de spanning op de foutplaats en de impedantie gezien vanuit de foutplaats kan het Thevenin vervangingschema worden opgesteld en de kortsluitstroom berekend (figuur 4.4).

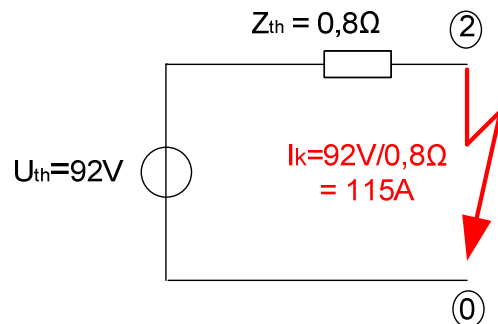


Fig.4.4. Het vervangingschema van Thevenin

Uitgewerkt voorbeeld 2

Bij uitgebreidere netwerken met meerdere spanningsbronnen is het noodzakelijk om eerst de stroombijdrage van elke spanningsbron apart te bepalen. Dit wordt superpositie beginsel genoemd.

Het superpositiebeginsel stelt dat het resultaat van twee onafhankelijke verschijnselen die tegelijk optreden gelijk is aan de som van de resultaten van elk verschijnsel afzonderlijk.

Dit voorbeeld laat duidelijk zien hoe de openspanning van Thévenin met superpositie beginsel berekend kan worden:

Eerst wordt de 60V spanningsbron kortgesloten en dan wordt de stroom bepaald (figuur 4.5).

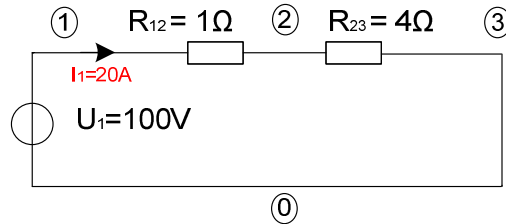


Fig.4.5. Spanningsbron 60V is kortgesloten

$$I_1 = \frac{U_1}{R_{12} + R_{23}} = \frac{100}{1 + 4} = 20[\text{A}]$$

Daarna wordt de 100V spanningsbron kortgesloten en dan wordt de stroom bepaald (figuur 4.6).

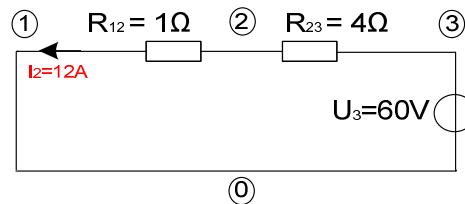


Fig.4.6. Spanningsbron 100V is kortgesloten

$$I_3 = \frac{U_3}{R_{12} + R_{23}} = \frac{60}{1 + 4} = 12[\text{A}]$$

Vanaf spanningsbron U_1 loopt dus een stroom van $I = 20 - 12 = 8\text{A}$ naar spanningsbron U_2 . Nu kan de spanning over de weerstand R_{12} als volgt bepaald worden:

$$U_{12} = I \times R_{12} = 8 \times 1 = 8[\text{V}]$$

De schakeling vanuit punt 1, 2 en 0 vormt een gesloten schakeling dus er geldt de volgende regel (figuur 4.7):

$$U_1 = U_{12} + U_{\text{th}}$$

$$\Rightarrow U_{\text{th}} = U_1 - U_{12} = 100 - 8 = 92 [\text{V}]$$

De openspanning is nu bepaald.

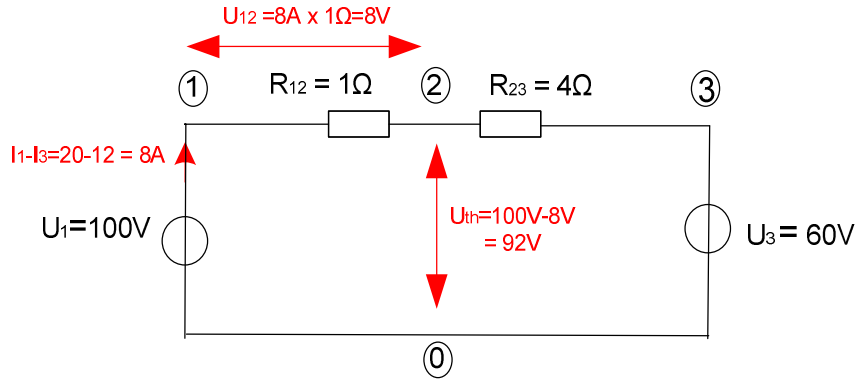


Fig.4.7. Openspanning U_{th}

De totale inwendige impedantie bedraagt: $0,8[\Omega]$ (voorbeeld 1)

Met behulp van de spanning op de foutplaats en de impedantie gezien vanuit de foutplaats kan het Thevenin vervangingschema worden opgesteld en de kortsluitstroom berekend (figuur 4.8).

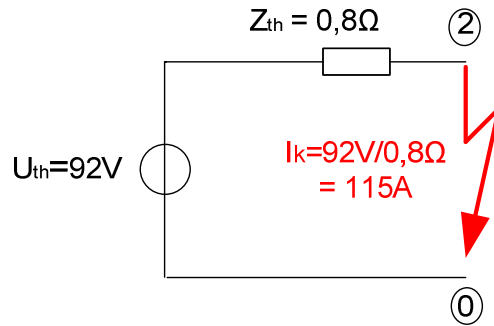


Fig.4.8. Het vervangingschema van Thévenin

4.2 Kortsluitberekeningen volgens de IEC60909

In paragraaf 4.1 is te zien dat de kortsluitstroom het beste met Thévenin en superpositie berekend kan worden. Bij Thévenin volgt de openspanning uit een berekening gebaseerd op de aanwezige bronspanningen. Daarna wordt de inwendige impedantie (Z_{th}) uitgerekend.

In de praktijk is het niet altijd even eenvoudig om een compleet elektriciteitsnet naar één impedantie om te rekenen. Dat komt omdat de impedantie waarde niet rechtstreeks in Ohm wordt gegeven. Bijvoorbeeld van een transformator zijn nominale spanningen, de kortsluitspanning in % en de koper verliezen bekend. Uit deze gegevens worden de impedanties berekend.

In de praktijk zijn de nullast spanningen (U_{open}) van de afzonderlijke bronnen ook niet altijd bekend. Het zal duidelijk zijn dat er een behoefte is aan een nieuwe methode om kortsluitberekeningen in de praktijk te kunnen uitvoeren. Om een eenduidige wijze van berekenen te krijgen is er een norm vastgesteld namelijk IEC909.

De IEC909 is een internationale norm op het gebied van elektrotechniek en geeft ons een methodiek om in de normale omstandigheden aanwezige klemspanning te kunnen gebruiken in plaats van de openspanning die Thévenin voorschrijft.

De IEC909 stelt nu dat gebruik gemaakt mag worden van de normaal geldende klemspanning bij de normale belasting op de plaats waar de sluiting op treedt. De nominale klemspanning wordt meestal wel gegeven bij het modelleren van netwerken (figuur 4.9).

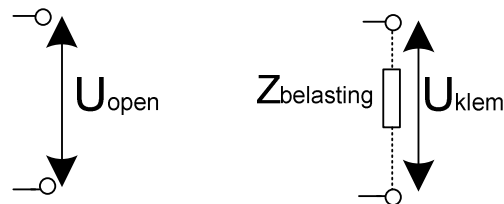


Fig.4.9. Het verschil tussen U_{open} en U_{klem}

In paragraaf 4.1 is de werkelijke kortsluitstroom op basis van de openspanning berekend namelijk: $I_k = 92/0,8 = 115[A]$.

Het onderstaande voorbeeld laat zien hoe de kortsluitstroom tussen punt 1 en 2 kan berekend worden aan de hand van de klemspanning. In voorbeeld 3 zal de klemspanning bepaald worden bij een veronderstelde belasting van $22,2 [\Omega]$.

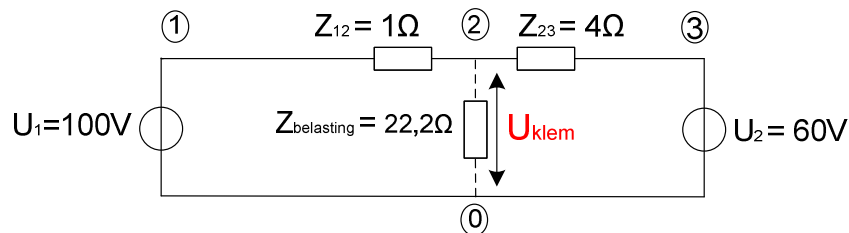


Fig.4.10 Klemspanning over $Z_{belasting}$

Voorbeeld 3

De waarden van U_{th} en Z_{th} zijn al bepaald in voorbeeld 1. Het vervangingschema kan als volgt opgesteld worden (Figuur 4.11):

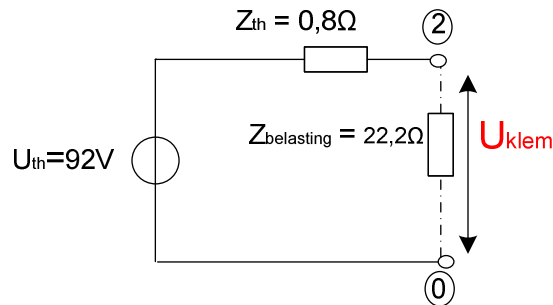


Fig.4.11. Vervangingschema van figuur 4.10

Tussen knooppunt 2 en 0 ontstaat een kortsluiting. De nominale stroom die door het circuit gaat lopen bedraagt:

$$I = \frac{92}{0,8 + 22,2} = 4 [A]$$

De klemspanning kan als volgt berekend worden:

$$U_{klem} = U_{th} - I \cdot Z_{th} = 92 - 4 \cdot 0,8 = 88,8 [V]$$

De kortsluitstroom is nu als volgt te berekenen (figuur 4.12):

$$I_k = \frac{88,8}{0,8} = 111 [A]$$

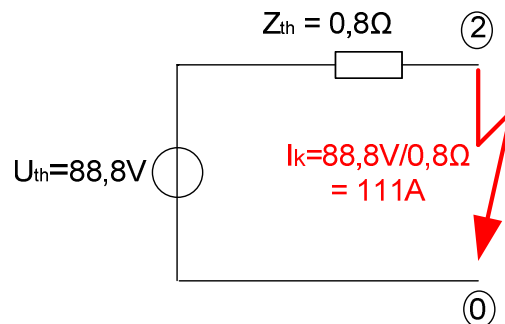


Fig.4.12. Kortsluitstroom op basis van de klemspanning

Het is duidelijk te zien dat de berekende kortsluitstroom op basis van de klemspanning 111 [A] lager is dan de werkelijke kortsluitstroom 115 [A] die op basis van de openspanning is berekend.

De conclusie is dat het gebruik van de klemspanning i.p.v. de openspanning tot een lagere kortsluitstroom zou leiden.

Het gebruik van de klemspanning op de foutplaats is erg praktisch maar het mag niet zo zijn dat door het vereenvoudigen van de berekening een net te krap gedimensioneerd gaat worden.

Om de berekening hanteerbaar te houden, introduceert de IEC909 een spanningscorrectiefactor om in de normale omstandigheden aanwezige klemspanning te kunnen gebruiken om de werkelijke kortsluitstroom te kunnen bepalen.

4.2.1 Spanningscorrectiefactor c

Om in de normale omstandigheden aanwezige klemspanning te kunnen gebruiken, introduceert de IEC909 een spanningscorrectiefactor c. Met deze factor wordt de kortsluitberekening uitgevoerd met een hogere spanning en is de uitkomst een betere benadering van de werkelijke kortsluitstroom.

Hiervoor geldt onderstaande tabel:

Nominale spanning U_n	c_{max}	c_{min}
100 – 1000V	1,05 * 1,10 **	0,95
>1kV– 35kV	1,10	1,00
> 35kV	1,10	1,00

* Voor systemen met een tolerantie van 6% bijvoorbeeld voor distributietransformatoren die met 380V i.p.v. 400V gevoed worden, dan wordt de factor verlaagd tot 1,05.

Het toepassen van 1,05 of 1,10 in de laagspanning. In de laagspanningsnetten zijn aan het einde van de 20e eeuw de spanningen verhoogd van 380V naar 400V. Men heeft dit gedaan door de distributie transformatoren in een hoger spanningstrap te plaatsen. Vanwege het regelbereik kunnen deze spanningen in de praktijk aan de lage kant zijn Met 1,1 zou door een kortsluitstroom berekend worden die in de praktijk niet haalbaar is[4].

** Voor systemen met een tolerantie van 10%.

Tabel.1 IEC909 tabel voor factor c

De spanningsfactoren c_{max} en c_{min} worden gebruikt om de maximaal en de minimale kortsluitstroom te berekenen.

Bij het ontwerpen van elektrische installaties is het in alle gevallen nodige op diverse plaatsen de kortsluitstroom te kennen. In de eerste plaats moet de maximale kortsluitstroom bekend zijn in verband met de dynamische belasting en het kortsluitvermogen van schakelaars.

Ten tweede moet ook de minimale kortsluitstroom bekend zijn in verband met de doorsnede van de kabels en het instellen van de beveiligingen.

De symmetrische kortsluitstroom kan als volgt berekend worden:

$$I_k = \frac{c \cdot U_{\text{klemspanning}}}{\sqrt{3} \cdot |Z|} \quad (4.2)$$

De IEC909 is opgevolgd door de IEC60909. In deze norm zijn er extra correctiefactoren toegevoegd om de berekeningen nauwkeuriger te maken. De IEC60909 introduceert nieuwe correctiefactoren namelijk: impedantie correctiefactoren. Het principe van deze factoren wordt in de onderstaande paragraaf verduidelijkt.

4.2.2 Impedantie correctiefactoren

Figuur 4.13 toont een circuit met verschillende spanningsbronnen namelijk: U_1 , U_2 , U_3 en U_4 . Tussen punt 1 en 2 ontstaat een kortsluiting. Bij een kortsluiting leveren al deze bronnen een bijdrage aan de kortsluitstroom.

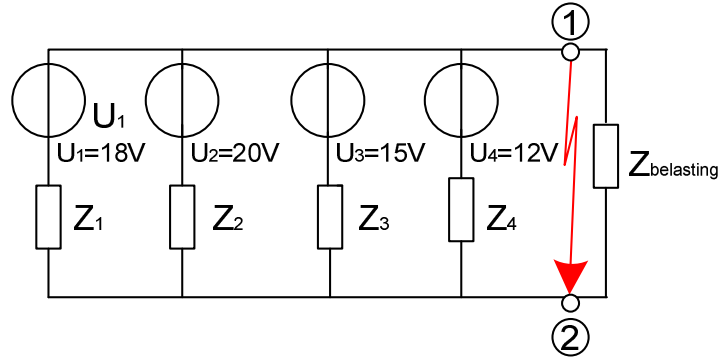


Fig.4.13. Elektrisch circuit met vier spanningsbronnen

In dit schema komen meerdere spanningsbronnen op meerdere niveaus voor. Dit schema kan sterk vereenvoudigd worden door alle spanningen te reduceren tot het spanningsniveau waarop de kortsluiting berekend moet worden. De IEC909 geeft een correctiefactor c om in de normale omstandigheden aanwezige klemspanning te kunnen gebruiken. Het is gebruikelijk in het vervangingschema de spanningsbron rechts van de impedanties te tekenen (figuur 4.14).

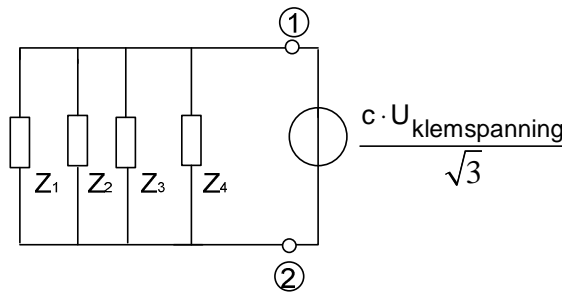


Fig.4.14. Spanningsbronnen zijn vervangen door de gecorrigeerde klemspanning

Hoewel in dit voorbeeld met verschillende spanningsniveaus wordt gewerkt, worden de componenten gereduceerd naar één spanningsniveau en wordt daarbij aangenomen dat alle bronnen dezelfde spanning krijgen namelijk de klemspanning (U_4).

Hiermee introduceren we een andere fout omdat deze spanningsbronnen U_1 t/m U_4 een hogere waarde hebben. Hoewel het toepassen van de c factor een beter benadering van de werkelijke kortsluitstroom geeft, blijft deze berekening toch niet nauwkeurig genoeg om de werkelijke kortsluitstroom te bepalen. De bijdrage van de afzonderlijke bronnen zijn hoger omdat de interne spanning van deze bronnen een hogere waarde heeft dan $1,1 \cdot U_4$. Het uitgangspunt van de IEC60909 is dat alleen rekenen met de factor c tot een te lage bijdrage in de totale kortsluitstroom zou leiden. Daarom introduceert de IEC60909 impedantie correctiefactoren die de inwendige impedantie van de componenten een lagere waarde geven. De stelregel is dat naarmate de inwendige impedantie van de bron lager wordt, de bronspanning ook lager zal worden. Daarom wordt de inwendige impedantie per spanningsbron gecorrigeerd waarmee de inwendige impedantie van elke bron verlaagd wordt, zodat de totale bijdrage van deze bronnen in de kortsluitstroom groter wordt.

De impedantie correctiefactoren worden in hoofdstuk 5 uitgebreid behandeld.

4.2.3 Het principe van het modelleren van componenten

Voor de berekeningen van de kortsluitstroom is het van belang dat de impedanties van de componenten bekend zijn. Op basis van de formules $S = U \cdot I$ en $U = I \cdot Z$ zijn de volgende basis formules af te leiden voor netimpedantie, transformator impedantie en het reduceren van impedantie naar ander spanningsniveau:

Netvoeding:

Van een 3-fasenet zijn de volgende waarden bekend: kortsluitvermogen (S_k) en de nominale lijnspanning (U_L).

De impedantie van netvoeding is als volgt te bepalen:

$$S_k = U_L \cdot I_f \cdot \sqrt{3} \longrightarrow I_f = \frac{S_k}{U_L \sqrt{3}} \quad (4.3)$$

$$Z = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot I_f} \quad (4.4)$$

4.3 invullen in 4.4

$$Z = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_L \sqrt{3}}{S_k} \longrightarrow \boxed{Z = \frac{U_L^2}{S_k}} \quad (4.5)$$

Transformator:

Van een 3-fasen transformator zijn de volgende waarden berekend: kortsluitspanning (U_k), lijnspanning (U_n) en nominaal vermogen (S_{nom})

$$S_n = U_n \cdot I_n \cdot \sqrt{3} \longrightarrow I_n = \frac{S_n}{U_n \cdot \sqrt{3}} \quad (4.6)$$

$$Z_t = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (4.7)$$

Combineren van beide formules (4.6 en 4.7) geeft dan:

$$Z_t = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}} = \frac{U_k \cdot U_n}{S_n} \quad (4.8)$$

Vaak wordt de kortsluitspanning in procenten van de nominale spanning U_n opgegeven dus:

In deze formule is u_k de procentuele kortsluitspanning.

$$U_k = U_n \cdot \frac{u_k}{100} \quad (4.9)$$

Formule (30) invullen in formule (29) geeft dan:

$$\boxed{Z_t = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}} \quad (4.10)$$

Hoofdstuk 5 gaat dieper in op het berekenen van netcomponenten volgens de IEC60909

Het reduceren van componenten

In netten komen doorgaans meerdere spanningsniveaus voor. Om de kortsluitberekeningen te vereenvoudigen kunnen alle componenten naar één spanningsniveau getransformeerd worden. Dit noemt men reduceren. Figuur 4.15 toont een eenvoudig vervangingschema van transformator.

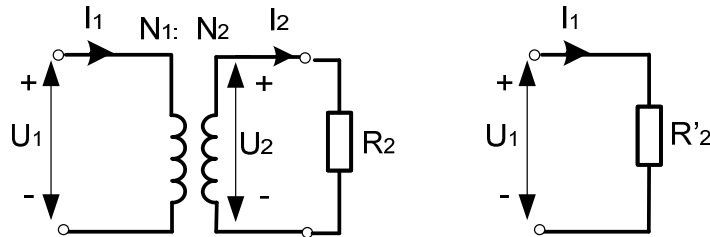


Fig.4.15. Eenvoudig vervangingschema van transformator

Bij het reduceren wordt eerst een zijde van de transformator gekozen (primair of secundair). Alle impedanties, spanningen en stromen die aan de zijde zitten waarnaar gereduceerd wordt blijven ongewijzigd. De impedanties, spanningen en stromen aan de andere zijde van de transformator moeten nog omgerekend worden met de volgende factoren:

Voor de transformator geldt:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = N \quad (4.11)$$

Hierbij is N het totaal aantal windingen van de zijde waarnaar gereduceerd wordt gedeeld door het aantal windingen van de andere zijde.

Er geldt dus:

$$\frac{U_1}{U_2} = N \rightarrow U_1 = N \cdot U_2 \quad (4.12)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{N} \rightarrow I_1 = I_2 / N \quad (4.13)$$

$$R'_2 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{N \cdot U_2}{I_2 / N} \rightarrow R'_2 = N^2 \cdot R_2 \quad (4.14)$$

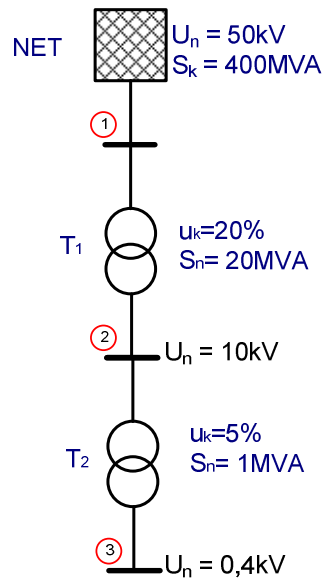
Het accentteken geeft aan dat het een gereduceerde waarde betreft

Conclusie: iedere impedantie, aanwezig op een bepaald spanningsniveau kan worden omgerekend naar een ander spanningsniveau door de factor N^2 toe te passen. Omrekenen naar hoger spanningsniveau leidt tot hogere impedantie. Omrekenen naar lager spanningsniveau leidt tot lagere impedantie.

4.2.4 Uitgewerkt voorbeeld

Dit voorbeeld laat zien hoe de kortsluitstroom in verschillende plaatsen kan bepaald worden.

Gegevens:



Gevraagd:

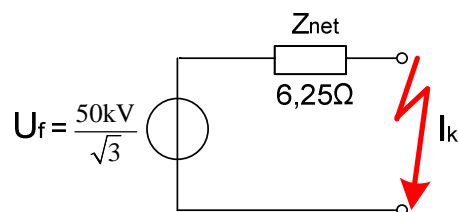
Hoe groot zijn de kortsluitstromen op de plaatsen 1, 2 en 3?

Uitwerking:

Sluiting bij 1:

$$\text{Spanningsniveau } 50\text{kV} \rightarrow U_{\text{fase}} = \left(\frac{50\text{kV}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$\text{Impedantie: } Z_{\text{net}} = \frac{U_n^2}{S_k} = \frac{(50 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} = 6,25[\Omega]$$



$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{net}}} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,25} = 4,16[\text{kA}]$$

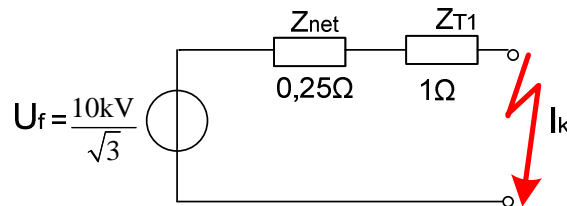
Sluiting bij 2:

$$\text{Spanningsniveau: } 10\text{kV} \rightarrow U_{\text{fase}} = \left(\frac{10\text{kV}}{\sqrt{3}} \right)$$

Impedantie:

$$Z_{\text{net}} = \frac{U_n^2}{S_k} = \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^6} = 0,25[\Omega]$$

$$Z_{T1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{200}{100} \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{20 \cdot 10^6} = 1[\Omega]$$



$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{totaal}}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\text{net}} + Z_{T1})} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,25} = 4,16[\text{kA}]$$

Sluiting bij 3:

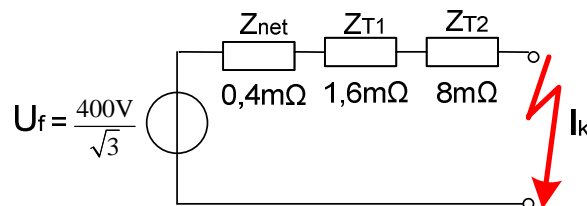
$$\text{Spanningsniveau: } 400\text{V} \rightarrow U_{\text{fase}} = \left(\frac{400\text{V}}{\sqrt{3}} \right)$$

Impedantie:

$$Z_{\text{net}} = \frac{U_n^2}{S_k} = \frac{(400)^2}{400 \cdot 10^6} = 0,4[\text{m}\Omega]$$

$$Z_{T1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{20}{100} \cdot \frac{(400)^2}{20 \cdot 10^6} = 1,6[\text{m}\Omega]$$

$$Z_{T2} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{5}{100} \cdot \frac{(400)^2}{1 \cdot 10^6} = 8[\text{m}\Omega]$$



$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{totaal}}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{\text{net}} + Z_{T1} + Z_{T2})} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 23,09[\text{kA}]$$

Het gaat hier om het principe, daarom zijn de correctiefactoren nog niet meegenomen in de uitwerking.

4.3 Kortsluitberekeningen volgens % per MVA methode (%/MVA)

Indien gerekend moet worden in netten met verschillende spanningsniveaus geeft het werken met normale grootheden het probleem dat voor elk spanningsniveau de stromen en impedanties met de transformatieverhouding moeten worden omgerekend. Vooral met meerdere niveaus geeft dit veel rekenwerk met een grote kans op fouten omdat het lastig is de verschillende gereduceerde grootheden te onderscheiden. Als men hetzelfde op een ander spanningsniveau wat wil uitrekenen moet alles weer opnieuw omgerekend worden. De oplossing voor dit probleem is het rekenen met relatieve waarden. Dit noemt men %/MVA methode.

Als uitgangspunt wordt een basisspanning van 1 [kV] en een basisvermogen van 1 [MVA] genomen. Alle waarden worden naar de basisspanning omgerekend [6].

$$U_{(L)basis} = 1[kV] \quad U_{(f)basis} = \frac{1}{\sqrt{3}}[kV] \quad S_{basis} = 1[MVA]$$

$$I_{(f)basis} = \frac{S_{basis}}{3 \cdot U_{(f)basis}} = \frac{S_{basis}}{3 \cdot \frac{U_{(L)basis}}{\sqrt{3}}} = \frac{S_{basis}}{\sqrt{3} \cdot U_{(L)basis}} = \frac{1 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}[kV] \quad (4.15)$$

$$Z_{basis} = \frac{(U_{(L)basis})^2}{S_{basis}} = \frac{(1 \cdot 10^3)^2}{1 \cdot 10^6} = 1[\Omega] \quad (4.16)$$

Om nu de kortsluitstroom in een net met een lijnspanning van 50[kV] te berekenen kan de %/MVA methode worden toegepast.

De lijnspanning in pu (per unit) is $U_{(L)pu} = 50[pu]$. De impedantie moet eerst, met de spanningsverhouding in het kwadraat, naar het 1 [kV] niveau worden omgerekend en daarna door Z_{basis} worden gedeeld.

$$Z_{1[kV]} = \left(\frac{U_{(L)basis}}{U_{(L)N}} \right)^2 \cdot Z_{50[kV]} \quad (4.17)$$

$$z_{pu1[kV]} = \frac{Z_{1[kV]}}{Z_{basis}} = \frac{\left(\frac{U_{(L)basis}}{U_{(L)N}} \right)^2 \cdot Z_{50[kV]}}{Z_{basis}} = \frac{\left(\frac{U_{(L)basis}}{U_{(L)N}} \right)^2 \cdot Z_{50[kV]}}{\frac{(U_{(L)basis})^2}{S_{basis}}} = \frac{S_{basis} \cdot Z_{50[kV]}}{(U_{(L)N})^2} \quad (4.18)$$

Met $S_{basis} = 1[MVA]$ en Z_{pu} in procenten wordt dit:

$$z_{\%/MVA} = \frac{Z_{50[kV]}}{(U_{(L)N})^2} \cdot 100\% = \frac{100\%}{S_n} [\% / MVA] \quad (4.19)$$

In formule (4.19) wordt de impedantie direct naar basisspanning en de basisimpedantie omgerekend. De omgerekende impedantie waarde is in %/MVA en wordt ook als zodanig aangegeven. Een %/MVA-grootheid wordt met een kleine letter aangegeven.

In het algemeen geldt dus:

$$z_{\%/MVA} = \frac{Z}{(U_{(L,N)})^2} \cdot 100\% = \frac{100\%}{S_n} \quad (4.20)$$

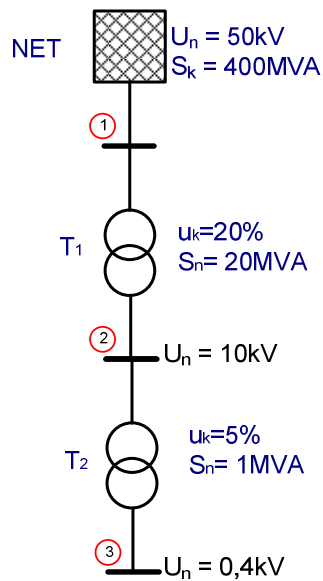
U_n in [kV] en S_n in [MVA]

De kortsluitstroom wordt dan:

$$I_{k_{pu}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot z \cdot \frac{U_n^2}{100\%}} = \frac{100\%}{\sqrt{3} \cdot z \cdot U_n} \quad (4.21)$$

4.3.1 Uitgewerkt voorbeeld

Gegevens:



Gevraagd:

1. De kortsluitstroom van het voedende net.
2. De kortsluitstroom na transformator T1.
3. De kortsluitstroom na transformator T2.

Bepaal alle stromen volgens de %/MVA methode.

Uitwerking:

- 1) De kortsluitstroom van het voedende net:

$$z_{net} = \frac{100\%}{S_k} = \frac{100\%}{400} = 0,25 \text{ [% / MVA]}$$

$$I_k = \frac{100\%}{z_{net} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100\%}{0,25 \cdot \sqrt{3} \cdot 50} = 4,16 \text{ [kA]}$$

- 2) De kortsluitstroom na transformator T1:

$$z_{net} = \frac{100\%}{S_k} = \frac{100\%}{400} = 0,25 \text{ [% / MVA]}$$

$$z_{T1} = \frac{u_k}{S_n} = \frac{20}{20} = 1 \text{ [% / MVA]}$$

$$z_{totaal} = z_{net} + z_{T1} = 1,25 \text{ [% / MVA]}$$

$$I_k = \frac{100\%}{z_{totaal} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100\%}{1,25 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 4,16 \text{ [kA]}$$

3) De kortsluitstroom na transformator T2:

$$z_{net} = \frac{100\%}{S_k} = 0,25 [\% / MVA]$$

$$z_{T1} = \frac{u_k}{S_n} = \frac{20}{20} = 1 [\% / MVA]$$

$$z_{T2} = \frac{u_k}{S_n} = \frac{5}{1} = 5 [\% / MVA]$$

$$z_{totaal} = z_{net} + z_{T1} + z_{T2} = 6,25 [\% / MVA]$$

$$I_k = \frac{100\%}{z_{totaal} \cdot \sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100\%}{6,25 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,4} = 23,09 [kA]$$

Het mooie van het %/MVA stelsel is dat na omrekening van alle impedanties in %/MVA er een netwerk ontstaat waarin geen transformatieverhoudingen meer voorkomen. Alle transformatoren zijn vervangen door hun kortsluitimpedantie. Dit maakt de berekeningen veel eenvoudiger. Nadat alle componenten in %/MVA berekend zijn kan men het stelsel vereenvoudigen waarna de stromen en spanningen kunnen worden berekend. Voor alle componenten gelden op alle spanningsniveaus dezelfde "vervangingswaardes". Dus het omrekenen naar het spanningsniveau waar de kortsluiting plaatsvindt, hoeft nu niet meer.

5 Modelling van netcomponenten volgens de IEC60909

Dit hoofdstuk laat zien hoe de impedantie van de netcomponenten berekend kan worden volgens de IEC60909. In dit hoofdstuk wordt ook dieper ingegaan op de impedantie correctiefactoren van de netcomponenten.

5.1 Netvoeding

Bij een kortsluiting wordt de netvoeding gemodelleerd als een equivalente spanningsbron met een inwendige impedantie. Deze impedantie is als volgt te berekenen:

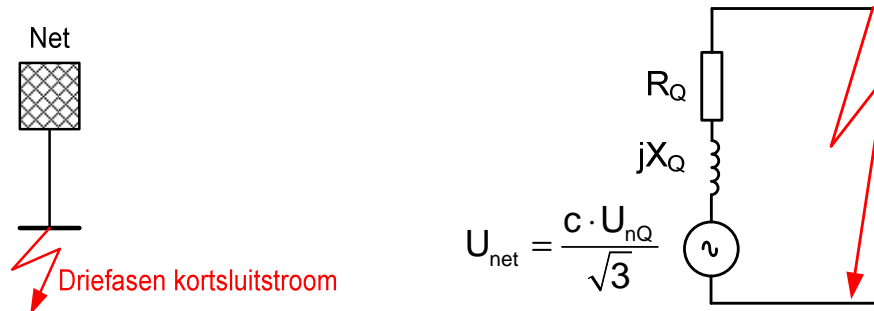


Fig.5.1. Symbol van de netvoeding (links) met een equivalent vervingsschema (rechts)

Bij een netvoeding wordt het kortsluitvermogen (S''_{kQ}) opgegeven in MVA. De impedantie van de netvoeding wordt volgens de onderstaande formules bepaald:

$$Z_Q = \frac{U_{net}}{I''_{kQ}} = \frac{\left(\frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}} \right)}{I''_{kQ}} = \frac{\left(\frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}} \right)}{\left(\frac{S''_{kQ}}{\sqrt{3}U_{nQ}} \right)} = c \cdot \frac{U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \quad (5.1)$$

Omdat in deze formule de c factor is opgegeven, krijgt Z_Q dus een hogere waarde. Dit zou betekenen dat er een te lage kortsluitstroom wordt berekend. Daar echter bij de kortsluitberekening wordt gerekend met $c \cdot U_n$ is de uiteindelijke kortsluitstroom weer de juiste waarde.

De spanningsfactor c is afhankelijk van een minimale of maximale kortsluitstroom berekeningen behorend bij U_{nQ} van de netvoeding.

Over het algemeen is de netimpedantie reactief (het ohmse deel van de netimpedantie is vooral bij hoog- en middenspanningsnetten relatief klein). Het ohmse deel is als volgt te bepalen:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q} \right)^2}} \quad (5.2)$$

$$R_Q = \left(\frac{R_Q}{X_Q} \right) \cdot X_Q \quad (5.3)$$

Uit ervaring kent men de verhouding:

$$\frac{R_Q}{X_Q} = 0,1 \quad (5.4)$$

5.2 Synchrone generator

Door de generator, die bestaat uit een ronddraaiende rotor en een stilstaande stator, wordt mechanische energie afkomstig van de turbine of motor omgezet in elektrische energie. Bij synchrone generatoren wordt de rotor van de generator bekrachtigd met gelijkstroom (I_2), waardoor in combinatie met het ronddraaien van de rotor, een magnetisch veld ontstaat. Dit magnetisch veld in de rotor veroorzaakt een stroom in de stator (I_1). Figuur 5.2 geeft de werking van de synchrone generator weer.

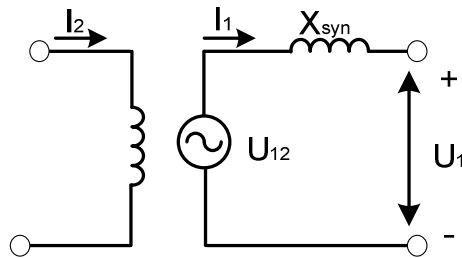


Fig.5.2. De werking van de synchrone generator

Waarin

U_{12} inwendige spanning in de stator keten t.g.v. het rotor draaiveld.

U_1 klemspanning van de generator.

I_1 generatorstroom.

I_2 bekrachtigingsstroom door de rotor.

X_{syn} inwendige reactantie van de statorspoel

De vorm van de rotor kan de grootte van de kortsluitstroom beïnvloeden. In de praktijk zijn er twee verschillende rotor-typen voor de synchrone generator (figuur 5.3):

1. Cilindrische rotor.
2. Rotor met uitgebouwde polen (Salient pole).

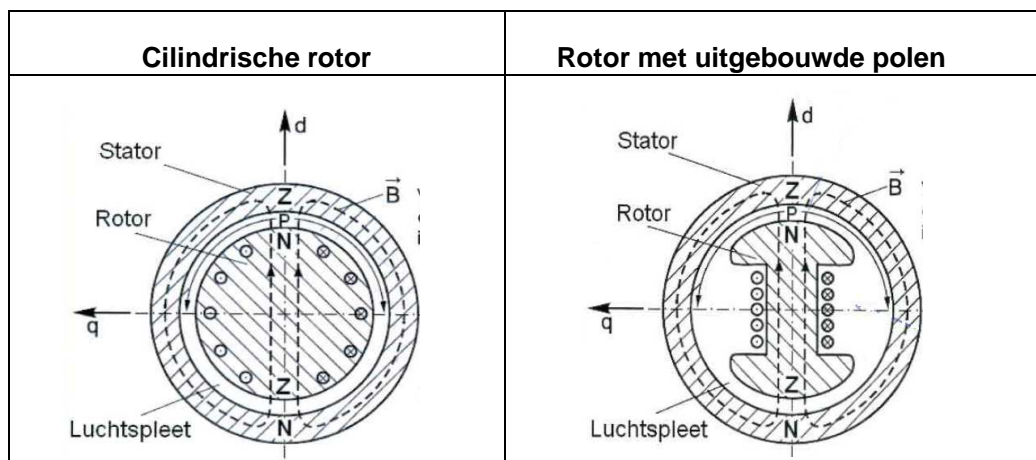


Fig. 5.3. Twee verschillende rotorsoorten van een synchrone machine

De cilindrische rotor heeft gleuven die spoelen bevatten die samen de bekrachtigingwikkeling vormen. Dit type rotor wordt gebruikt voor generatoren met een hoog toerental. De rotor met uitgebouwde polen draagt een aantal poollichamen waaromheen de bekrachtigingspoelen zijn gewikkeld. Dit type rotor wordt in het algemeen toegepast tot een toerental van maximaal 1500 omw/min [9]. In figuur 5.3 is te zien dat de luchtspleet bij een rotor met uitgebouwde polen veel groter is dan de cilindrische rotor.

Als in de rotorwikkeling een stroom loopt, wekt deze stroom in de luchtspleet een magnetisch veld op (figuur 5.4b). Dit veld staat loodrecht op het statorveld. Het gevolg is dat het magnetische veld van de rotor het statorveld verzwakt (figuur 5.4c). Dit leidt tot verlaging van de geïnduceerde interne spanning waarmee de kortsluitstroom begrensd wordt [10].

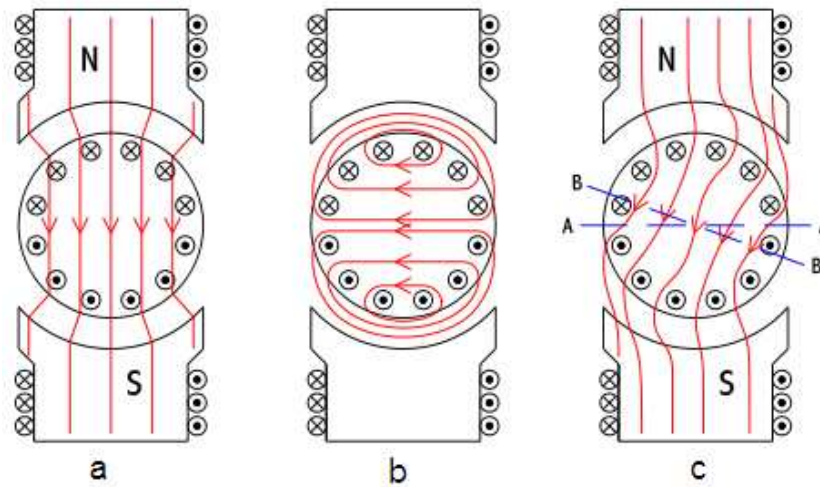


Fig. 5.4. Het statorveld (a), het rotorveld (b), het gezamenlijke veld ofwel ankerreactantie (c).

Dit statorveld is echter op het moment van kortsluiten nog niet aanwezig. Het magnetische veld wordt langzaam opgebouwd. De top-top waarde van de kortsluitstroom zal dus langzaam afnemen. Dit verschijnsel is het sterkst bij rotoren met uitgebouwde polen.

5.2.1 Kortsluitimpedantie

Volgens de IEC60909 kan het vervangingsschema van de generator bij een kortsluiting als volgt gemodelleerd worden:

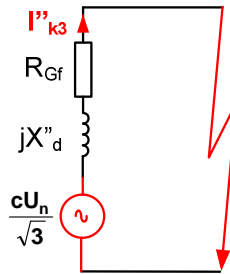


Fig. 5.5. Het vervangingschema van een synchrone machine bij een kortsluiting

Waarin:

U_n nominale bedrijfsspanning

X''_d sub-transiënte reactantie van de statorspoel.

R_G fictieve waarde voor de ohmse weerstand van de statorspoel.

De ohmse weerstand van de statorspoel R_{Gf} van de generator is over het algemeen verwaarloosbaar maar omdat de R/X verhouding altijd belangrijk is voor het bepalen van de juiste piek-kortsluitstroom geeft de IEC60909 de volgende tabel om toch de R_{Gf} waarde te bepalen (tabel.2).

Fictieve weerstand van de stator van synchrone generatoren			
	Laagspanning ($U_n \leq 1kV$)	Midden- en Hoogspanning	
		$S_n < 100MVA$	$100MVA \leq S_n$
R_{Gf}	$0,15X''_d$	$0,07X''_d$	$0,05X''_d$

Tabel.2. Fictieve weerstand van de stator van synchrone generatoren

Met de volgende vergelijkingen wordt de kortsluitimpedantie van de synchrone generator bepaald.

$$Z_G = \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \tag{5.5}$$

Normaliter wordt de sub-transiënte reactantie opgegeven als relatieve waarde x''_d . De reactantie wordt teruggerekend naar de ohmse waarde vanuit de gegeven procentuele waarde met:

$$x''_d = \frac{X''_d}{Z_G} \cdot 100\% \tag{5.6}$$

$$X''_d = \frac{x''_d}{100\%} \cdot Z_G = \frac{x''_d}{100\%} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \tag{5.7}$$

$$R_{Gf} = \left(\frac{R_{Gf}}{X''_d} \right) \cdot X''_d \tag{5.7}$$

5.2.2 Impedantiecorrectiefactor K_G

Figuur 5.6 toont het werkelijke vervangingsschema van de generator in de normale situatie:

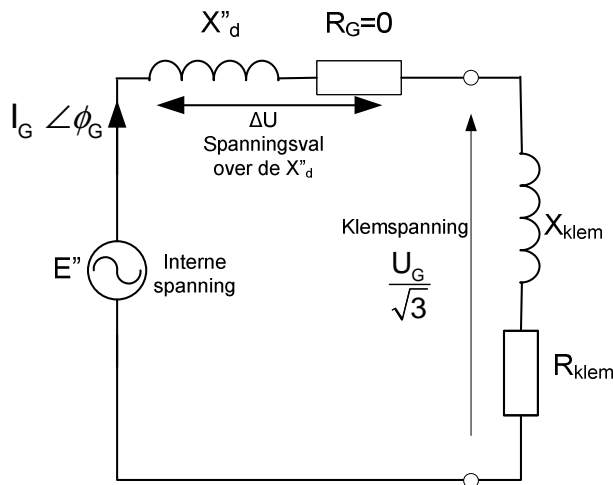


Fig. 5.6. Het vervangingschema van een synchrone machine in de normale situatie

De IEC60909 geeft een spanningscorrectiefactor c om de aanwezige klemspanning (bedrijfsspanning) te kunnen gebruiken bij een kortsluitberekening. In de praktijk is het gebruik van de klemspanning maal de factor c niet voldoende omdat de interne spanning van de generator altijd een veel hogere waarde zal hebben. Dat komt omdat de interne spanning gelijk is aan de klemspanning + de spanningsval in de stator. Daarom geeft de IEC60909 een impedantiecorrectiefactor (K_G) voor de generator. Deze factor is kleiner dan 1 en wordt met de berekende impedantie Z_G vermenigvuldigd. Door deze factor zal de impedantie een lagere waarde krijgen waardoor de juiste stroomwaarde berekend kan worden. Figuur 5.7 geeft de vectoriële voorstelling van figuur 5.6 weer:

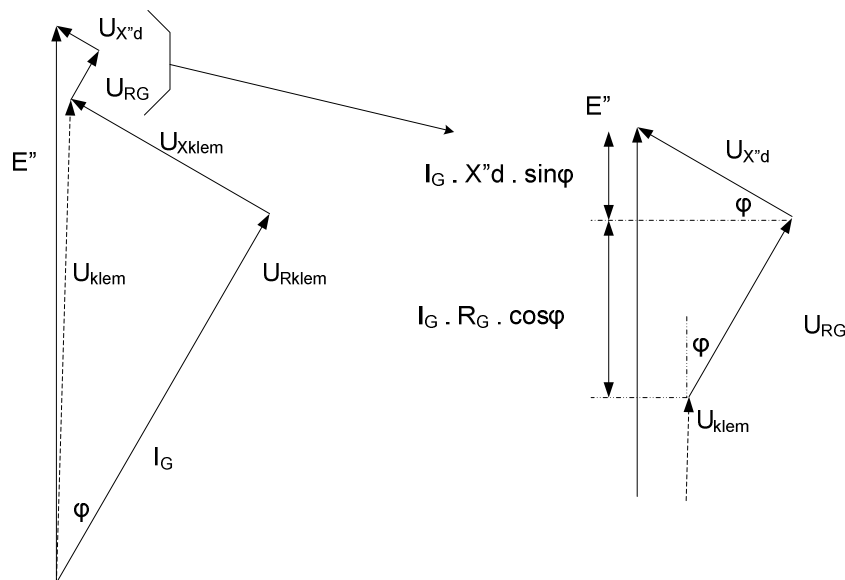


Fig.5.7. De vectoriële voorstelling van figuur.5.6 (links) en de vectoriële voorstelling van het spanningsval (rechts)

De spanningsval over de inwendige reactantie kan worden benaderd door:

$$\Delta U = I_G \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_G \quad (5.8)$$

$$I_G = \frac{S_G}{U_G \sqrt{3}} \quad (5.9)$$

(2) invullen in (1) leidt tot:

$$\Delta U = I_G \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_G = \frac{S_G}{U_G \sqrt{3}} \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_G \quad (5.10)$$

Voor de interne spanning van de generator geldt dan:

E'' = klemspanning + spanningsval over de X_d''

$$E'' = \frac{U_G}{\sqrt{3}} + \Delta U \quad (5.11)$$

3 invullen in 4

$$\begin{aligned} E'' &= \frac{U_G}{\sqrt{3}} + \frac{S_G}{U_G \sqrt{3}} \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_G \\ &= \frac{U_G}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{S_G}{U_G \cdot U_G} \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_G \right) \\ &= \frac{U_G}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{S_G}{U_G^2} \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_G \right) \\ &= \frac{U_G}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{1}{Z_G} \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_G \right) \end{aligned} \quad (5.12)$$

In de praktijk wordt normaliter niet de waarde X_d'' gespecificeerd maar de relatieve waarde x_d'' . Hiervoor geldt:

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_G} = \frac{X_d''}{\frac{U_G^2}{S_G}} \quad (5.13)$$

De interne spanning wordt dus:

$$E'' = \frac{U_G}{\sqrt{3}} (1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G) \quad (5.14)$$

Conclusie: De interne spanning E'' is een factor $(1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G)$ groter dan de klemspanning U_G .

Indien men de klemspanning U_G neemt als bronspanning dan moet de impedantie verkleind worden met de factor $(1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G)$. Op deze manier zal de bijdrage in de kortsluitstroom weer de juiste waarde zijn. Nu geldt de volgende formule:

$$E'' = \frac{\left(\frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3}} \right)}{K_G} \quad (5.15)$$

K_G is een vermenigvuldigingsfactor.

$$K_G = \frac{\left(\frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3}} \right)}{E''} = \frac{\left(\frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3}} \right)}{\frac{U_G}{\sqrt{3}} (1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G)} = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{U_G (1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G)} \quad (5.16)$$

De impedantiecorrectiefactor van de synchrone generator is dus:

$$K_G = \frac{U_n}{U_G} \cdot \frac{c_{\max}}{(1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G)} \quad (5.17)$$

Waarin:

U_n Nominale bedrijfsspanning.

U_G Generator spanning.

De onderstaande grafiek toont de verhouding tussen de spanningsbron E'' en de inwendige reactantie van de generator x''_d [%] bij drie verschillende situaties. De spanning is hier ook in relatieve grootheden weergegeven. Vandaar de vermelding E'' [PU]

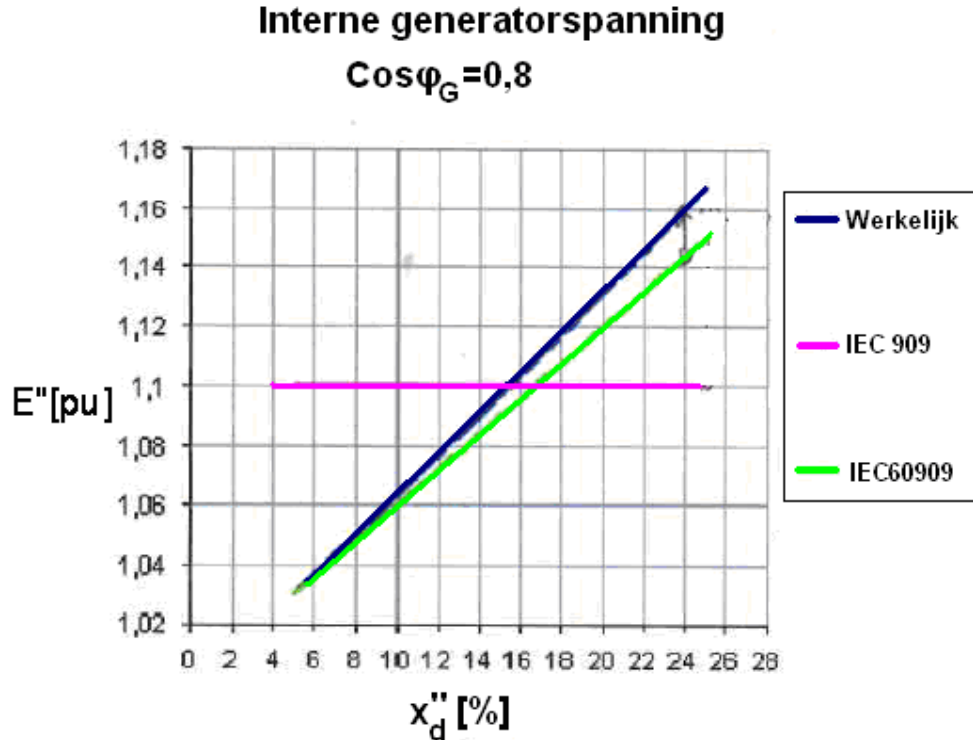


Fig. 5.8. De verhouding tussen E'' en x''_d [%] bij drie verschillende situaties.

De donkerblauwe lijn geeft de verhouding tussen de spanning E'' [pu] en de x''_d [%] in de werkelijkheid weer. De paarse lijn geeft de verhouding tussen de spanningsbron en de reactantie wanneer de impedantiecorrectiefactor K_G niet toegepast wordt.

De paarse lijn veronderstelt dat de spanning volgens de IEC909 altijd hetzelfde is ongeacht hoe groot de x''_d is. In feite klopt deze veronderstelling alleen als de x''_d ongeveer 15% is. Bij alle andere procenten is dat niet correct. Dat komt omdat bij lagere waarden dan 15% heeft men te maken met te hoge spanning en bij hogere waarden met te lage spanning.

De groene lijn geeft de verhouding tussen de spanningsbron en de reactantie wanneer de impedantiecorrectiefactor K_G toegepast wordt.

Bij de IEC60909 wordt de afwijking tussen de werkelijke situatie en de gecorrigeerde situatie kleiner. De IEC60909 heeft dus een betere benadering dan IEC909

5.3 Transformator

Met behulp van de kortsluit- en de nullastproef wordt het onderstaande model van de transformator verkregen (figuur 5.9):

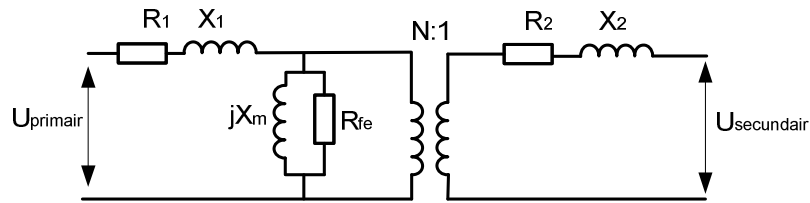


Fig. 5.9. Het algemene elektrische vervangingsschema van een transformator

Waarin:

R_1, R_2 de ohmse weerstand van de primaire en secundaire spoel.

X_1, X_2 de inductieve reactantie van de primaire en secundaire spoel.

R_{fe} ijzerverliezen

X_m magnetiseringsreactantie

In dit bovenstaande schema wordt nog met twee spanningen gewerkt. De componenten aan de secundaire zijde kunnen door reduceren worden vervangen door fictieve componenten op het spanningsniveau van de primaire zijde (figuur 5.10)

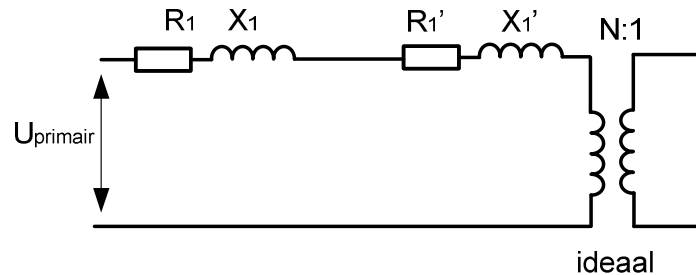


Fig. 5.10. Het gereduceerde vervangingsschema van de transformator

In dit fictieve beeld is de primaire spanning gelijk aan de secundaire spanning en is de primaire stroom gelijk aan de secundaire stroom. De magnetiseringsstroom is in vergelijking tot de nominale stroom zodanig laag (=nullaststroom) dat de verticale takken van het nullastcircuit mogen worden verwaarloosd.

De totale inwendige weerstand en reactantie kunnen bij elkaar opgeteld worden (figuur 5.11).

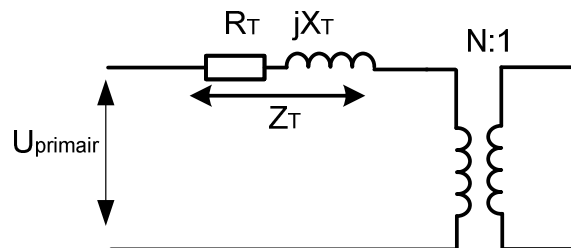


Fig. 5.11. Het vereenvoudigde vervangingsschema van de transformator

In de praktijk moeten de volgende gegevens bekend zijn om de kortsluitimpedantie van de transformator te bepalen:

- Nominale spanning primair U_T
- Nominale spanning secundair U_T
- Schijnbaar vermogen S_T
- Kortsluit spanning in % u_k
- Koperverliezen P_{kT}

De grootte van de kortsluitimpedantie wordt bepaald door middel van de kortsluitproef. Bij deze proef wordt de secundaire zijde kortgesloten en wordt de primaire spanning langzaam verhoogd tot er de nominale stroom loopt. De benodigde spanning wordt uitgedrukt in % van de nominale fasespanning.

De transformator impedantie kan als volgt berekend worden:

$$Z_T = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} \quad (5.17)$$

$$P_{kT} = 3 \cdot R_T \cdot I_n^2 = 3 \cdot R_T \cdot \left(\frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_T} \right)^2 = R_T \cdot \frac{S_T^2}{U_T^2} \longrightarrow R_T = \frac{P_{kT} \cdot U_T^2}{S_T^2} \quad (5.18)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (5.19)$$

5.3.1 Impedantiecorrectiefactor K_T

Om dezelfde reden als bij de generator wordt in de IEC60909 een impedantiecorrectiefactor K_T toegepast. Bij de transformator wordt hiervoor de volgende formule gebruikt.

$$K_T = 0.95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_T \cdot \sin \varphi} \text{ en voor } \cos \varphi = 0,8 \text{ geldt :}$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1^2 - 0,8^2} = 0,6 \quad (5.20)$$

$$K_T = 0.95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0.6 \cdot x_T} \quad (5.21)$$

$$x_T = \frac{X_T}{Z_T} = \frac{X_T}{\frac{U_T^2}{S_T}} \quad (5.22)$$

K_T is een factor die kleiner is dan 1 en door de Z_T te vermenigvuldigen met een factor die kleiner is dan 1 krijgt de impedantie een lagere waarde. De uitkomst wordt dan een grotere stroom. De onderstaande grafiek toont de verhouding tussen de transformatorspanning en de inwendige reactantie van de transformator x_T . De spanning is hier ook in relatieve grootheden weergegeven.

Impedantiecorrectiefactor transformatoren

$\cos \varphi = 0,8$

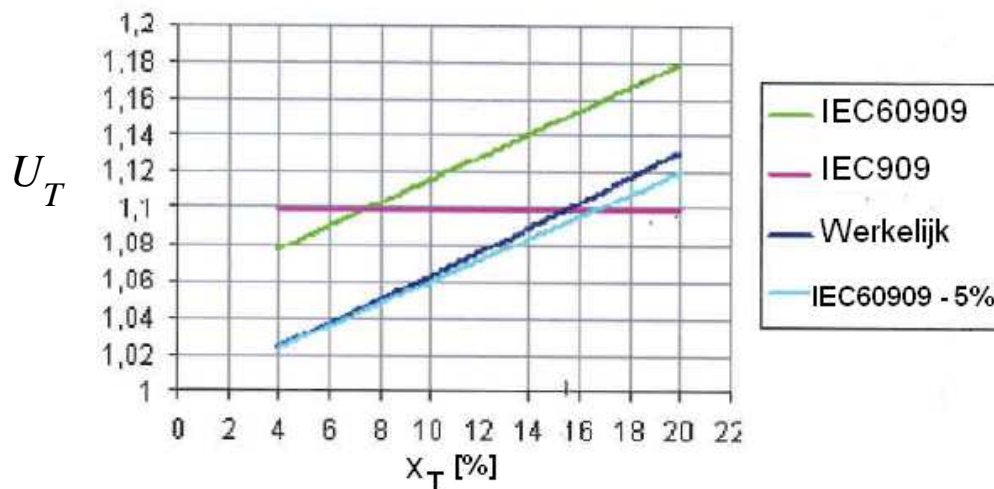


Fig. 5.12. De verhouding tussen de spanning en x_T [%].

De donkerblauwe lijn geeft de verhouding tussen de spanning en de X_T in de werkelijkheid weer. De paarse lijn van de IEC909 geeft de verhouding tussen de spanningsbron en de reactantie wanneer de impedantiecorrectiefactor K_G niet toegepast wordt.

De groene lijn van de IEC60909 heeft dankzij de toepassing van K_T een betere benadering dan IEC909. Er wordt ook nog rekening gehouden met een ongunstige trapstand van de transformator. Daarom wordt de correctie ook nog met 5% verlaagd. Dat wil zeggen dat de correctie met 0,95 wordt vermenigvuldigd.

In de grafiek is te zien dat de lichtblauwe lijn (IEC60909 -5%) dicht bij de werkelijke waarde ligt.

5.4 Asynchrone motor

Het vervangingschema van een asynchrone motor is gelijk aan het vervangingschema van de belaste transformator.

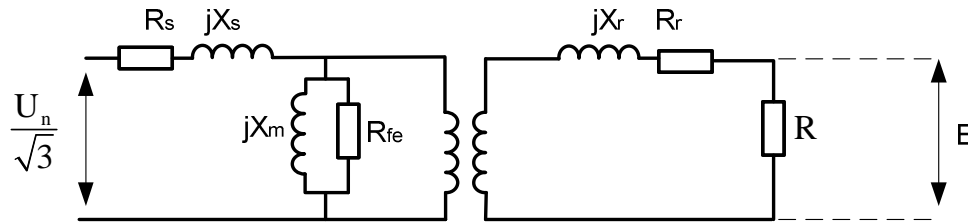


Fig. 5.13. Het vervangingschema van een asynchrone generator

Waarin :

R_s, R_r stator- en rotorweerstand.

X_s, X_r sStator- en rotorreactantie (inductieweerstand).

R_{fe} ijzerverliezen

X_m magnetiseringsreactantie.

Het mechanische vermogen dat aan de as wordt afgegeven kan worden weergegeven met de weerstand R.

Als een asynchrone motor wordt kortgesloten valt de bronspanning weg maar de rotor draait nog en ook loopt er nog stroom door de rotor. Deze rotorstroom kan niet plotseling 0 [A] worden t.g.v. de rotorreactantie. Deze rotorstroom zorgt kortstondig voor een rotordraaiveld. Dit draaiveld wekt spanning op waardoor kortstondig een stroom door de statorketen vloeit. De spanning die in eerste instantie wordt opgewekt is even groot als de spanning E net voor de kortsluiting. Omdat nu de statorketen is kortgesloten zal de kortsluitstroom een waarde bereiken die gelijk is aan de aanloopstroom.

Zoals bij transformatoren kan de secundaire zijde gereduceerd worden naar de primaire zijde. Het onderstaande schema geeft het gereduceerde schema weer (figuur 5.14).

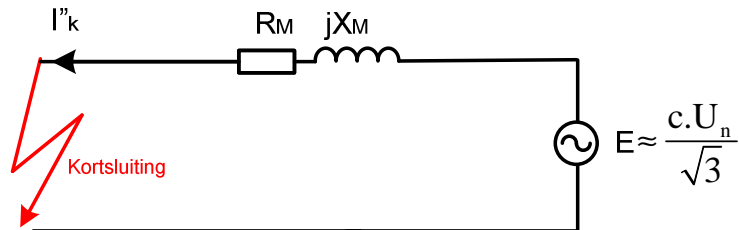


Fig. 5.14. Het vervangingschema van een asynchrone generator

De kortsluitimpedantie van de asynchrone motor kan als volgt bepaald worden:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_M} \cdot \frac{U_M^2}{P_M / (\eta_M \cdot \cos \varphi_M)} \quad (5.23)$$

Waarin:

U_M nominale spanning

P_M werkelijk vermogen

I_M nominale stroom

η_M rendement

I_{LR} aanloopstroom

De ohmse weerstand en reactantie van de asynchrone motor kunnen ook bepaald worden aan de hand van de R_M/X_M verhouding

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_M}{X_M}\right)^2}} \quad (5.24)$$

$$R_M = \left(\frac{R_M}{X_M}\right) \cdot X_M \quad (5.25)$$

Volgens de IEC60909 is de R_M/X_M verhouding bepalend voor de magnetische energie die vrij komt bij een kortsluiting. Deze energie wordt later in warmte omgezet. Als X_M groter is dan R_M dan wil dat zeggen dat er veel energie in de spoel zit. Veel energie wil zeggen dat als er een kortsluiting optreedt dan zal een grote DC component ontstaan

Volgens de IEC60909 heeft de R_M / X_M verhouding een lagere waarde wanneer het werkelijk vermogen per poolpaar groter of gelijk is aan 1MVA (bij midden- en hoogspanning).

	Laagspanning ($U_M \leq 1\text{kV}$)	Midden- en Hoogspanning ($U_M > 1\text{kV}$)	
		P_M per poolpaar $< 1\text{MVA}$	P_M per poolpaar $\geq 1\text{MVA}$
R_M/X_M	0,42	0,15	0,10

Tabel.3. De R/X verhouding bij asynchrone motoren

5.5 Kabel

Kabels worden gebruikt voor ondergronds elektriciteitstransport. Bij een kabel zijn de geleiders van aluminium of koper gemaakt. Als isolatiemedium wordt vaak PVC of XLPE toegepast. Een elektriciteitskabel wordt altijd voorzien van een geaarde mantel. De kabel kan verondersteld worden als een ohmse weerstand met een inductieve reactantie in serie [5].

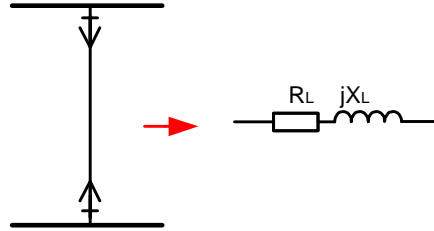


Fig. 5.15. Symbool van de kabel (links) met het vervangingschema daarvan (rechts)

De ohmse weerstand (R_L) en inductieve reactantie van de geleider (X_L) zijn afhankelijk van de doorsnede, temperatuur en soortelijke weerstand van de geleider. In de praktijk wordt de soortelijke weerstand van de geleider per kilometer opgegeven.

Met de volgende vergelijkingen wordt de impedantie van de kabel bepaald:

$$R_L = \frac{r_L \cdot l}{p} \quad (5.26)$$

$$X_L = \frac{x_L \cdot l}{p} \quad (5.27)$$

Waarin:

p aantal geleiders per fase

L lengte van de kabel

r_L, x_L soortelijke weerstand en reactantie van de kabel in Ω/km

5.6 Stootkortsluitstroom

De stootkortsluitstroom (I_s) of piek-kortsluitstroom (I_p) is de maximale bereikbare topwaarde van de kortsluitstroom in een bepaald kortsluitstroomcircuit.

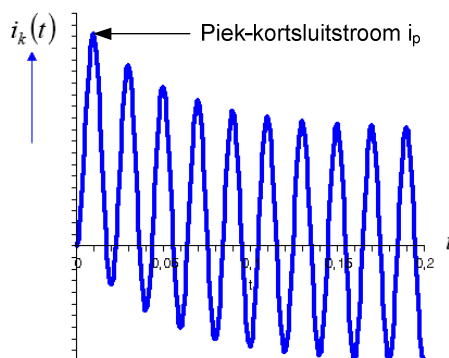


Fig. 5.16. De stootkortsluitstroom

Zoals in hoofdstuk 2 is omschreven, kan de totale kortsluitstroom opgevat worden als de som van de wisselstroomcomponent en gelijkstroomcomponent.

Hiervoor geldt de volgende formules:

$$i_p = \underbrace{\frac{\sqrt{2} \cdot U_{fase}}{|Z|} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)}_{AC} + \underbrace{\frac{\sqrt{2} \cdot U_{fase}}{|Z|} \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{Rt}{L}}}_{DC} \quad (5.28)$$

$$i_p = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{fase}}{|Z|} \left\{ \underbrace{\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) e^{-\frac{Rt}{L}}}_{\kappa} \right\} \quad (5.29)$$

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot \kappa \quad (5.30)$$

Hier is te zien dat de piek-kortsluitstroom een factor κ (kappa) groter is dan de topwaarde van de beginkortsluitstroom $\sqrt{2} \cdot I_k''$.

In hoofdstuk 2 is vastgesteld dat de grootte van de piek-kortsluitstroom afhankelijk is van de R/X verhouding in het betrokken circuit. De R/X verhouding bepaalt de grootte van de stoorfactor κ . Bij het berekenen van de stoorfactor maakt de IEC60909 onderscheid tussen vermaasde netten en niet vermaasde netten. Beide netten worden kort toegelicht.

5.6.1 Niet-vermaasde netten

Netten waarbij de stroom vanaf een bepaalde spanningsbron via één stroompad naar de foutplaats kan lopen worden niet-vermaasde netten (radiale netten) genoemd.

De onderstaande figuur toont een voorbeeld van een niet-vermaasd net met het bijbehorende vervangingsschema.

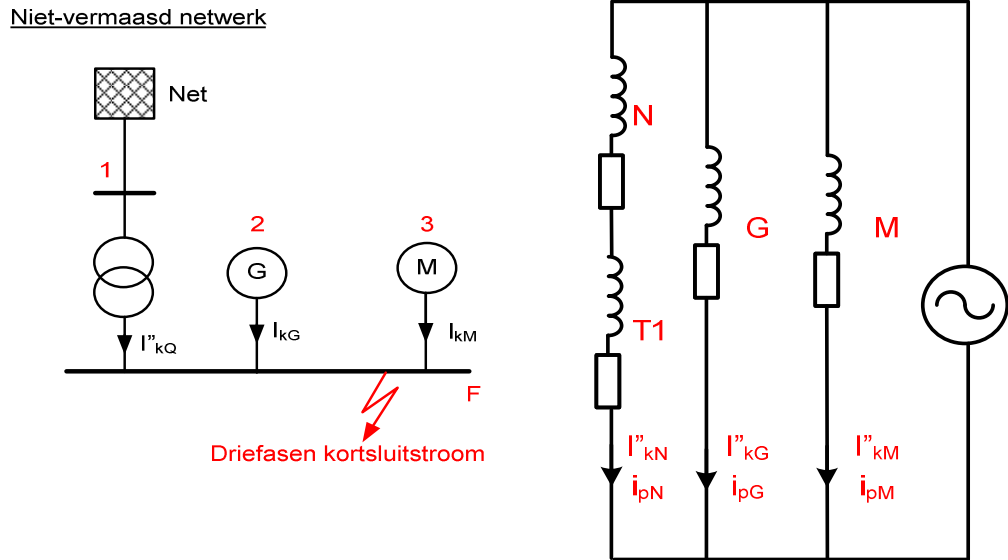


Fig. 5.17. Niet-vermaasd net (links) en het vervangingsschema daarvan (rechts)

In Figuur 5.17 is te zien dat het net uit 3 verschillende individuele takken bestaat. Bij een driefasenkortsluiting zal iedere spanningsbron (Net, G en M) een bijdrage leveren aan stootkortsluitstroom op de foutplaats F.

De stootkortsluitstroom bijdrage van elke spanningsbron kan met behulp van formule 5.30 berekend worden. De factor κ is afhankelijk van de R/X verhouding in de kortsluitbaan. In figuur 5.18 is deze relatie weergegeven.

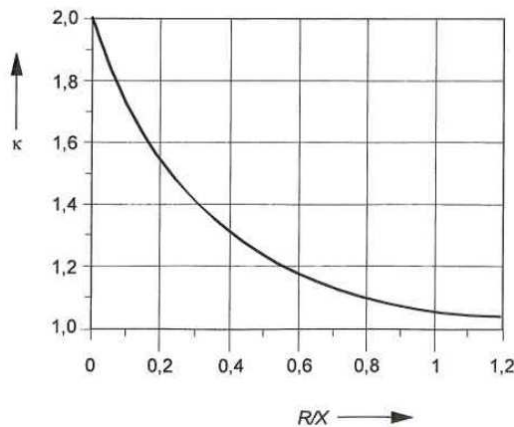


Fig. 5.18. De verhouding tussen R/X en de stootfactor

Tussenliggende waarden kunnen door interpolatie uit deze figuur worden afgeleid, of worden berekend uit de benadering:

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \tag{5.31}$$

De totale stootkortsluitstroom van het circuit is dan gelijk aan de som van alle stootkortsluitstromen die alle takken leveren. De som kan als volgt berekend worden

$$i_p = \sum_i i_{pi} \quad (5.32)$$

In figuur 5.17 is de totale stootkortsluitstroom als volgt te berekenen:

$$i_p = i_{pN} + i_{pG} + i_{pM} \quad (5.33)$$

5.6.2 Vermaasde netten

Netten waarbij de stroom vanaf een bepaalde spanningsbron via verschillende stroompaden naar de foutplaats kan lopen worden vermaasde netten genoemd. Figuur 5.19 toont een voorbeeld van een vermaasd net met het bijbehorende vervangingsschema.

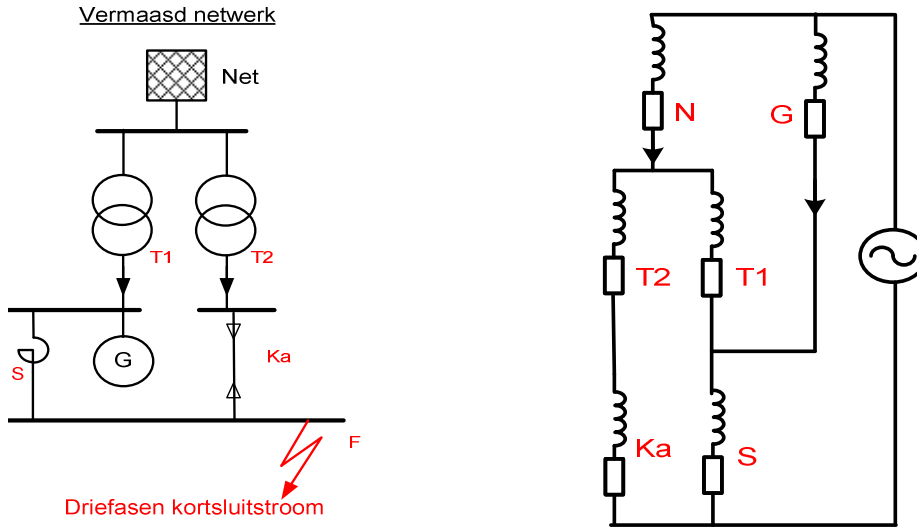


Fig. 5.19. Vermaasd net (links) en het vervangingschema daarvan (rechts)

Bij het berekenen van de stootkortsluitstroom in vermaasde netten introduceert de IEC60909 drie methoden om stootfactor te bepalen. Deze methoden zullen aan de hand van een berekeningsvoorbeeld uitgelegd worden:

Voorbeeld

Dit voorbeeld laat aan de hand van figuur 5.19 zien hoe de stootfactor in vermaasde netten berekend kan worden. Voor de componenten geldt de volgende gegevens:

Generator G	$S_{rG} = 100 \text{ MVA}$	$U_{rG} = 10 \text{ kV}$	$x_d'' = 11 \%$	$r_G = 0,11 \%$	
Transformator T1	$S_{rT1} = 100 \text{ MVA}$	$U_{rT1HV} = 220 \text{ kV}$	$U_{rT1LV} = 10 \text{ kV}$	$u_{XrT1} = 11 \%$	$u_{RrT1} = 0,11 \%$
Transformator T2	$S_{rT2} = 31,5 \text{ MVA}$	$U_{rT2HV} = 220 \text{ kV}$	$U_{rT2LV} = 10 \text{ kV}$	$u_{XrT2} = 6 \%$	$u_{RrT2} = 0,75 \%$
Kabel L	$R'_L = 0,231 \Omega / \text{km}$		$X'_L = 0,104 \Omega / \text{km}$		
Smoorspoel R	$R_R = 0,00458 \Omega$		$X_R = 0,485 \Omega$		

De totale impedantie van de eerste tak is:

$$\underline{Z}_1 = Z_G + Z_S = 0,00513 + j0,513[\Omega] \longrightarrow R_1/X_1 = 0,01$$

De totale impedantie van de tweede tak is:

$$\underline{Z}_2 = Z_N + ((Z_{T2} + Z_{Ka}) // (Z_{T1} + Z_S)) = 0,371 + j0,345[\Omega] \longrightarrow R_2/X_2 = 1,0754$$

Het vervangingschema van figuur 5.19 kan worden gereduceerd naar twee parallelle takken waarin de totale impedantie van elke tak wordt opgegeven (fig.5.20):

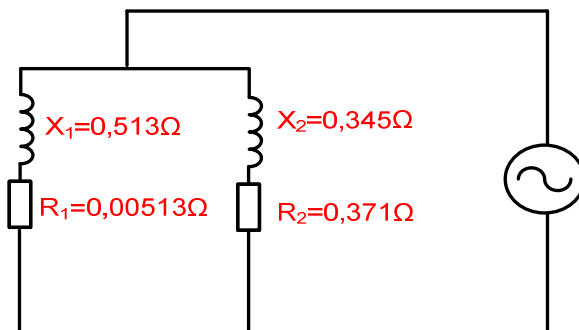


Fig. 5.20. Het vervangingschema met twee parallelle takken

De totale impedantie van het hele kortsluitcircuit op de foutplaats F bedraagt:

$$\underline{Z}_k = Z_1 // Z_2 = 0,11276 + j0,25349 [\Omega] \longrightarrow R_k / X_k = 0,444$$

Nadat alle impedanties zijn berekend kan de stootfactor op drie verschillende manieren worden bepaald:

Methode a:

De stootfactor wordt berekend aan de hand van de kleinste R/X verhouding van alle takken in het hele circuit.

In ons voorbeeld heeft de eerste tak de kleinste R/X verhouding namelijk $R_1/X_1=0,01$.

De stoot factor kan nu als volgt berekend worden:

$$\kappa_a = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-3(0,01)} = 1,971$$

Methode b:

Bij deze methode geeft de IEC60909 aan dat de stootfactor berekend moet worden aan de hand van R/X verhouding van de totale impedantie van het hele kortsluitcircuit. Als de R/X in één van de takken van het net groter is dan 0,3 wordt de stootfactor met 1,15 vermenigvuldigd.

In ons voorbeeld is de totale impedantie \underline{Z}_k van beide takken gelijk aan 0,444. Bovendien is R/X verhouding van de tweede tak groter dan 0,3. De stootfactor kan dus als volgt berekend worden:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-3(0,444)} = 1,278$$

$$\kappa_b = 1,15 \cdot 1,278 = 1,4697$$

Methode b is een sterke vereenvoudigde benadering om de piekwaarde te berekenen.

De factor 1,15 is berekend met behulp van differentiaal vergelijkingen. Het wordt afgeraden om deze methode te gebruiken.

Methode c:

Bij deze methode wordt de impedantie van het circuit bepaald aan de hand van de werkelijke frequentie tijdens het optreden van de stootkortsluitstroom. De IEC60909 stelt vast dat de equivalente frequentie tijdens het optreden van de stootkortsluitstroom gelijk is aan 20Hz i.p.v. de nominale frequentie 50Hz.

Zoals bekend is, hangt de reactantie X van een bepaald net af van de frequentie: ($X = \omega L = 2\pi f \cdot L$) en bij 20Hz zal de reactantie X kleiner worden waardoor in het circuit een grotere stroombijdrage wordt geleverd.

In deze methode zal de reactantie van elke tak omgerekend worden naar een equivalente reactantie waarde bij 20Hz. Dit doet men door de reactantie van iedere tak met de factor $\frac{f_c}{f} = \frac{20Hz}{50Hz}$ te vermenigvuldigen. Daarna wordt de ohmse weerstand en de reactantie van de

berekende equivalente impedantie ook met de factor $\frac{f_c}{f} = \frac{20Hz}{50Hz}$ vermenigvuldigd. De stootfactor kan als volgt berekend worden:

De totale impedantie van de eerste tak is:

$$\underline{Z}_1 = 0,00513 + \left(j0,513 \cdot \frac{20Hz}{50Hz} \right) = 0,00513 + j0,02052[\Omega]$$

De totale impedantie van de tweede tak is:

$$\underline{Z}_2 = 0,371 + \left(j0,345 \cdot \frac{20Hz}{50Hz} \right) = 0,371 + j0,138[\Omega]$$

De totale impedantie van het hele kortsluitcircuit op de foutplaats F wordt dus:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 // \underline{Z}_2 = 0,0857 + j0,1980[\Omega] \longrightarrow R_k / X_k = 0,4328$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_k}{X_k} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{0,0857}{0,1980} \cdot \frac{20}{50} = 0,1731$$

De stootfactor is dus:

$$\kappa_a = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-3(0,1731)} = 1,6029$$

Samenvatting van alle methoden:

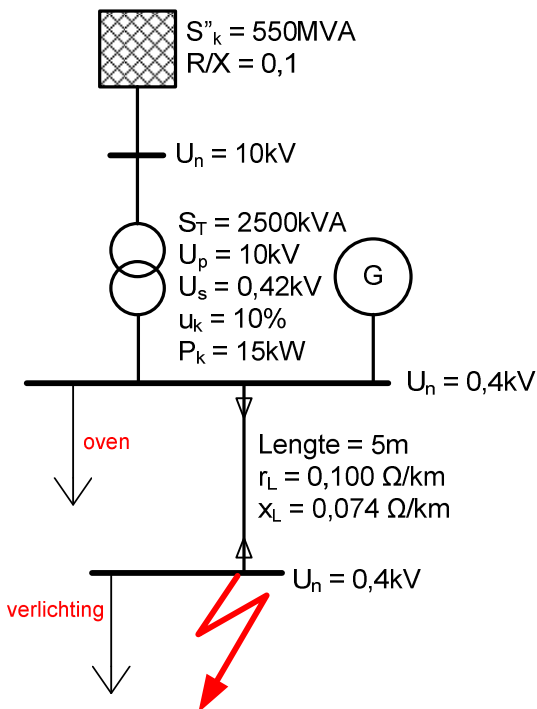
Methode	R/X	Stootfactor (κ)	Opmerking
A	$\frac{R}{X} = \left[\frac{R}{X} \right]_{\min} = \frac{R_1}{X_1} = 0,01$	$\kappa = \kappa_a = 1,971$	Methode a zit sterk aan de veilige kant en heeft al een positieve afwijking
B	$\frac{R}{X} = \frac{R_k}{X_k} = 0,444$	$\kappa_b = 1,278$ $1,15 \cdot \kappa_b = 1,4697$	Methode b geeft een relatief lagere waarde.
C	$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{20Hz}{50Hz} = 0,1732$	$\kappa = \kappa_c = 1,6029$	Methode c benadert de werkelijkheid het beste.

6 Uitgewerkte voorbeelden volgens de IEC60909

6.1 Voorbeeld 1

In dit voorbeeld wordt de rekenmethode van de IEC-60909 gedemonstreerd. Hieronder wordt een distributienet weergegeven:

Gegevens:

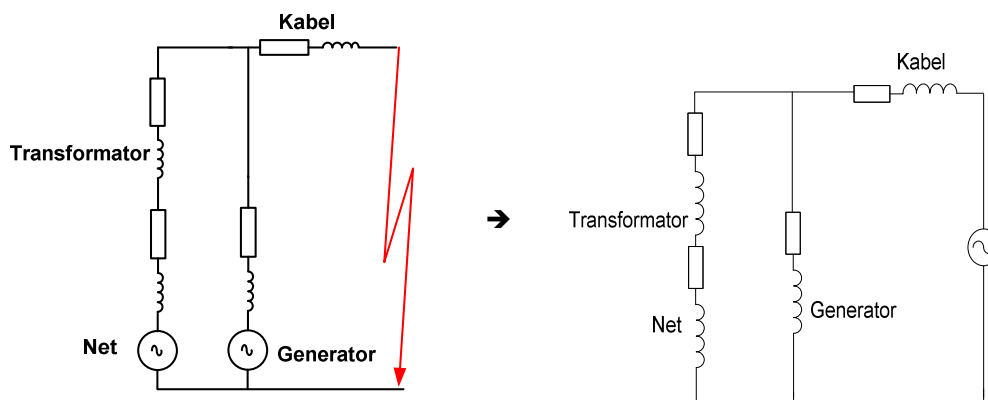


Gevraagd: Bereken de stationaire kortsluitstroom

Bereken de dynamische kortsluitstroom (piek-kortsluitstroom)

Uitwerking:

Eerst wordt het vervangingschema opgesteld waarin de passieve netcomponenten (verlichting en oven) niet worden meegenomen want de stroom die zij vragen wordt verwaarloosd t.o.v. de kortsluitstroom.



De spanningsbronnen worden vervangen door hun inwendige impedantie. Alle spanningen worden vervangen door één fasespanning namelijk de equivalente spanningsbron op de foutplaats. Deze spanning wordt met de factor c gecorrigeerd

$$U_{th} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}} \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3}} = 254[V]$$

Vervolgens worden de impedanties berekend op het spanningsniveau van de foutplaats (in dit geval op 400V)

Netvoeding:

- De impedantie aan de 10kV zijde:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot (10 \cdot 10^3)^2}{550 \cdot 10^6} = 0,2[\Omega]$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R/X)^2}} = \frac{0,2}{\sqrt{1 + (0,1)^2}} = 0,199[\Omega]$$

$$R_Q = (R/X) \cdot X_Q = 0,1 \cdot 0,199 = 0,0199 [\Omega]$$

- De impedantie aan de 0,4kV zijde:

$$R_Q = 0,0199 \cdot \left(\frac{U_{\text{secundair}}}{U_{\text{primaair}}} \right)^2 = 19,9 \cdot \left(\frac{0,4kV}{10kV} \right)^2 = 0,032[m\Omega]$$

$$X_Q = 0,199 \cdot \left(\frac{U_{\text{secundair}}}{U_{\text{primaair}}} \right)^2 = 199 \cdot \left(\frac{0,4kV}{10kV} \right)^2 = 0,32[m\Omega]$$

Transformator:

$$Z_T = \frac{U_{kT}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{10\%}{100\%} \cdot \frac{(400)^2}{2,5 \cdot 10^6} = 6,4 [m\Omega]$$

$$R_T = \frac{P_{kT}}{3 \cdot I_{rT}^2} = \frac{P_{kT} \cdot U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot (400)^2}{(2,5 \cdot 10^6)^2} = 0,384[m\Omega]$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{6,4^2 - 0,384^2} = 6,388[m\Omega]$$

$$x_T = \frac{X_T}{U_n^2 / S_{rT}} = \frac{0,006388}{(400)^2 / 2,5 \cdot 10^6} = 0,0998$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (0,384 + j6,388)[m\Omega]$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0998} = 0,9859$$

$$\underline{Z}_{Tk} = K_T \cdot \underline{Z}_T = 0,9859 \cdot (0,384 + j6,388) = (0,378 + j6,29)[m\Omega]$$

$$Z_Q + Z_{Tk} = (0,032 + 0,32j) + (0,378 + j6,29) = 0,41 + j6,61 [m\Omega]$$

Synchrone generator:

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_G^2}{S_G} = \frac{15,9\%}{100\%} \cdot \frac{(400)^2}{1,425 \cdot 10^3} = 17,853 [m\Omega]$$

$$R_{Gf} = (R_{Gf} / X_d'') \cdot X_d'' = 0,15 \cdot 17,853 = 2,678 [m\Omega]$$

$$\sin \varphi_G = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_G} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G} = \frac{0,4kV}{0,4kV} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,159 \cdot 0,6} = 1,004$$

$$\underline{Z}_{Gk} = K_G \cdot Z_G = K_G \cdot (R_{Gf} + jX_d'')$$

$$\underline{Z}_{Gk} = 1,004 \cdot (2,678 + j17,583)$$

$$\underline{Z}_{Gk} = 2,689 + j17,928 [m\Omega]$$

Kabel:

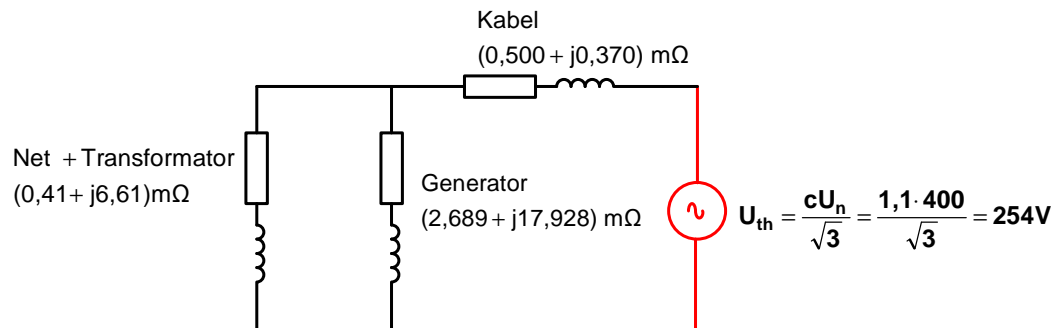
$$R_{kabel} = \frac{r_{kabel} \cdot L}{p} = \frac{0,1 \cdot 0,005 [km]}{1} = 0,500 [m\Omega]$$

$$X_{kabel} = \frac{x_{kabel} \cdot L}{p} = \frac{0,074 \cdot 0,005 [km]}{1} = 0,370 [m\Omega]$$

p: aantal parallelle kabels

$$\underline{Z}_{kabel} = R_{kabel} + jX_{kabel} = (0,500 + j0,370) [m\Omega]$$

Alle impedanties zijn nu berekend.



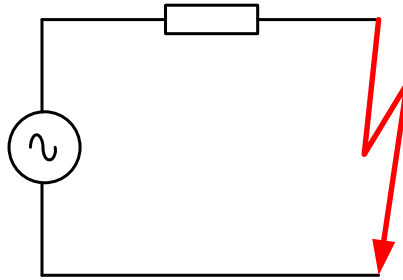
Vervolgens wordt de totale kortsluitimpedantie gezien vanuit de foutplaats bepaald.

$$Z_{th} = Z_{kabel} + \frac{Z_{Net+transformator} \cdot Z_{Generator}}{Z_{Net+transformator} + Z_{Generator}} = (0,953 + j5,563) [m\Omega]$$

Nu zijn de equivalente spanningsbron en de Z_k bekend dus de kortsluitstroom wordt als volgt berekend:

$$Z_{th} = Z_k = (0,953 + j5,563) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{cU_n}{\sqrt{3}} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3}}$$



De maximale symmetrische kortsluitstroom is:

$$I''_k = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \sqrt{0,953^2 + 5,563^2}} = 45,01 \text{ [kA]}$$

De piek-kortsluitstroom wordt als volgt bepaald:

Eerst de 20Hz impedantie bepalen:

Netvoeding

$$\underline{Z}_{Qc} = \left(0,032 + j0,32 \cdot \frac{20\text{Hz}}{50\text{Hz}} \right) = 0,032 + j0,128 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Transformator

$$\underline{Z}_{Tkc} = \left(0,41 + j6,61 \cdot \frac{20\text{Hz}}{50\text{Hz}} \right) = 0,41 + j2,644 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Generator

$$\underline{Z}_{Gkc} = \left(2,689 + j17,928 \cdot \frac{20\text{Hz}}{50\text{Hz}} \right) = 2,689 + j7,171 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Kabel

$$\underline{Z}_{kabelc} = \left(0,500 + j0,370 \cdot \frac{20\text{Hz}}{50\text{Hz}} \right) = 0,500 + j1,480 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Totale impedantie is dan :

$$Z_{kc} = Z_{kabel} + \left(Z_{Net+transformator} // Z_{Generator} \right)$$

$$Z_{kc} = Z_{kabel} + \frac{Z_{Net+transformator} \cdot Z_{Generator}}{Z_{Net+transformator} + Z_{Generator}} = 0,948 + j2,241 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

De piek-kortsluitstroom wordt:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{0,948 \text{ [m}\Omega\text{]}}{2,241 \text{ [m}\Omega\text{]}} \cdot \frac{20\text{Hz}}{50\text{Hz}} = 0,1692$$

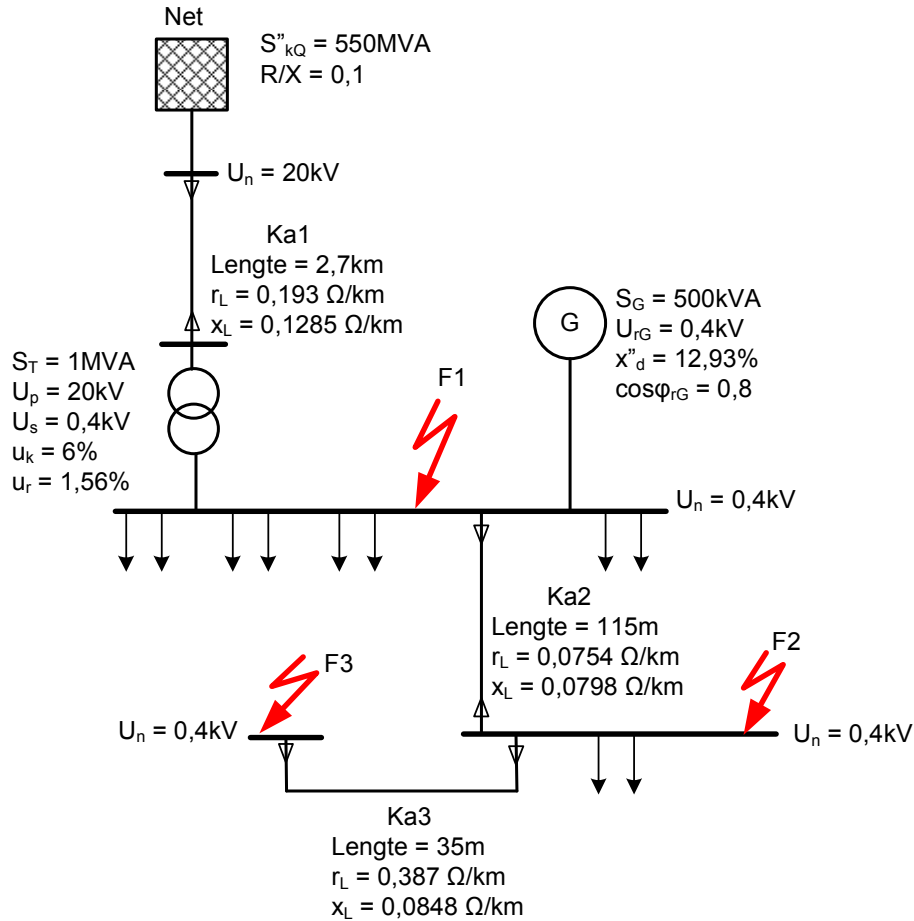
$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot 0,1692} = 1,61$$

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_k'' = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot 45,01 \text{ [kA]} = 102,47 \text{ [kA]}$$

6.2 Voorbeeld 2

Gegevens:

In onderstaand distributienet ontstaat 3 verschillende kortsluitingen op 3 verschillende plekken namelijk F1, F2 en F3:



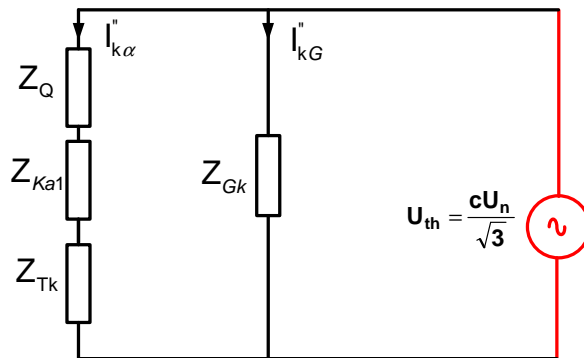
Gevraagd:

1. Bereken de 3-fasen symmetrische kortsluitstroom op F1, F2 en F3
2. Bereken de stootkortsluitstroom op F1, F2 en F3

Uitwerking:

Kortsluiting op F1

Eerst wordt het vervangingschema opgesteld:



Daarna wordt de inwendige impedantie van de componenten berekend:

1) Netvoeding (Z_Q) aan de 20kV zijde:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot (20 \cdot 10^3)^2}{500 \cdot 10^6} = 0,88 [\Omega]$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R/X)^2}} = \frac{0,88}{\sqrt{1 + (0,1)^2}} = j0,8756 [\Omega]$$

$$R_Q = (R/X) \cdot X_Q = 0,1 \cdot 0,8756 = 0,0875 [\Omega]$$

$$\underline{Z}_Q = 0,0875 + j0,8756 [\Omega]$$

2) Kabel1 (Z_{Ka1}) aan de 20kV zijde:

$$R_{Ka1} = \frac{r_{Ka1} \cdot L}{p} = \frac{0,193 \cdot 2,7 [km]}{1} = 0,5211 [\Omega]$$

$$X_{Ka1} = \frac{x_{Ka1} \cdot L}{p} = \frac{0,1285 \cdot 2,7 [km]}{1} = 0,34695 [\Omega]$$

p: aantal parallelle kabels

$$\underline{Z}_{Ka1} = R_{Ka1} + jX_{Ka1} = 0,5211 + j0,34695 [\Omega]$$

Totale impedantie van Z_Q en Z_{Ka1} aan de 20kV zijde:

$$\underline{Z}_{QKa1} = Z_Q + Z_{Ka1} = 0,60866 + j1,22255 [\Omega]$$

Totale impedantie van Z_Q en Z_{Ka1} aan de 0,4kV zijde:

$$\underline{Z}_{QKa1(400V)} = Z_{QKa1} \cdot \left(\frac{U_s}{U_p} \right)^2 = (0,60866 + j1,22255) \cdot \left(\frac{0,4kV}{20kV} \right)^2 = 0,00024 + j0,00049 [\Omega]$$

3) Transformator (Z_{Tk}):

$$X_T = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = \frac{5,794\%}{100\%} \cdot \frac{(400)^2}{1 \cdot 10^6} = 0,00927 [\Omega]$$

$$u_X = \sqrt{u_k^2 - u_R^2} = \sqrt{(6)^2 - (1,56)^2} = 5,794\%$$

$$R_T = \frac{u_R}{100\%} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = \frac{1,56\%}{100\%} \cdot \frac{(400)^2}{1 \cdot 10^6} = 0,00249 [\Omega]$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = 0,00249 + j0,00927 [\Omega]$$

Impedantie correctiefactor K_T toepassen:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot u_X} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,05794} = 1,063$$

$$\underline{Z}_{Tk} = K_T \cdot \underline{Z}_T = 1,063 \cdot (0,00249 + j0,00927) = 0,002646 + j0,00985 [\Omega]$$

Totale impedantie van $Z_{Qka1(400V)}$ en Z_{Tk} aan de 0,4kV zijde:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{Qka1(400V)} + \underline{Z}_{Tk} &= (0,00024 + j0,00049) + (0,002646 + j0,00985) \\ &= 0,002886 + j0,01034 [\Omega] \end{aligned}$$

$$|\underline{Z}_{Qka1(400V)} + \underline{Z}_{Tk}| = \sqrt{0,002886^2 + j0,01034^2} = 0,01073 [\Omega]$$

4) Generator

$$X_G = X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_G^2}{S_G} = \frac{12,93\%}{100\%} \cdot \frac{(400)^2}{500 \cdot 10^3} = 0,04138 [\Omega]$$

$$R_G = (R_{Gf} / X_d'') \cdot X_d'' = 0,15 \cdot 0,04138 = 0,00621 [\Omega]$$

$$Z_G = 0,00621 + j0,04138 [\Omega]$$

Impedantie correctiefactor K_G toepassen:

$$\sin \varphi_G = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_G} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G} = \frac{400}{400} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,1293 \cdot 0,6} = 1,0208$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{Gk} &= K_G \cdot Z_G = K_G \cdot (R_{Gf} + jX_d'') \\ &= 1,0208 \cdot (0,00621 + j0,04138) [\Omega] \\ &= 0,006339 + j0,0422 [\Omega] \end{aligned}$$

$$|\underline{Z}_{Gk}| = \sqrt{0,006339^2 + j0,0422^2} = 0,0427 [\Omega]$$

Nadat alle impedanties zijn berekend, kan de 3-fasen symmetrische kortsluitstroom als volgt berekend worden:

$$I''_{k \max} = I''_{k\alpha} + I''_{kG}$$

- De stroombijdrage van de eerste tak $I''_{k\alpha}$ (netvoeding, kabel en transformator):

$$I''_{k\alpha} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{Qka1(400V)} + Z_{Tk})} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,01073\Omega} = 23,67 [kA]$$

- De stroombijdrage van de tweede tak I''_{kG} (generator):

$$I''_{kG} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{GK}} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,0427} = 5,95 [kA]$$

De totale 3-fasen symmetrische kortsluitstroom ($I''_{k \max}$) bij sluiting F1 is dus:

$$I''_{k \max} = I''_{k\alpha} + I''_{kG} = (23,67 + 5,95) [kA] = \boxed{29,62 [kA]}$$

De totale stootkortsluitstroom ($i_{p\max}$) bij sluiting F1 is:

$$i_{p\max} = i_{p\alpha} + i_{pG}$$

1. De stroombijdrage van de eerste tak $i_{p\alpha}$ (netvoeding, kabel en transformator) kan als volgt berekend worden:

$$i_{p\alpha} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k\alpha}$$

- De totale impedantie van de eerste tak is

$$\underline{Z}_{QKa1(400V)} + \underline{Z}_{TK} = 0,002886 + j0,01034 [\Omega]$$

- De stootfactor (κ) kan volgens als volgt berekend worden:

$$\begin{aligned} \kappa &= 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \\ &= 1,02 + 0,98e^{-3\left(\frac{0,002886}{0,01034}\right)} = 1,44 \end{aligned}$$

- De stootkortsluitstroom van de eerste tak is dus:

$$i_{p\alpha} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k\alpha} = 1,44 \cdot \sqrt{2} \cdot 23,67 [kA] = 48,34 [kA]$$

2. De stroombijdrage van de tweede tak i_{pG} (generator) kan als volgt berekend worden:

$$i_{pG} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kG}$$

- De impedantie van de tweede tak is

$$\underline{Z}_{Gk} = 0,006339 + j0,0422 [\Omega]$$

- De stootfactor (κ) kan volgens als volgt berekend worden:

$$\begin{aligned} \kappa &= 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \\ &= 1,02 + 0,98e^{-3\left(\frac{0,006339}{0,0422}\right)} = 1,62 \end{aligned}$$

- De stootkortsluitstroom van de eerste tak is dus:

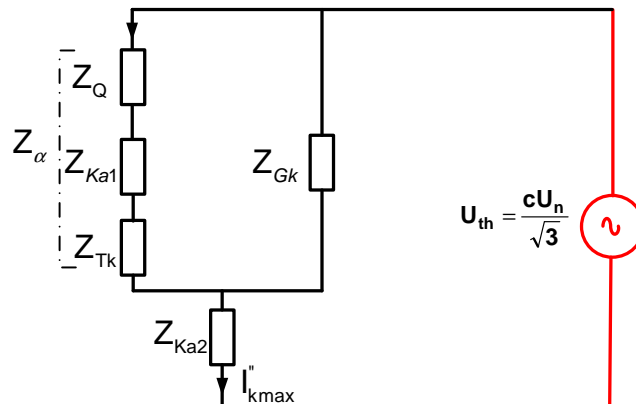
$$i_{pG} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{kG} = 1,62 \cdot \sqrt{2} \cdot 5,95 [kA] = 13,8 [kA]$$

De totale stootkortsluitstroom bij sluiting F1 is dus:

$$i_{p\max} = i_{p\alpha} + i_{pG} = 48,34 + 13,8 = \boxed{62,14 [kA]}$$

Kortsluiting op F2:

Eerst wordt het vervangingschema opgesteld:



De volgende impedanties zijn al eerder berekend namelijk:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_\alpha &= \underline{Z}_{QKa1(400V)} + \underline{Z}_{Tk} = (0,00024 + j0,00049) + (0,002646 + j0,00985) \\ &= 0,002886 + j0,01034 [\Omega] \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{Gk} = 0,006339 + j0,0422 [\Omega]$$

De impedantie van de tweede kabel (Z_{ka2}) moet nog berekend worden:

$$R_{Ka2} = \frac{r_{Ka2} \cdot L}{p} = \frac{0,0754 \cdot 0,115 [km]}{1} = 0,00867 [\Omega]$$

$$X_{Ka2} = \frac{x_{Ka2} \cdot L}{p} = \frac{0,0798 \cdot 0,115 [km]}{1} = j0,00918 [\Omega]$$

p: aantal parallelle kabels

$$\underline{Z}_{Ka2} = R_{Ka2} + jX_{Ka2} = 0,00867 + j0,00918 [\Omega]$$

De impedantie Z_α en Z_G zijn parallel aangesloten. De totale impedantie daarvan is dus:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_\beta &= \underline{Z}_\alpha // \underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_\alpha \cdot \underline{Z}_G}{\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_G} = \frac{(0,002886 + j0,01034) \cdot (0,006339 + j0,0422)}{(0,002886 + j0,01034) + (0,006339 + j0,0422)} [\Omega] \\ &= 0,00208 + j0,0082 [\Omega] \end{aligned}$$

De totale impedantie bij sluiting F2 is dus:

$$\underline{Z}_u = \underline{Z}_\beta + \underline{Z}_{Ka2} = (0,00208 + j0,0082) + (0,00867 + j0,00918) = 0,0107 + j0,01738 [\Omega]$$

$$|\underline{Z}_u| = \sqrt{0,0107^2 + 0,01738^2} = 0,0204 [\Omega]$$

De totale 3-fasen symmetrische kortsluitstroom (I''_{kmax}) bij sluiting F2 is:

$$I''_{kmax} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_u} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,0204} = \boxed{12,45 [kA]}$$

De totale stootkortsluitstroom ($i_{p\max}$) bij sluiting F2 is:

$$i_{p\max} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k\max}''$$

De totale impedantie is: $Z_u = 0,0107 + j0,01738[\Omega]$

De stootfactor (κ) kan volgens als volgt berekend worden:

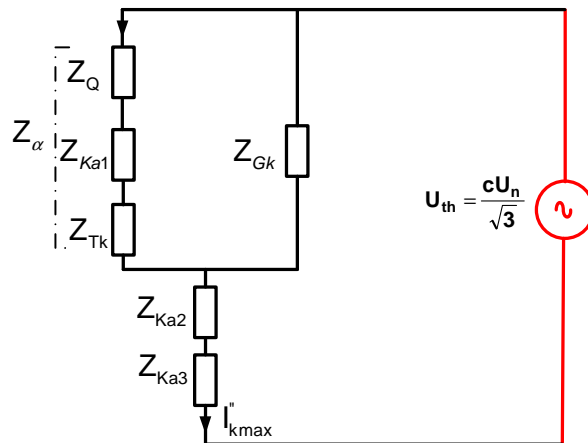
$$\begin{aligned}\kappa &= 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \\ &= 1,02 + 0,98e^{-3\left(\frac{0,0107}{0,01738}\right)} = 1,17\end{aligned}$$

De stootkortsluitstroom is dus:

$$i_{p\max} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k\max}'' = 1,17 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,45[kA] = \boxed{20,60[kA]}$$

Kortsluiting op F3

Eerst wordt het vervangingsschema opgesteld:



De impedantie van de tweede kabel (Z_{ka2}) moet nog berekend worden:

$$R_{Ka3} = \frac{r_{Ka3} \cdot L}{p} = \frac{0,387 \cdot 0,035 [km]}{1} = 0,01354 [\Omega]$$

$$X_{Ka3} = \frac{x_{Ka3} \cdot L}{p} = \frac{0,0848 \cdot 0,035 [km]}{1} = j0,00297 [\Omega]$$

p: aantal parallelle kabels

$$\underline{Z}_{Ka3} = R_{Ka3} + jX_{Ka3} = 0,01354 + j0,00297 [\Omega]$$

De totale impedantie is dus:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_h &= \underline{Z}_u + \underline{Z}_{Ka3} = (0,0107 + j0,01738) + (0,01354 + j0,00297) [\Omega] \\ &= 0,0242 + j0,020 \end{aligned}$$

$$|\underline{Z}_h| = \sqrt{0,0242^2 + 0,020^2} = 0,0314 [\Omega]$$

De totale 3-fasen symmetrische kortsluitstroom (I''_{kmax}) bij sluiting F3is:

$$I''_{kmax} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_h} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,0314} = \boxed{8,09 [kA]}$$

De totale stootkortsluitstroom ($i_{p\max}$) bij sluiting F3 is:

$$i_{p\max} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k\max}''$$

De totale impedantie is: $Z_h = 0,0242 + j0,020[\Omega]$

De stootfactor (κ) kan volgens als volgt berekend worden:

$$\begin{aligned}\kappa &= 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \\ &= 1,02 + 0,98e^{-3\left(\frac{0,020}{0,0242}\right)} = 1,10\end{aligned}$$

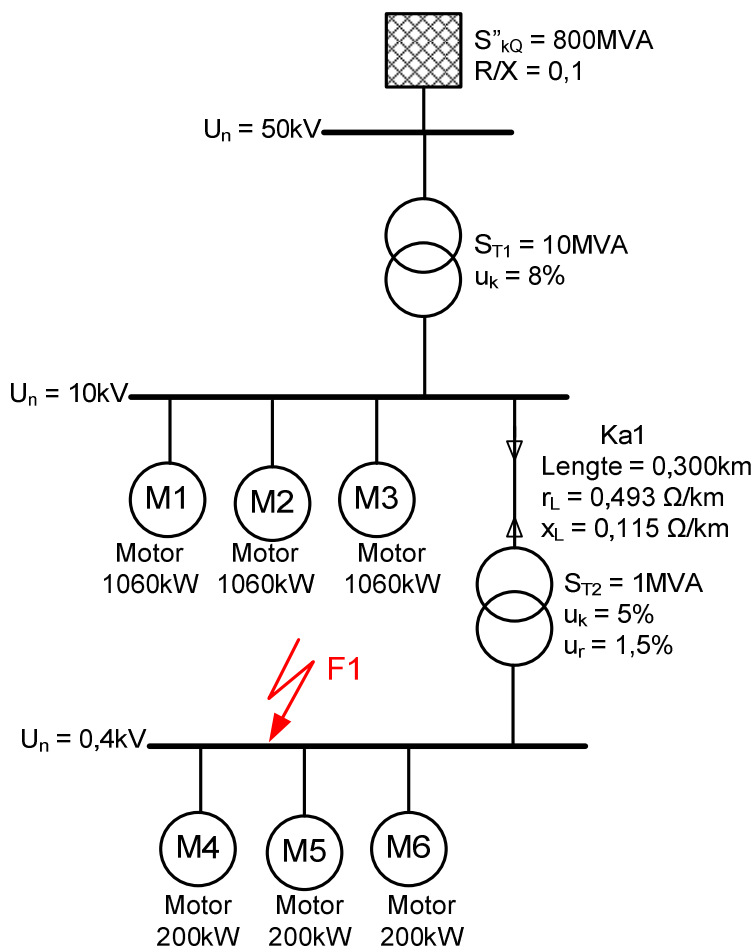
De stootkortsluitstroom is dus:

$$i_{p\max} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k\max}'' = 1,10 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,09[kA] = \boxed{12,58[kA]}$$

6.3 Voorbeeld 3

Gegevens:

In het onderstaande schema zijn drie hoogspanningsmotoren van elk 1,06 MW en drie laagspanningsmotoren van 200kW opgenomen.

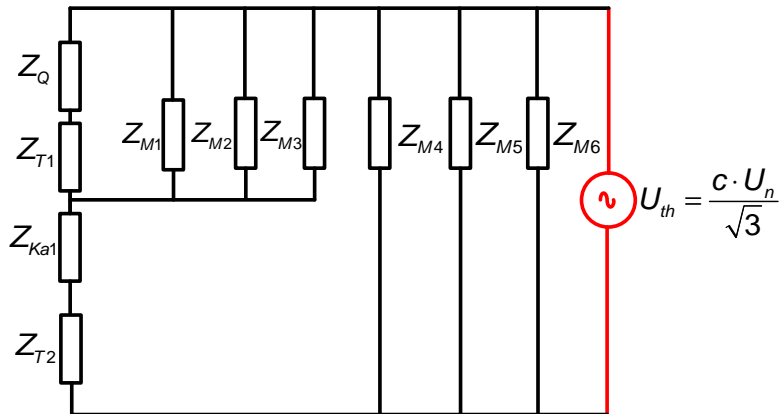


Gevraagd:

Bereken de 3-fasen symmetrische kortsluitstroom op F1

Uitwerking:

Eerst wordt het vervangingschema opgesteld:



Daarna wordt de inwendige impedantie van de componenten berekend:

1) Netvoeding (Z_Q) aan de 50kV zijde:

De netimpedantie aan de 50kV zijde:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot (50 \cdot 10^3)^2}{800 \cdot 10^6} = 3,4375 [\Omega]$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R/X)^2}} = \frac{3,4375}{\sqrt{1 + (0,1)^2}} = j3,420 [\Omega]$$

$$R_Q = (R/X) \cdot X_Q = 0,1 \cdot 3,420 = 0,3420 [\Omega]$$

$$\underline{Z}_Q = 0,3420 + j3,420 [\Omega]$$

Netimpedantie (Z_Q) aan de 0,4kV zijde:

$$\underline{Z}_{Q(400V)} = Z_Q \cdot \left(\frac{U_s}{U_p} \right)^2 = (0,3420 + j3,420) \cdot \left(\frac{0,4kV}{50kV} \right)^2 = 0,000021 + j0,00021 [\Omega]$$

2) Transformator (X_{T1})

$$X_{T1} = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{8\%}{100\%} \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{10 \cdot 10^6} = j0,8 [\Omega]$$

Transformator impedantie (Z_{T1}) aan de 0,4kV zijde:

$$X_{T1(400V)} = X_Q \cdot \left(\frac{U_s}{U_p} \right)^2 = 0,8 \cdot \left(\frac{0,4kV}{10kV} \right)^2 = j0,00128 [\Omega]$$

Impedantie correctiefactor K_T kan niet berekend worden omdat de u_r niet bekend is.

3) Kabel 1 (Z_{Ka1}) aan de 10kV zijde:

$$R_{Ka1} = \frac{r_{Ka1} \cdot L}{p} = \frac{0,493 \cdot 0,300 [km]}{1} = 0,1479 [\Omega]$$

$$X_{Ka1} = \frac{x_{Ka1} \cdot L}{p} = \frac{0,115 \cdot 0,300 [km]}{1} = j0,345 [\Omega]$$

p: aantal parallelle kabels

$$\underline{Z}_{Ka1} = R_{Ka1} + jX_{Ka1} = 0,1479 + j0,345 [\Omega]$$

Kabel impedantie van (Z_{Ka1}) aan de 0,4kV zijde:

$$\underline{Z}_{Ka1(400V)} = Z_{Ka1} \cdot \left(\frac{U_s}{U_p} \right)^2 = (0,1479 + j0,345) \cdot \left(\frac{0,4kV}{10kV} \right)^2 = 0,00023 + j0,00055 [\Omega]$$

4) Transformator (Z_{T2})

$$X_{T2} = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = \frac{5\%}{100\%} \cdot \frac{(400)^2}{1 \cdot 10^6} = j0,008 [\Omega]$$

$$u_X = \sqrt{u_k^2 - u_R^2} = \sqrt{(5)^2 - (1,5)^2} = 4,77\%$$

$$R_{T2} = \frac{u_R}{100\%} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = \frac{4,77\% \cdot (400)^2}{100\% \cdot (1 \cdot 10^6)} = 0,0076 [\Omega]$$

$$\underline{Z}_{T2} = R_T + jX_T = 0,0076 + j0,008 [\Omega]$$

Impedantie correctiefactor K_T toepassen:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot u_X} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0477} = 1,01$$

$$\underline{Z}_{T2k} = K_T \cdot \underline{Z}_T = 1,01 \cdot (0,0076 + j0,008) = 0,00767 + j0,00808 [\Omega]$$

5) Parallele hoogspanningsmotoren (Z_{M1} t/m Z_{M3})

Voor de hoogspanningsmotor zijn de onderstaande gegevens bekend:

$$\begin{array}{lll} P_{af} = 1060[\text{kW}] & U_{nom} = 10[\text{kV}] & R_M/X_M = 0,42 \\ \text{Rendement } \eta = 96,7 \% & \cos\phi = 0,86 & I_a/I_n = 5,5 \end{array}$$

Eerst wordt het afgegeven(mechanische) vermogen van de motor omgezet in opgenomen (elektrisch)vermogen:

$$P_{op} = \frac{P_{af}}{\eta} = \frac{1060[\text{kW}]}{0,967} = 1096[\text{kW}]$$

Daarna wordt het schijnbare vermogen als volgt uitgerekend:

$$\begin{aligned} P_{op} &= S \cdot \cos\phi \\ S &= \frac{P_{op}}{\cos\phi} = \frac{1096[\text{kW}]}{0,86} = 1275[\text{kVA}] \end{aligned}$$

Vervolgens wordt de motor reactantie berekend voor de spanning op de foutplaats:

$$\begin{aligned} Z_{HS_M} &= \frac{I_n \cdot U_n^2}{I_a \cdot S} \\ &= \frac{1 \cdot (10 \cdot 10^3)^2}{5,5 \cdot 1275 \cdot 10^3} = 14,260[\Omega] \end{aligned}$$

Aan de 0,4kV zijde wordt deze impedantie:

$$Z_{HS_M(400V)} = X_{HS_M} \cdot \left(\frac{U_s}{U_p} \right)^2 = 14,260 \cdot \left(\frac{0,4\text{kV}}{10\text{kV}} \right)^2 = 0,0228[\Omega]$$

Voor 3 motoren parallel geldt: $0,0228 / 3 = 0,0076 [\Omega]$

Volgens de IEC60909 mag de weerstandswaarde niet verwaarloosd worden. Bij groep van motoren geldt de volgende verhouding: $R_M/X_M = 0,42$

$$X_{HS_M} = \frac{Z_{HS_M(400V)}}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} = \frac{0,0076}{\sqrt{1 + (0,42)^2}} = j0,0070[\Omega]$$

$$R_{HS_M} = (R_M/X_M) \cdot X_{HS_M} = 0,42 \cdot 0,0070 = 0,00294 [\Omega]$$

$$\underline{Z}_{HS_M} = R + jX = 0,00294 + j0,0070 [\Omega]$$

6) Parallele laagspanningsmotoren (Z_{M4} t/m Z_{M6})

Voor laagspanningsmotoren zijn de onderstaande gegevens bekend:

$$\begin{array}{lll} P_{af} = 200[\text{kW}] & U_{nom} = 400[\text{V}] & R_M/X_M = 0,42 \\ \text{Rendement } \eta = 90 \% & \cos\phi = 0,8 & I_a/I_n = 7 \end{array}$$

Eerst wordt het afgegeven (mechanische) vermogen van de motor omgezet in opgenomen (elektrisch) vermogen:

$$P_{op} = \frac{P_{af}}{\eta} = \frac{200}{0,90} = 222[\text{kW}]$$

Daarna wordt het schijnbare vermogen als volgt uitgerekend:

$$\begin{aligned} P_{op} &= S \cdot \cos\phi \\ S &= \frac{P_{op}}{\cos\phi} = \frac{222}{0,8} = 277[\text{kVA}] \end{aligned}$$

Vervolgens wordt de motor impedantie berekend voor de spanning op de foutplaats:

$$\begin{aligned} Z_{LS_M} &= \frac{I_n \cdot U_n^2}{I_a \cdot S} \\ &= \frac{1}{7} \cdot \frac{400^2}{277 \cdot 10^3} = 0,00825 [\Omega] \end{aligned}$$

Voor 3 motoren parallel geldt: $0,00825 / 3 = 0,00275 [\Omega]$

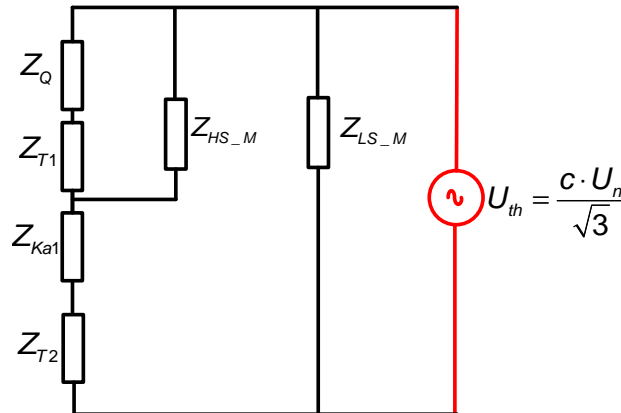
Volgens de IEC60909 mag de weerstandswaarde niet verwaarloosd worden. Bij groep van motoren geldt de volgende verhouding: $R_M/X_M = 0,42$

$$X_{LS_M} = \frac{Z_{LS_M}}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} = \frac{0,00275}{\sqrt{1 + (0,42)^2}} = j0,00253 [\Omega]$$

$$R_{LS_M} = (R_M/X_M) \cdot X_{LS_M} = 0,42 \cdot 0,00253 = 0,00106 [\Omega]$$

$$\underline{Z}_{LS_M} = R + jX = 0,00106 + j0,00253 [\Omega]$$

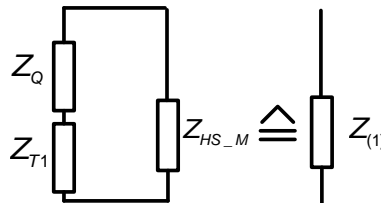
Het vervangingschema kan nu als volgt vereenvoudigd worden:



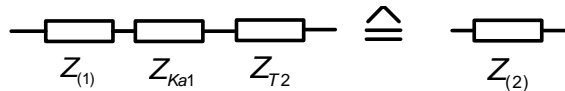
Hierboven is te zien dat de totale impedantie van de hoogspanningsmotoren in het vervangingschema wordt opgenomen als één parallelle tak en dat geldt ook voor de laagspanningsmotoren.

Alle impedanties zijn nu bekend. De totale impedantie kan in stappen berekend worden:

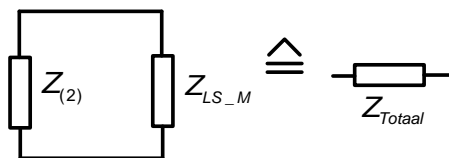
$$1. \quad Z_{(1)} = (Z_Q + Z_{T1}) // Z_{HS_M} = (0,000021 + j0,00021 + j0,00128) // (0,00294 + j0,0070) \\ = 0,000128 + j0,00128 \text{ [\Omega]}$$



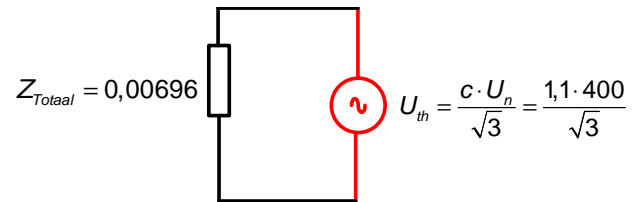
$$2. \quad Z_{(2)} = Z_{(1)} + Z_{Ka1} + Z_{T2} = (0,000128 + j0,00128 + 0,00023 + 0,000055 + 0,00767 + j0,00808) \\ = 0,00264 + j0,00893 \text{ [\Omega]}$$



$$3. \quad Z_{Totaal} = Z_{(2)} // Z_{LS_M} = (0,00264 + j0,00893) // (0,00106 + j0,00253) \\ = 0,00216 + j0,00662 \text{ [\Omega]} = 0,00696 \text{ [\Omega]}$$



De totale 3-fasen symmetrische kortsluitstroom ($I''_{k\max}$) bij sluiting F3 is:



$$I''_{k\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{Totaal}} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,00696} = \boxed{36,49 \text{ [kA]}}$$

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Dit verslag vormt een bruikbare basis voor de cursus “Kortsluitstroom berekeningen in midden- en laagspanningsnetten”. Met dit cursusboek kunnen de cursisten duidelijk worden gemaakt hoe de kortsluitberekeningen op een eenvoudige manier handmatig uitgevoerd kunnen worden. Het ontwikkelde simulatieprogramma laat duidelijk zien hoe de kortsluitstroom zich kan gedragen bij verschillende inschakelmomenten en R/X verhoudingen.

Er zijn weinig boeken te vinden die het toepassen van de correctiefactoren grondig verklaren en toelichten. Dit cursusboek is dus uniek en biedt een onmisbare basis voor de IEC60909-norm

7.2 Aanbevelingen

Als wordt gekeken naar de onderdelen die in de module “Kortsluitstroom berekeningen in midden- en laagspanningsnetten” behandeld hadden moeten worden, dan blijkt dit te hoog te zijn ingeschat voor de beperkte tijd van de afstudeerperiode. Oorspronkelijk was het de bedoeling onderstaande onderwerpen te behandelen:

- Symmetrische kortsluitberekeningen.
- Loadflow berekeningen
- Asymmetrische kortsluitberekeningen.

Er is tijdig het besluit genomen om alleen de symmetrische kortsluitberekeningen te behandelen. Deze berekeningen geven het meeste inzicht en vormen ook het grootste onderdeel van deze cursus.

8 Literatuurlijst

- [1] International Electrotechnical Commission IEC60909-0, Geneva, 2001
- [2] International Electrotechnical Commission IEC60909-1, Geneva, 2001
- [3] M.J.Hoeijmaers, Elektrische omzettingen, Delft, 1999
- [4] Gerwin van Dijk, Cursus H-KB Siemens training, Den Haag, 2011
- [5] Stefan Sterkenburg, Kortsluitstroomberekeningen, Arnhem, 2011
- [6] E.de Jongh, Kortsluitstroom, Arnhem,2008
- [7] Marnix Vindevogel, De regeling van de synchrone motor, Delft, 2009
- [8] www.energik.be/belcogen/4.2.1.html
- [9] J.Rijsenbrij, Moderne elektrische aandrijvingen in de transporttechniek, Delft, 1999
- [10] Wikipedia /ankerreactantie

9 Bijlagen

9.1 IEC60909 formules

Component	Kortsluitimpedantie	Impedantie correctiefactor
Netvoeding	$Z_Q = c \cdot \frac{U_n^2}{S_{kQ}''}$ $X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}}$ $R_Q = \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right) \cdot X_Q$	
Generator	$X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_G^2}{S_{nG}}$ $R_{Gf} = \left(\frac{R_{GF}}{X_d''}\right) \cdot X_d''$	$K_G = \frac{U_n}{U_G} \cdot \frac{c_{\max}}{(1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_G)}$
Transformator	$Z_T = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_T^2}{S_{nT}}$ $R_T = \frac{u_R}{100\%} \cdot \frac{U_T^2}{S_{nT}} = \frac{P_T}{3I_T^2}$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$	$K_T = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T}$
Asynchrone motor	$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_M} \cdot \frac{U_M^2}{P_M / (\eta_M \cdot \cos \varphi_M)}$ $X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_M}{X_M}\right)^2}}$ $R_M = \left(\frac{R_M}{X_M}\right) \cdot X_M$	
Kabel	$R_L = \frac{r_L \cdot L}{P}$ $X_L = \frac{x_L \cdot L}{P}$	

9.2 Gebruikte afkortingen

I''_k	Sub-transiënte kortsluitstroom [kA]
I'_k	Transiënte kortsluitstroom [kA]
I_k	Stationaire kortsluitstroom [kA]
I_s	Stootkortsluitstroom/ piek-kortsluitstroom [kA]
I_a	Aanloopstroom [A]
i_{dc}	Gelijkstroomcomponent van de kortsluitstroom.
A	Beginwaarde van de gelijkstroomcomponent (i_{dc})
I_n	Nominale stroom [A]
S''_k	Kortsluitvermogen [MVA]
S_n	Nominaal vermogen [MVA]
U_n	Nominale spanning [kV]
u_k	Kortsluitspanning [%]
R	Ohmse weerstand [Ω]
X	Inductieve weerstand [Ω]
Z	Impedantie [Ω]
X''_d	Sub-transiënte reactantie [[Ω]
X'_d	Transiënte reactantie [[Ω]
X_d	Synchrone reactantie [[Ω]
c	Spanningscorrectiefactor
K_G	Impedantie correctiefactor voor de generator
K_T	Impedantie correctiefactor voor de transformator
p	Aantal poolparen
τ	Tijdconstante van de gelijkstroomcomponent
T''_d	Tijdconstante van het sub-transiënte deel
T'_d	Tijdconstante van het transiënte deel
k	stootfactor

