

PHASE TO PHASE

Kortsluitberekeningen met Vision Mogelijkheden en achtergronden

01-115 pmo
23-4-2001

Phase to Phase BV
Utrechtseweg 310
Postbus 100
6800 AC Arnhem
T: 026 356 38 00
F: 026 356 36 36
www.phasetophase.nl

INHOUD

1	Mogelijkheden	3
1.1	IEC 909	3
1.1.1	De correctiefactor c	5
1.1.2	De correctiefactor K_G	5
1.1.3	De correctiefactor κ	6
1.1.4	De correctiefactoren μ en q	6
1.2	Sequentiële Storingsanalyse	6
2	De methodes volgens IEC 909 en Sequentiële Storingsanalyse vergeleken	8
Bijlage A IEC 909 Correctie op Step-Up transformator		
Bijlage B Storing Sequentieel: Modelling		
Bijlage C Bijdrage van een generator aan de kortsluitstroom		

1 MOGELIJKHEDEN

In Vision zijn twee manieren geïmplementeerd om de kortsluitstroom te berekenen:

- IEC 909
- Sequentiële Storingsanalyse

De kortsluitberekening volgens IEC 909 is van oorsprong een handberekening en is gebaseerd op een aantal aannames. De werkelijke belasting, opwekking en spanningen vóór de fout zijn niet van invloed op de berekening. Om de berekening hanteerbaar te houden, zijn omgevingsparameters zodanig in factoren ondergebracht, dat altijd een zekere veiligheidsmarge in de resultaten aanwezig is. Hierom zal de methode volgens IEC in de meeste gevallen een ongunstiger beeld geven dan de berekening volgens de Sequentiële Storingsanalyse.

De Sequentiële Storingsanalyse berekent alle kortsluitstromen en spanningen, uitgaande van de pre-fault condities, zoals belasting, opwekking en spanningsverdeling in het net. Alle actuele instellingen en waarden worden in de berekening meegenomen. Deze methode is in principe omvangrijk en daarom alleen geschikt voor berekening met een computerprogramma en niet geschikt voor berekening met de hand.

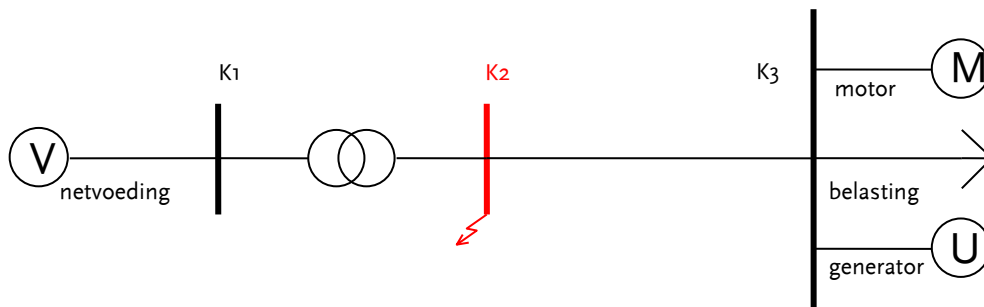
In het volgende worden beide methodes kort beschreven.

1.1 IEC 909

De eerstgenoemde methode, volgens de internationaal erkende standaard IEC 909, is in principe een methode die met eenvoudige handberekeningen is uit te voeren. Dat houdt in dat geen ingewikkelde systeembenadering gevolgd wordt. De methode is gebaseerd op een rechttoe benadering, waar enkele veiligheidsmarges zijn ingebouwd. Hierom is de methode volgens IEC 909 in principe een worst case benadering. Het mag namelijk niet zo zijn dat door het vereenvoudigen van de berekening een net te krap gedimensioneerd gaat worden.

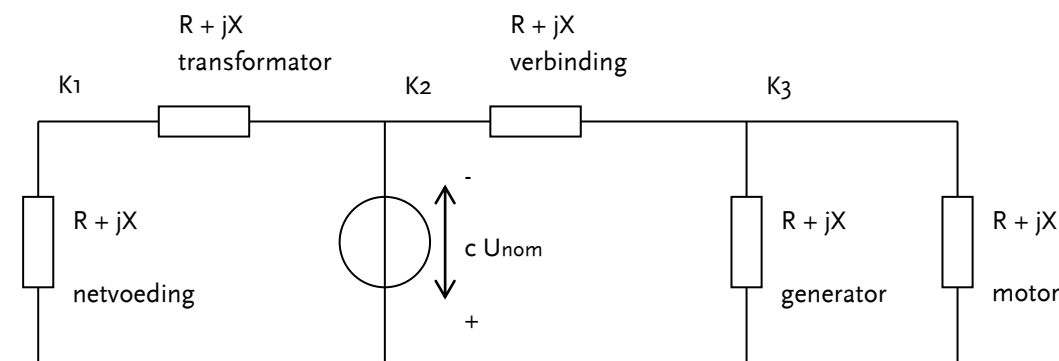
De methode volgens IEC 909 werkt met zo weinig mogelijk parameters, om de mogelijkheid tot fouten te reduceren. Zo zijn de dwarselementen, waaronder belastingen, verwaarloosd. IEC 909 is een vereenvoudigde rekenmethodiek, met als basis de superpositiemethode. Dat houdt in dat alle actieve spanningsbronnen in het hele net, afkomstig van voedingen en opwekkers, gelijk aan nul gemaakt worden en dat op de plaats waarvan de kortsluiting wordt onderzocht een vervangende spanningsbron wordt aangesloten. In deze methode wordt gesteld dat alle spanningen in het net vóór de fout gelijk zijn aan de nominale waarde. De werkelijke toestand, bepaald door de loadflow, heeft dus geen enkele invloed op de grootte van de kortsluitstroom.

Onderstaand diagram illustreert de modellering van een kortsluiting volgens IEC 909 in Vision. Op het punt direct achter de transformator wordt een kortsluiting gesimuleerd.



Figuur 1 Berekening van een kortsluiting in Vision.

Het volgende diagram geeft de modellering van deze kortsluitberekening weer. De actieve spanningsbronnen van de netvoeding op K1 en van de generator op K3 zijn vervangen door hun impedanties. De motor is vervangen door een impedantie en levert dus geen bijdrage aan de kortsluitstroom. De belasting is zelfs helemaal niet gemodelleerd. De kortsluiting wordt gerepresenteerd door een spanningsbron ter grootte van de nominale waarde, gecorrigeerd met een factor c.



Figuur 1 Modellering volgens IEC 909

De methode volgens IEC 909 is vrij gedetailleerd beschreven. De methode biedt voor een groot aantal praktijksituaties een mogelijkheid voor modellering. Ten behoeve van de implementatie in Vision zijn keuzes gemaakt en zijn niet alle mogelijkheden van IEC 909 ingebracht. Bijvoorbeeld niet:

- generator samen met step-up transformator (PSU, power station unit)
- stationaire kortsluitstroom I_k (van synchrone machines)

Aan de andere kant is wel een voorziening ingebouwd voor een “step-up-trafo”, die gecorrigeerd wordt voor enkele zaken, die samenhangen met de “power station unit”. IEC gaat ervan uit dat de spanning op de “klemmen” van de centrale, aan het begin van het net, constant is. Dat betekent dus dat de spanning achter de eventuele step-up transformator constant is, en niet de spanning tussen de generator en de step-up transformator. Het doel is een goede benadering te verkrijgen voor de partiele kortsluitstromen bij generatoren en centrales, ook bij kortsluitingen dicht bij de voeding. In de bijlagen bij IEC 909 is aangetoond dat het toepassen van de correctiefactor een goede benadering oplevert. Zie ook bijlage A.

Omdat de actuele toestand van het net er niet toe doet, zijn in de methode enkele correctiefactoren aangebracht. Enkele factoren zijn de spanningsfactor c en de factor voor de impedantie van de synchrone machines K_G . De

piekstroom i_p en de uitschakelstroom I_b worden berekend uit de subtransiënte kortsluitstroom I_k'' en door de factoren κ (kappa) en μ (mu) volgens:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad \text{en}$$

$$I_b = \mu I_k''$$

In het onderstaande wordt kort ingegaan op het berekenen van de piekstroom i_p . Deze berekening vereist correcties voor de weerstanden van de synchrone en asynchrone machines. Die correcties zijn in Vision aangebracht conform IEC 909.

1.1.1 DE CORRECTIEFACTOR C

De methode gaat weliswaar uit van een vereenvoudigd beeld van de werkelijkheid. Maar dat houdt niet in dat een verkeerd beeld mag worden verkregen. Een aantal verwaarlozingen wordt daarom op voorhand ingebracht in correctiefactoren. De factor c corrigeert de hoogte van de spanning van de bron die op de foutplaats is aangebracht. De factor houdt rekening met:

- spanningsvariatie in tijd en plaats
- van hoofdinstelling afwijkende trapstand van transformatoren
- verwaarlozing belastingen
- verwaarlozing lijn- en kabelcapaciteiten
- transiënt gedrag machines.

De spanningsbron op de foutplaats wordt berekend volgens:

$$U_{fout} = c U_{nom} / \sqrt{3}$$

De actuele waarde van de factor c wordt bepaald door de keuze of de maximale of de minimale kortsluitstromen moeten worden berekend. In die gevallen wordt c bepaald door respectievelijk c_{max} of c_{min} .

Bovendien is de waarde van c afhankelijk van het spanningsniveau. Voor de diverse nominale netspanningen gebruikt Vision conform IEC 909 de onderstaande waarden:

Nominale spanning U_{nom}	Correctiefactor c voor de berekening van:	
	maximale kortsluitstroom c_{max}	minimale kortsluitstroom c_{min}
230 V / 400 V	1.00	0.95
400 V tot 1000 V	1.05	1.00
1 kV tot 35 kV	1.10	1.00
35 kV tot 230 kV	1.10	1.00

1.1.2 DE CORRECTIEFACTOR K_G

Voor het berekenen van de driefasen initiële symmetrische kortsluitstroom in netten die worden gevoed door generatoren zonder step-up transformatoren, bijvoorbeeld in industrienetten of laagspanningsnetten, moet de generatorimpedantie worden gecorrigeerd. IEC 909 geeft daar een formule voor. De correctiefactor K_G houdt rekening met de voorbelasting van de generator. De correcties op de weerstanden van de synchrone en asynchrone machines introduceren fictieve weerstanden en zorgen voor zo goed mogelijke waarden voor de factor κ .

1.1.3 DE CORRECTIEFACTOR κ

De factor κ houdt rekening met de stroomdaling door de gelijkstroom- en subtransiënte tijdconstante in de eerste halve periode en wordt bepaald uit een curve $\kappa = f(0,4 R / X)$, bij 20 Hz, aan de foutplaats (IEC 909, methode C).

1.1.4 DE CORRECTIEFACTOREN μ EN q

De factoren μ en q houden rekening met de daling van de stroomsterkte tussen de momenten van kortsluiten en uitschakelen. Deze daling wordt onder andere veroorzaakt door:

- de subtransiënte tijdconstante (en de spanningsregeling)
- uitlopen van de asynchrone machines.

De correctiefactor μ is een functie van machinestroom en uitschakeltijdstip. De correctiefactor q is een functie van het machinevermogen per poolpaar en van het uitschakeltijdstip (alleen voor asynchrone machines). Deze functies zijn beschreven in IEC 909. Voor deze correctiefactoren geldt overigens:

- $\mu = 1$ als er geen machines zijn of voor een machinestroom kleiner dan 2 p.u.
- $\mu = 1$ en $q = 1$ voor vermaasde netten.

1.2 Sequentiële Storingsanalyse

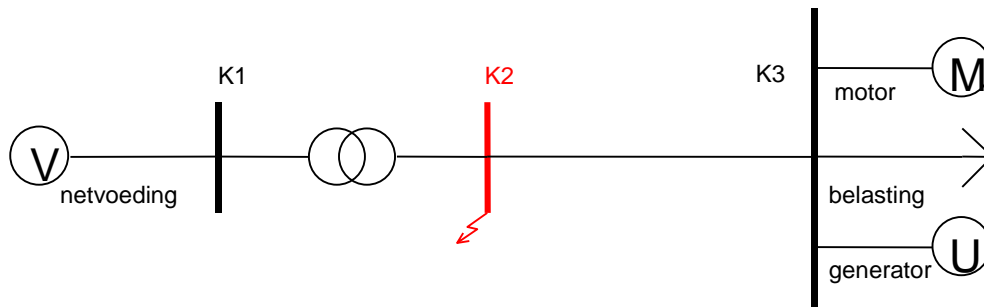
Omdat in de methode volgens IEC 909 veel verwaarlozingen zijn ingebouwd en gecorrigeerd, geeft die methode in de meeste gevallen een wat pessimistische kijk. Omdat veel ontwerpers moeten refereren aan een internationaal erkende standaard, heeft de methode volgens IEC 909 vaak de voorkeur. In enkele gevallen is het voor de ontwerper interessant om precies te weten hoe het net zich gedraagt in bijzondere gevallen, bijvoorbeeld in een complex net of in de gevallen dat bijzondere opwekkers of machines aanwezig zijn. Een methode die gebaseerd is op de werkelijke belastingssituatie en die de invloed van diverse componenten in het net meeneemt, geeft dan extra informatie. De invloed van het al dan niet aanwezig zijn van specifieke componenten kan zo onderzocht worden.

De in Vision geïmplementeerde methode van de “Sequentiële Storingsanalyse” gaat uit van de door de loadflow bepaalde situatie van vóór de kortsluiting. De netvoeding en de asynchrone machines zijn in de methode gemodelleerd als een spanningsbron achter de betreffende kortsluitimpedantie. De synchrone machines zijn gemodelleerd als een spanningsbron achter de betreffende subtransiënte reactantie. De actuele waarde van een belasting wordt omgerekend naar een constante impedantie. Ook eventuele dwarselementen, zoals shunts en capaciteiten, doen gewoon mee in de berekening.

De methode heet “Sequentieel” omdat het mogelijk is om successievelijk meer dan één fout te simuleren. Het komt namelijk voor dat in de wat oudere netten een kortsluiting een fout op een andere plaats inleidt. Bovendien is het met de methode mogelijk om ook andere dan botte kortsluitingen te berekenen. De foutimpedantie in kortsluiting kan bij de berekening worden opgegeven.

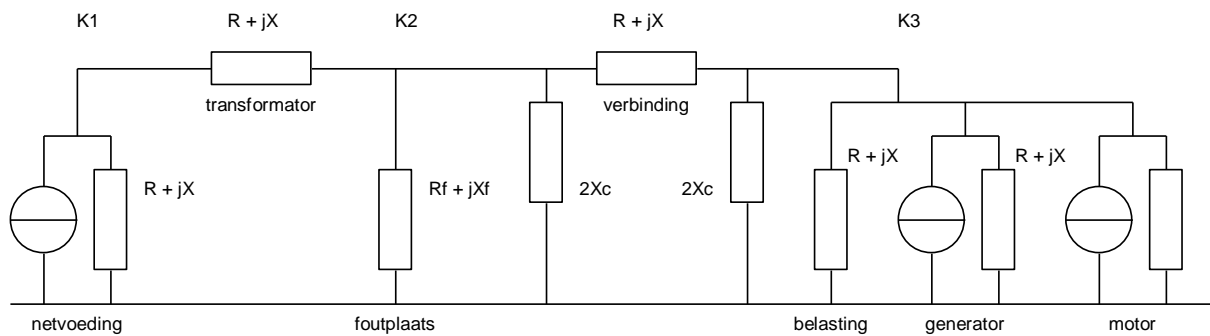
De methode maakt geen gebruik van correctiefactoren.

In de volgende figuur is een eenvoudig Vision netwerk weergegeven dat bestaat uit drie knooppunten. Knooppunt K1 is verbonden met de netvoeding en knooppunt K3 bevat een belasting, een generator en een motor. Op knooppunt K2 wordt een symmetrische storing verondersteld met een foutimpedantie $R_f + jX_f$.



Figuur 3 Netwerk in Vision met storing op knooppunt K1

In Vision wordt voor de sequentiële storingsanalyse het netwerk uit deze figuur vervangen door het netwerk zoals weergegeven in de volgende figuur.



Figuur 4 Modelling van het netwerk voor de sequentiële storingsanalyse

Netvoeding, generator en motor zijn vervangen door een Norton equivalent, waarbij is uitgegaan van een door een loadflow bepaalde "pre-fault" spanning. Op welke wijze R en X van de componenten worden bepaald, staat beschreven bij de componentbeschrijvingen.

Op knooppunt K2 is de symmetrische storing aangebracht in de vorm van een impedantie $R_f + jX_f$.

Met de sequentiële storingsanalyse wordt de subtransiënte kortsluitstroom I_k op elke aangegeven foutplaats berekend. Daarnaast worden alle spanningen, tak- en elementstromen berekend. Stromen en spanningen kunnen zowel complex als absoluut per fase (a, b, c) of per systeem (homopolair, normaal, invers) worden weergegeven.

In bijlage B zijn enkele uitgangspunten beschreven voor de modellering van de componenten.

2 DE METHODES VOLGENS IEC 909 EN SEQUENTIËLE STORINGSANALYSE VERGELEKEN

In dit hoofdstuk worden beide methodes met elkaar vergeleken. Het is niet zo, dat een methode beter zou zijn dan de andere. Elke toepassing vereist een eigen specifieke benadering. De methode volgens IEC 909 is eenvoudiger, is daardoor minder gevoeliger voor modelleringsfouten en is meestal pessimistischer. De methode volgens de “Sequentiële Storingsanalyse” is vollediger, geeft een berekeningsresultaat dat meer overeenkomt met de werkelijkheid en biedt meer mogelijkheden voor een grondige studie, maar is daardoor gevoeliger voor modelleringsfouten door de gebruiker.

Rekenmethode

IEC 909	Sequentiële Storingsanalyse
Ontstaan uit superpositie, echter zonder terug-superpositie. Daarom correcties (van bijvoorbeeld x_d). Vervangende spanningsbron aan foutplaats.	Op loadflow gebaseerd. Geen correctiefactoren toegepast.

Bij het vergelijken van de resultaten van een net, berekend met beide methodes, geeft in Vision de methode volgens IEC 909 inderdaad meestal grotere waarden voor de kortsluitstromen. Het kan echter wel voorkomen dat de kortsluitstroom volgens IEC 909 resulteert in een lagere waarde. In bijlage C is een voorbeeld opgenomen van een situatie met een decentrale opwekker, waar de berekening volgens IEC 909 lager uitkomt dan een berekening volgens de Sequentiële Storingsanalyse.

Netimpedantie

IEC 909	Sequentiële Storingsanalyse
$Z_Q = Z_1 = c U_{nQ}^2 / S_{kQ}$ $c = c_{min}$ of c_{max} en $S_{kQ} = S_{k_{min}}$ of $S_{k_{max}}$ Impedantiehoek afhankelijk van spannings-niveau $Z_2 = Z_1$ Z_o berekend uit I_{k3} / I_{k1} , zelfde impedantiehoek	$Z_Q = Z_1 = U_{nQ}^2 / S_{k_{nom}}$ Impedantiehoek afhankelijk van spanningsniveau $Z_2 = Z_1$ Z_o berekend uit I_{k3} / I_{k1} , zelfde impedantiehoek

Synchrone machine: reactanties

IEC 909	Sequentiële Storingsanalyse
normaal: correctie op x_d invers: correctie op $x_2 = (x_d + x_q) / 2$ *) homopolair: correctie op $x_d / 2$ (advies) *) *) correctiefactoren “under consideration” In Vision is $x_2 = x_1$ en $x_o = \infty$ (het sterpunt is zwevend).	normaal: opgegeven x_d invers: $x_2 = x_1 = x_d$ homopolair: $x_o = \infty$ (het sterpunt is zwevend)

Synchrone machine: weerstanden

IEC 909	Sequentiële Storingsanalyse
normaal: fictieve waarde invers: geen opgave *) homopolair: geen opgave *)	normaal: $R_1 = R_g$ (opgegeven waarde) invers: $R_2 = R_1$ homopolair: $R_o = \infty$

*) correctiefactoren "under consideration" In Vision is $R_2 = R_1$ en $R_o = \infty$	
--	--

Impedantie step-up transformator

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
correctie op u_k (in Vision "step up" aanvinken)	$Z = u_k$

Impedanties asynchrone machines

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
normaal: uit aanloopstroom; R_1 fictieve waarde invers: $Z_2 = Z_1$ homopolair: geen uitspraak, in Vision is $Z_o = \infty$	normaal: uit aanloopstroom, R_1 fictieve waarde invers: $Z_2 = Z_1$ homopolair: $Z_o = \infty$

Voedingen en asynchrone machines

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Achter kortsluitimpedantie kortgesloten. Asynchrone machines kunnen soms worden verwaarloosd. In Vision worden de asynchrone machines alleen bij berekening van minimale kortsluitstromen weggelaten.	Constante spanning achter kortsluitimpedantie. Invloed berekend uit loadflow.

Foutplaats

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Vervangende (fase-)spanningsbron: $c U_n / \sqrt{3}$	Foutimpedantie aangebracht

Foutimpedantie Z_{fout}

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Altijd $Z_{fout} = 0$	$Z_{fout} = 0$ en $Z_{fout} \neq 0$ mogelijk bij F-F-E ligt Z_{fout} tussen fasen en aarde bij F-F-F-E eveneens bij F-F-F tussen de fasen

Belastingen en shunts

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Verwaarloosd	Normaal en invers: constante impedantie Homopolair: $Z_o = \infty$

Lijn- en kabelcapaciteiten

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Verwaarloosd. In het geval van een zwevend of blusspoel geaard net wordt C_o niet verwaarloosd.	Niet verwaarloosd.

Hier is de methode volgens IEC 909 misleidend. In Vision wordt daarom altijd met C_o van lijnen en kabels rekening gehouden.

Vision-component "Transformatorbelasting"

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Verwaarloosd $Z_o = \infty$	Behandeld als gewone belasting. $Z_o = \infty$

Trapstand van de transformatoren

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Hoofdinstelling	Gekozen instelling

In Vision is de mogelijkheid ingebouwd om in de methode volgens IEC 909 af te wijken van de hoofdinstelling en met de gekozen instelling te rekenen.

Soorten sluitingen

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Alleen A-B-C, A-E, B-C en B-C-E. Alleen één fout tegelijk. Geen cross-country fout.	Alle soorten fouten mogelijk. Ook meervoudige sluitingen (sequentieel).

Berekening van de piekstroom i_p mogelijk?

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Ja, in een goede benadering.	Nee.

Berekening van de uitschakelstroom I_b mogelijk?

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Ja, in benadering.	Nee, tenzij I_k wordt genomen

Berekening van de spanningen in de kortgesloten situatie mogelijk?

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Nee, IEC 909 gaat alleen over stromen.	Ja.

Resultaten afhankelijk van de loadflow voor de fout?

<i>IEC 909</i>	<i>Sequentële Storingsanalyse</i>
Nee	Ja

Aardsluiting in een zwevend net.

De kortsluitberekening volgens IEC 909 levert in het geval van een aardsluiting in een zwevend net een juiste aardsluitstroom op, maar een onjuiste stroomverdeling. Dit is geen tekortkoming van Vision, maar een gevolg van de methode. Dat heeft onder andere te maken met het feit dat in de methode volgens IEC 909 de capaciteiten worden verwaarloosd. Eigenlijk zou in de methode met alle lijn- en kabelcapaciteiten moeten worden gerekend.

Indien de gebruiker de juiste stroomverdeling tijdens de kortsluiting wil weten, moet hij de methode van de Sequentiële Storingsanalyse van Vision toepassen. Dat mag, want de ontsnappingsclausule in IEC 909 staat toe bij bijzondere omstandigheden andere methodes te gebruiken die tenminste even nauwkeurige resultaten leveren.

BIJLAGE A IEC 909 CORRECTIE OP STEP-UP TRANSFORMATORIEC909-1, par 2.2.1

De IEC 909 berekening houdt geen rekening met de actuele spanning en stroom in het net. Er wordt gerekend met nominale spanningen. IEC introduceert hierom de c-factor voor:

- spanningsvariatie als gevolg van variërende tijd en plaats
- verandering van transformatortrapstanden
- niet modelleren van belastingen
- subtransiente gedrag van generatoren, elektriciteitscentrales en motoren.

IEC909-1, par 2.1.3

De equivalente spanningsbron $c U_{nom} / \sqrt{3}$ op de foutplaats is de enige actieve spanningsbron in het normale (positive sequence) systeem.

Alle netvoedingen, synchrone machines en asynchrone motoren worden kortgesloten achter hun interne (subtransiente) reactanties.

De factor c is geïntroduceerd om zo dicht mogelijk bij de werkelijke waarde te komen. De impedantiecorrecties volgens clausules 11.5.3.6/7/8 zijn dan nodig om realistische waarden te verkrijgen.

IEC909-1, par 2.1.4

IEC gaat ervan uit dat de spanning op de “klemmen” van de centrale, aan het begin van het net, constant is. Dat betekent dus dat de spanning achter de eventuele step-up transformator constant is, en niet de spanning tussen de generator en de step-up transformator.

IEC909-1, par 2.2.6

Het doel is een goede benadering te verkrijgen voor de partiele kortsluitstromen bij generatoren en centrales, ook bij kortsluitingen dicht bij de voeding. In de bijlagen bij IEC 909 is aangetoond dat het toepassen van de correctiefactor een goede benadering oplevert.

BIJLAGE B STORING SEQUENTIEEL: MODELLERING

Voor alle op een knooppunt aanwezige belastingen wordt voor loadflowberekeningen en sequentiële storingsanalyse de belasting gecorrigeerd met de gelijktijdigheidsfactor.

$$P_{\text{belasting,berekening}} = \text{Gelijktijdigheid} * P_{\text{belasting}}$$

$$Q_{\text{belasting,berekening}} = \text{Gelijktijdigheid} * Q_{\text{belasting}}$$

Bij loadflowberekeningen en de sequentiële storingsanalyse worden verbindingen en kabels voorgesteld volgens het pi-model. Aan de hand van de nominale stroom I_{nom} wordt bij loadflowberekeningen de verhouding I / I_{nom} berekend.

Bij asymmetrische kortsluitberekeningen en storingsanalyses is de inverse impedantie van de transformator gelijk aan de normale impedantie ($Z_1 = Z_2$).

Transformatoren met U-regeling worden voor de sequentiële storingsanalyse op dezelfde wijze gemodelleerd als transformatoren zonder U-regeling.

Bij de sequentiële storingsanalyse wordt de netvoeding voorgesteld als een Norton equivalent. De R / X verhouding van de bronimpedantie wordt op dezelfde wijze bepaald als bij een IEC 909 berekening. Voor het kortsluitvermogen van de netvoeding wordt daarbij in plaats van $I_k''_{\text{max}}$ of $I_k''_{\text{min}}$, uitgegaan van I_k'' .

Bij de sequentiële storingsanalyse wordt de synchrone generator voorgesteld als een Norton equivalent. Voor de bronimpedantie van dit equivalent geldt:

$$Z_{\text{generator}} = R_g + jX_d''$$

Voor de inverse impedantie geldt: $Z_2 = Z_1$.

De homopolaire impedantie Z_0 is oneindig bij een zwevend sterpunt en gelijk aan $3 R_e + j (3 X_e + 0.5 X_1)$ bij een geaard sterpunt.

De modellering van de synchrone generator met $\cos(\varphi)$ -regeling is gelijk aan de modellering van een synchrone generator met U-regeling.

De modellering van de synchrone motor is gelijk aan de modellering van een synchrone generator met U-regeling.

Bronimpedantie asynchrone generator:

Bij de sequentiële storingsanalyse wordt de asynchrone generator voorgesteld als een Norton equivalent. De bronimpedantie van dit equivalent wordt op dezelfde wijze bepaald als bij een IEC 909 berekening.

Bij IEC 909 berekeningen wordt een asynchrone generator voorgesteld als een passieve impedantie in de vorm van $R + jX$ naar aarde. Deze impedantie wordt bepaald aan de hand van de nominale spanning, de aanloopstroom, het nominale (mechanische) vermogen en het poolpaartal. In Vision wordt het vermogen elektrisch aangegeven zodat voor het elektrische vermogen geldt:

$$P_{e,\text{nom}} = P_{m,\text{nom}} * \text{Rendement}$$

Vervolgens wordt de generatorimpedantie bepaald volgens:

$$Z_{\text{generator}} = (U_{\text{nom,generator}})^2 / (I_a / I_{\text{nom}} * P_{e,\text{nom}} / \cos(\varphi)_{\text{nom}})$$

De R / X verhouding is afhankelijk van het (mechanische) vermogen per poolpaartal:

$$P_{m,nom} / \text{poolpaartal} = P_{m,nom} * (\text{toerental} / n_{max})$$

waarin:

$$n_{max} = 3000 \text{ omw./min. bij } 50 \text{ Hz}$$

waarna aan de hand van de nominale generatorspanning en het vermogen per poolpaartal R en X wordt bepaald:

$U_{nom,generator} \leq 1 \text{ kV}$:

$$X_{generator} = 0.992 * Z_{generator}$$

$$R_{generator} = 0.42 * Z_{generator}$$

$U_{nom,generator} > 1 \text{ kV}$:

$P_{m,nom} / \text{poolpaartal} < 1 \text{ MW}$:

$$X_{generator} = 0.989 * Z_{generator}$$

$$R_{generator} = 0.15 * X_{generator}$$

$P_{m,nom} / \text{poolpaartal} \geq 1 \text{ MW}$:

$$X_{generator} = 0.995 * Z_{generator}$$

$$R_{generator} = 0.10 * X_{generator}$$

Voor roterende machines is, in tegenstelling tot statische netcomponenten, in het algemeen de normale impedantie ongelijk aan de inverse impedantie (Z_2 ongelijk aan Z_1). Voor de asynchrone generator geldt echter dat Z_2 ongeveer gelijk is aan Z_1 . In overeenstemming met IEC 909 handhaaft Vision $Z_2 = Z_1$.

De homopolaire impedantie Z_0 is oneindig groot verondersteld (zwevend sterpunt).

Bronimpedantie asynchrone motor:

Bij de sequentiële storingsanalyse wordt de asynchrone motor voorgesteld als een Norton equivalent. De bronimpedantie van dit equivalent wordt op dezelfde wijze bepaald als bij een IEC 909 berekening.

Deze impedantie wordt bepaald aan de hand van de nominale spanning, de aanloopstroom, het nominale (mechanische) vermogen en het poolpaartal. In Vision wordt het vermogen elektrisch aangegeven zodat voor het elektrische vermogen geldt:

$$P_{e,nom} = P_{m,nom} / \text{Rendement}$$

Vervolgens wordt de motorimpedantie bepaald volgens:

$$Z_{motor} = (U_{nom,motor})^2 / (I_a / I_{nom} * P_{e,nom} / \cos(\varphi)_{nom})$$

De R / X verhouding is afhankelijk van het (mechanische) vermogen per poolpaartal

$$P_{m,nom} / \text{poolpaartal} = P_{m,nom} * (\text{toerental} / n_{max})$$

waarin:

$$n_{max} = 3000 \text{ omw./min. bij } 50 \text{ Hz}$$

Waarna aan de hand van de nominale motorspanning en het vermogen per poolpaartal R en X wordt bepaald:

$U_{nom,motor} \leq 1 \text{ kV}$:

$$X_{motor} = 0.992 * Z_{motor}$$

$$R_{\text{motor}} = 0.42 * Z_{\text{motor}}$$

$U_{\text{nom,motor}} > 1 \text{ kV}$:

$P_{\text{nom,mech}} / \text{poolpaartal} < 1 \text{ MW}$:

$$X_{\text{motor}} = 0.989 * Z_{\text{motor}}$$

$$R_{\text{motor}} = 0.15 * X_{\text{motor}}$$

$P_{\text{nom,mech}} / \text{poolpaartal} \geq 1 \text{ MW}$:

$$X_{\text{motor}} = 0.995 * Z_{\text{motor}}$$

$$R_{\text{motor}} = 0.10 * X_{\text{motor}}$$

Voor roterende machines is, in tegenstelling tot statische netcomponenten, in het algemeen de normale impedantie ongelijk aan de inverse impedantie (Z_2 ongelijk aan Z_1). Voor de asynchrone motor geldt echter dat Z_2 ongeveer gelijk is aan Z_1 . In overeenstemming met IEC 909 handhaaft Vision $Z_2 = Z_1$.

De homopolaire impedantie Z_0 is oneindig groot verondersteld (zwevend sterpunt).

Belastingen:

Bij de sequentiële storingsanalyse wordt de belasting gemodelleerd als een impedantie. Deze impedantie wordt bepaald aan de hand van de, vooraf door een loadflowberekening bepaalde, $U_{\text{mod,knooppunt}}$ en belastingstroom.

Bij de sequentiële storingsanalyse wordt de transformatorbelasting gemodelleerd als een normale belastingsimpedantie zonder rekening te houden met de invloed van de transformator. De impedantie wordt bepaald aan de hand van de, vooraf door een loadflowberekening bepaalde, $U_{\text{mod,knooppunt}}$ en belastingstroom. Er wordt bij asymmetrische storingen geen rekening gehouden met homopolaire impedanties van de transformator.

Voor de loadflow en de sequentiële storingsanalyse wordt een condensator voorgesteld als belasting met:

$$P_{\text{belasting}} = 0$$

$$Q_{\text{belasting}} = - Q_{\text{condensator}}$$

of

$$Q_{\text{belasting}} = - U_{\text{nom,condensator}}^2 * 2\pi f * C$$

waarin:

$Q_{\text{belasting}}$ constante impedantie = 100 %

$Q_{\text{condensator}}$ geleverd blindvermogen bij U_{nom} van de condensator

$U_{\text{nom,condensator}}$ nominale spanning van de condensator

Voor de loadflow en de sequentiële storingsanalyse wordt een spoel voorgesteld als belasting met:

$$P_{\text{belasting}} = 0$$

$$Q_{\text{belasting}} = - Q_{\text{spoel}}$$

of

$$Q_{\text{belasting}} = - U_{\text{nom,spoel}}^2 * 1/(2\pi f) * L$$

waarin:

$Q_{\text{belasting}}$ constante impedantie = 100 %

Q_{spoel} geleverd blindvermogen bij U_{nom} van de spoel

$U_{\text{nom,spoel}}$ nominale spanning van de spoel

Voor een IEC 909 berekening en de sequentiële storingsanalyse wordt een nulpunttransformator voorgesteld als homopolaire impedantie naar aarde:

$$Z_o = R_o + jX_o$$

BIJLAGE C BIJDRAGE VAN EEN GENERATOR AAN DE KORTSLUITSTROOM

In Vision zijn twee manieren geïmplementeerd om de kortsluitstroom te berekenen: storing sequentieel en volgens IEC.

De sequentiële storingsanalyse berekent de werkelijke kortsluitstromen, uitgaande van de pre-fault condities, zoals belasting, opwekking en spanningsverdeling in het net. Alle actuele instellingen en waarden worden in de berekening meegenomen. Deze methode is in principe omvangrijk en daarom alleen geschikt voor berekening met een computerprogramma en niet geschikt voor berekening met de hand.

De kortsluitberekening volgens IEC 909 is in van oorsprong een handberekening en is daarom gebaseerd op aannames. De werkelijke belastingen, opwekking en spanningen voor de fout zijn niet van invloed op de berekening. Om de berekening hanteerbaar te houden, zijn omgevingsparameters zodanig in factoren ondergebracht, dat altijd een zekere veiligheidsmarge in de resultaten aanwezig is. Hierom zal de methode volgens IEC in de meeste gevallen een ongunstiger beeld geven dan de exacte berekening volgens de sequentiële storingsanalyse. In deze bijlage wordt echter een situatie toegelicht, waarin de methode volgens IEC een lagere kortsluitstroom berekent.

De verschillen tussen de twee methoden worden hieronder toegelicht aan de hand van een net met een voeding, twee transformatoren, een belasting en een generator. De berekeningen richten zich op de tweede transformator en de generator.

Knooppunten:

Primair: $U_{nom} = 25 \text{ kV}$

Secundair: $U_{nom} = 10.5 \text{ kV}$

Transformator:

$U_k = 6 \%$

$P_k = 50 \text{ kW}$

$U_{nom,j} = 10.5 \text{ kV}$

$S_{nom} = 15 \text{ MVA}$

$Z_{eq} = (U_k / 100) \times U_{nom,j}^2 / S_{nom} = 0.06 \times 7.35 = 0.441 \text{ Ohm}$

Generator:

$U_{nom} = 15 \text{ MVA}$

$U_{nom} = 10.5 \text{ kV}$

$x_d'' = 0.16 \text{ pu}$

$r_g = 0 \text{ pu}$

$Z_{base} = (U_{nom}^2 / S_{nom}) = 7.35 \text{ Ohm}$

De generatorimpedantie is afhankelijk van de toegepaste methode. Voor IEC geldt:

$$K_g = (U_{nom,knooppunt} / U_{nom,generator}) \times 1.1 / (1 + x_d'' \sin(\phi)_{nom}) = 1.1 / (1 + 0.16 \times 0.4359) = 1.02828$$

$$X_d'' = K_g \times x_d'' \times Z_{base,gen} = 1.02828 \times 0.16 \times 7.35 = 1.209 \text{ Ohm}$$

$$R_g = 0.07 \times X_d'' = 0.07 \times 1.209 = 0.0846 \text{ Ohm}$$

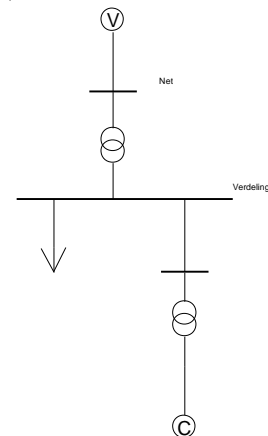
$$Z_g = \sqrt{R_g^2 + X_d''^2} = 1.2122 \text{ Ohm}$$

Voor Storing Sequentieel geldt:

$$X_d'' = x_d'' \times Z_{base,gen} = 0.16 \times 7.35 = 1.176 \text{ Ohm}$$

$$R_g = 0 \text{ Ohm}$$

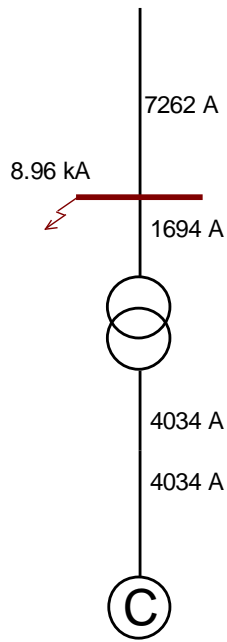
$$Z_g = Z_d'' = 1.176 \text{ Ohm}$$



Kortsluitstroom volgens IEC

Voor de berekening van de kortsluitstroom worden alle generators gezien als een passieve impedantie. Op de kortsluitplaats wordt een spanningsbron aangebracht, ter grootte van 1,1 maal de nominale spanning. De kortsluitspanningsbron "ziet" dan de impedantie van de transformator en de generator in serie. In de berekening is een benadering in de optelling Z_{eq} en Z_g toegepast (niet vectoriele optelling). Als spanning is de fasespanning aan de secundaire zijde van de transformator genomen. Voor de bijdrage van de generator aan de kortsluitstroom geldt dan:

$$I_{k,max} = (1.1 \times U_{nom} / \sqrt{3}) / (Z_{eq} + Z_g) = (1.1 \times 10.5 / \sqrt{3}) / 1.6532 = 4034 \text{ A}$$



Kortsluitstroom volgens Storing Sequentieel

Voor de berekening van de kortsluitstroom volgens deze methode heeft de instelling van belasting en opwekking invloed op het resultaat. Ook de actuele spanning in het net voor de kortsluiting is van grote invloed op de kortsluitstroom. Het resultaat wordt met behulp van superpositie bepaald. Eerst wordt de situatie berekend, waarvoor de generator geen vermogenuitwisseling heeft. Vervolgens de situatie met uitwisseling van vermogen.

Geen vermogenuitwisseling:

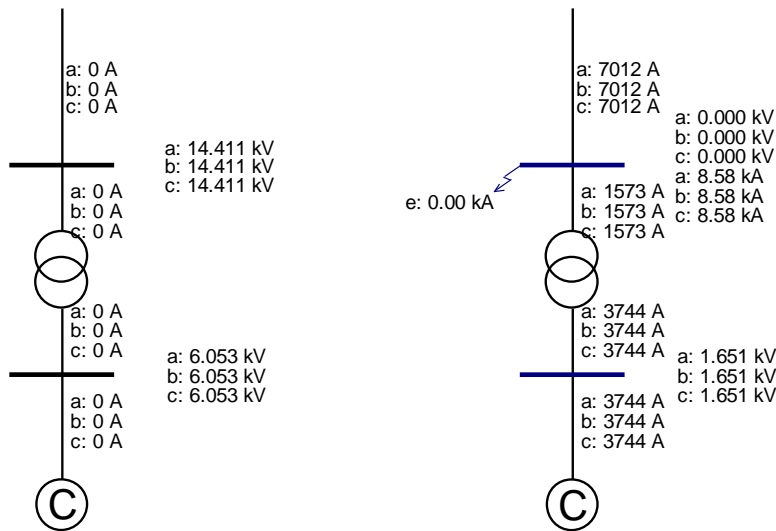
Volgens de loadflow is de spanning in de normale situatie 24.961 kV. De fasespanning is dan 14.411 kV. Dat is ook zichtbaar na berekening van de startvector (eerste handeling in Storing Sequentieel, zie figuur). Omgerekend naar de secundaire zijde van de transformator is dat:

$$U_{pre,sec} = U_{pre,prim} \times (U_{nom,sec} / U_{nom,prim}) = 14.411 \times 10.5 / 25 = 6.05262 \text{ kV}$$

Aangezien er voor de fout geen stroom liep, is de kortsluitbijdrage vanuit de generator volledig bepaald door het wegvallen van de spanning $U_{pre,sec}$ en de som van de impedanties van transformator en generator. De impedanties zijn beide zuiver imaginair.

$$I_k = U_{pre,sec} / (Z_{eq} + Z_g) = 6.05262 / j (1.176 + 0.441) = -j 3.743 \text{ kA}$$

Het resultaat klopt. Zie figuur.



Figuur: Resultaten voor en na de kortsluiting; geen uitwisseling generatorvermogen

Wel vermogensuitwisseling:

Volgens de loadflow is de spanning voor de fout 25.146 kV. De fasespanning is dan 14.518 kV. Komt overeen met de berekening van de startvector (zie figuur). Omgerekend naar de secundaire zijde van de transformator is dat:

$$U_{pre,sec} = U_{pre,prim} \times (U_{nom,sec} / U_{nom,prim}) = 14.518 \times 10.5 / 25 = 6.09756 \text{ kV}$$

De spanning op de generatorklemmen is volgens de loadflow 10.774 kV. De fasespanning is dan:

$$U_{pre,gen} = 6.220 \text{ kV.}$$

De kortsluitbijdrage vanuit de generator wordt bepaald door de superpositie van de kortsluitstroom, berekend uit de pre-fault spanning met impedanties, met de stroom van de vermogensuitwisseling voor de fout.

De kortsluitstroom uit de pre-fault spanning berekenen we op analoge wijze als hierboven (geen vermogensuitwisseling). Ten opzichte van bovenstaande heeft $U_{pre,sec}$ door de vermogensuitwisseling een hogere waarde. De impedanties blijven gelijk. De kortsluitstroombijdrage is:

$$I_k = U_{pre,sec} / (Z_{eq} + Z_g) = 6.09756 / j (1.176 + 0.441) = -j 3.771 \text{ kA}$$

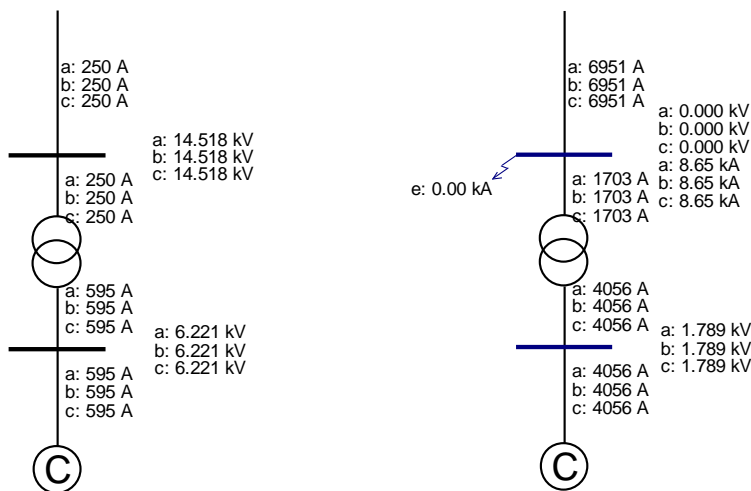
De pre-fault stroom berekenen we uit de vermogensinjectie en de spanning op de generatorklemmen. Hierbij gaan we ervan uit dat de hoekverdraaiing van de spanning op de generatorklemmen gelijk is aan die van de primaire kant van de transformator, waar de kortsluiting op gemaakt wordt. Dit is een verwaarlozing. Als resultaat zou de hoek van de injectiestroom iets verschoven worden. De injectiestroom is dan per fase:

$$I_{gen,pre} = ((S_{gen}/3) / U_{pre,gen})^* = ((P_{gen} + jQ_{gen}) / 3 U_{pre,gen})^* = ((10 + j4.843) / (3 \times 6.220))^* = 0.536 - j 0.260 \text{ kA}$$

De resulterende kortsluitstroombijdrage is dan de vectoriele som van de kortsluitstroom en de pre-fault injectiestroom:

$$I_{fout,gen} = \sqrt{(I_k^2 + I_{gen,pre}^2)} = 4066 \text{ A.}$$

De resultaten komen overeen, zij het dat de handberekening door de verwaarlozing 10 A hoger uitvalt. Zie figuur.



Figuur: resultaten vóór en na kortsluiting; wel uitwisseling generatorvermogen