



Modellering beveiligingscomponenten in Vision

17-099 CW

11 januari 2018

Building 026
Koningstraat 27-1d
6811 DG Arnhem

Postbus 100
6800 AC Arnhem

026 352 37 00
www.phasetophase.nl



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

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

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



INHOUD

1	Inleiding	1
2	AMT-relais (ANSI 51)	2
2.1	Inverse beveiligingskarakteristiek	3
2.2	Resetfunctie	6
3	Spanningsafhankelijke overstroombeveiliging (ANSI 51V)	10
3.1	Spanningsgergelde overstroombeveiliging	10
3.2	Spanningsproportionele overstroombeveiliging	10
4	OMT-relais (ANSI 50 & 50TD)	13
5	Smeltveiligheid	16
5.1	Beveiligingskarakteristiek	16
5.2	Reset/afkoeling	19
5.3	Kapstroomwerking	19
6	Energierichtingrelais, aardfout (ANSI 67N)	21
7	Energierichtingrelais, overstroom (ANSI 67)	23
8	Aardfoutdifferentiaalbeveiliging (ANSI 87N)	24
9	Onbalansbeveiliging (ANSI 46)	26
10	Thermisch relais (ANSI 49)	28
10.1	Thermische belastbaarheidskarakteristiek	28
10.2	Equivalentente stroom	30
10.3	Reset	30
11	Referenties	32

1 INLEIDING

Dit rapport geeft een korte uiteenzetting van de beveiligingscomponenten gemodelleerd in Vision Network Analysis. Om de leesbaarheid van het document te verhogen is getracht de theorie beperkt te houden en zoveel mogelijk praktisch toe te lichten. Om de logica van de hedendaagse microprocessorrelais te verduidelijken wordt regelmatig gerefereerd naar de oude elektromechanischerelais, deze zijn soms makkelijker te doorgronden en om de selectiviteit te waarborgen zijn deze logisch vrijwel identiek opgebouwd.

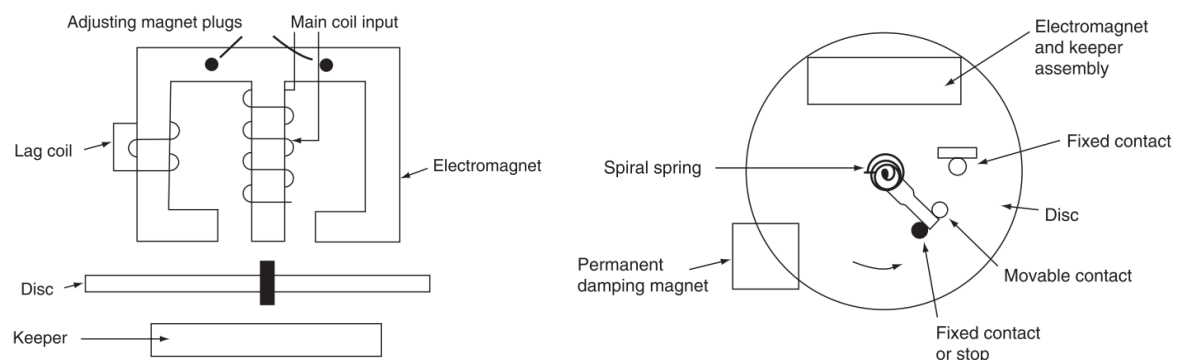
Smeltveiligheid- en relaistoleranties worden niet meegenomen in de modellering, hier dient echter wel rekening mee te worden gehouden. De IEC 60269 (Low Voltage Fuses) laat bijvoorbeeld een tolerantie van $\pm 10\%$ toe in stroom bij smeltveiligheden. Deze norm geldt voor nieuwe smeltveiligheden, door grote stromen als gevolg van transformator inrush of het aanlopen van machines zullen smeltveiligheden versneld verouderen hetgeen direct invloed heeft op de toleranties van de stroom-/tijd karakteristiek van een patroon.

In Vision wordt gerekend met de RMS-waarden van de grondharmonische component, dit wil zeggen dat hogere harmonische niet meegenomen worden in de analyse.

2 **AMT-RELAIS (ANSI 51)**

Bij het Afhankelijk Maximaalstroom-Tijdrelais (AMT-relais) is de triptijd afhankelijk van de stroomsterkte; het relais tript eerder naarmate de stroom toeneemt. De smeltveiligheid heeft ook deze eigenschap. Om de tripkarakteristiek en de implementatie van het relais binnen Vision Network Analysis te verduidelijken wordt hieronder de werking van het elektromechanisch AMT-relais behandeld.

Het principe van het elektromechanisch AMT-relais is in de basis gelijk aan de Ferraristeller (wattuurmeter). Het relais (zie Figuur 1 en Figuur 2) heeft een aluminium schijf die in het magnetisch veld van twee spoelen gepositioneerd is. Een wisselstroom, afkomstig van de CT's, door de primaire spoel produceert een magnetische flux door luchtspleet en de schijf. Het ferromagnetisch materiaal aan de onderzijde van de schijf leidt de flux terug door de schijf en de beide poten van de elektromagneet. De kortgesloten winding (lag coil) in een van deze poten veroorzaakt een faseverschuiving in de flux welke vervolgens een koppel genereert die de schijf laat draaien. Het koppel wordt groter naarmate er een hogere stroom door de spoel loopt. De permanente magneet dient als een wervelstroomrem en produceert een snelheidsproportioneel remmoment. Door de vorm van de schijf te wijzigen is het mogelijk de stroom-tijd karakteristiek van het relais te manipuleren.



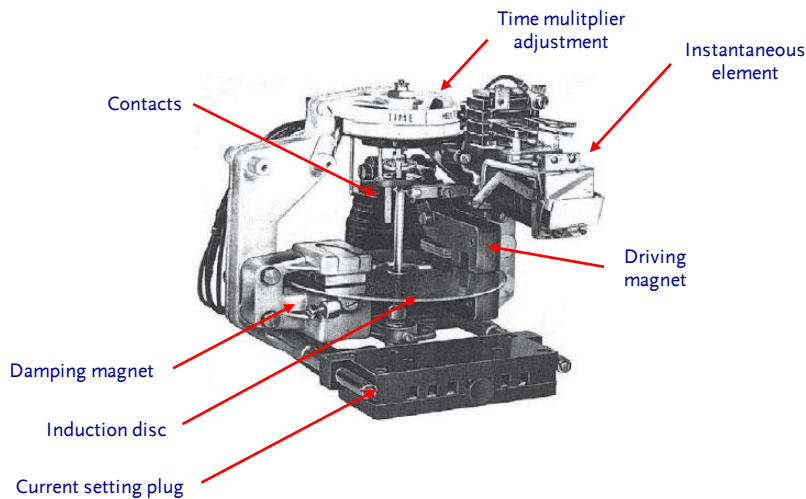
Figuur 1 Principe elektromechanisch AMT-relais, links zij aanzicht, rechts bovenaanzicht (Blackburn & Domin, 2006)

Bij een stroom ter grootte van de aanspreekwaarde wordt een koppel gegenereerd groot genoeg om de veerconstante te overbruggen en de schijf te laten draaien. Bij een bepaalde draaiing sluiten de contacten en wordt een tripcommando gegeven, middels de 'Time Multiplier Setting (TMS)' zijn de contacten te verschuiven waardoor de stroom-tijd karakteristiek in tijd verschoven wordt (ook wel 'Time dial' en 'Time Lever' genoemd).

Komt de stroom na aanspreken (lees: draaiing schijf) onder de aanspreekwaarde dan zal het relais door de veerconstante terugkeren naar de beginpositie. Dit geschiedt echter niet direct, oudere relais zullen pas resetten indien de stroom kleiner wordt dan 60% van de aanspreekwaarde. Daarnaast komt de schijf niet direct tot stilstand, dit gebeurt pas 30 tot 60 ms nadat de stroom onder de afvalwaarde komt. Deze 'overtravel' is over het algemeen verwaarloosbaar en derhalve niet geïmplementeerd in Vision.

Het principe zoals beschreven in dit hoofdstuk is toepasbaar op de volgende AMT-overstroomfuncties binnen Vision Network Analysis, te noemen:

- Overstroombeveiliging;
- Aardfoutbeveiliging ($3I_0$);
- Onbalansbeveiliging (I_2).



Figuur 2 Elektromechanisch AMT-relais

2.1 Inverse beveiligingskarakteristiek

Het elektromechanisch relais en de moderne elektronische- en microprocessorrelais gebruiken dezelfde karakteristieken en eigenschappen om de coördinatie tussen deze componenten te vereenvoudigen. Deze karakteristieken zijn genormaliseerd door zowel de IEEE als de IEC. De normkarakteristieken worden getypeerd door de steilheid van hun hellingen; de IEC norm 60255-151 beschrijft drie karakteristieken: inverse (minst steile), very inverse (steiler) en de extremely inverse karakteristiek (meest steil). Hieronder de functie en de bijhorende parameters (Tabel 1) van de meest voorkomende karakteristieken conform de IEC en de IEEE:

$$t_{trip}(G) = TMS \left(\frac{\beta}{\left(\frac{G}{G_s}\right)^\alpha - 1} + c \right) \tag{1}$$

waar:

- TMS Time Multiplier Setting, m-factor in Vision (pu);
- G actuele stroom (A);
- G_s aanspreekstroom (A).

Tabel 1 Constanten inverse beveiligingskarakteristiek conform IEC en IEEE

Type	Veelgebruikte naam	Tripkarakteristiek			Resetkarakteristiek	
		β (s)	c (s)	α	t_{reset} (s)	α
A	Inverse	0,14	0	0,02	*	*
B	Very inverse	13,5	0	1	*	*
C	Extremely inverse	80	0	2	*	*
D	IEEE Moderately inverse	0,0515	0,114	0,02	4,85	2
E	IEEE Very inverse	19,61	0,491	2	21,6	2
F	IEEE Extremely inverse	28,2	0,1217	2	29,1	2

De resetkarakteristiek wordt in de volgende paragraaf behandeld. De werking van het relais is bij een enkele stroom vrij eenvoudig, de triptijd is nu middels bovenstaande formule te berekenen. Bij een veranderende stroom, bijvoorbeeld na het trippen van een relais elders in het net, dient rekening te worden gehouden met de status van het relais in de vorige sequentie. Dit principe wordt hieronder met behulp van een voorbeeld toegelicht:

Voorbeeld 1

Een AMT-relais met een aanspreekstroom van 600 A, een TMS van 1 en een very inverse karakteristiek type B ziet een stroom van 4 kA welke 700 ms voorstaat (1^e sequentie), de stroom daalt vervolgens door een afschakeling elders in het net tot 1 kA (2^e sequentie). In dit voorbeeld wordt de tijd berekend benodigd voor de gehele afschakeling van de fout.

De totale triptijd van de 1^e sequentie kan worden berekend door de bovenstaande formule (1) toe te passen:

$$t_{trip1} = \frac{13.5}{\frac{4000}{600} - 1} = 2,38 \text{ s}$$

Deze tijd wordt niet bereikt aangezien deze stroom slechts 700 ms voorstaat. Toegepast op het elektromechanisch AMT-relais betekent dit dat de schijf in beweging gezet is en aan het einde van de sequentie $(0,7/2,38) \cdot 100\% = 30\%$ van de van de totale rotatie bereikt. De toestand van het relais is in Figuur 3 (a) geïllustreerd op basis van de inverse karakteristiek - welke op logaritmische schaal is getekend - en de hoekverdraaiing van de schijf.

De tweede sequentie start vanaf deze beginpositie. De totale triptijd van het relais bij deze stroom vanaf de absolute beginpositie is gelijk aan:

$$t_{trip2} = \frac{13.5}{\frac{1000}{600} - 1} = 20,25 \text{ s}$$

Het relais heeft echter al een offset van 30% zie

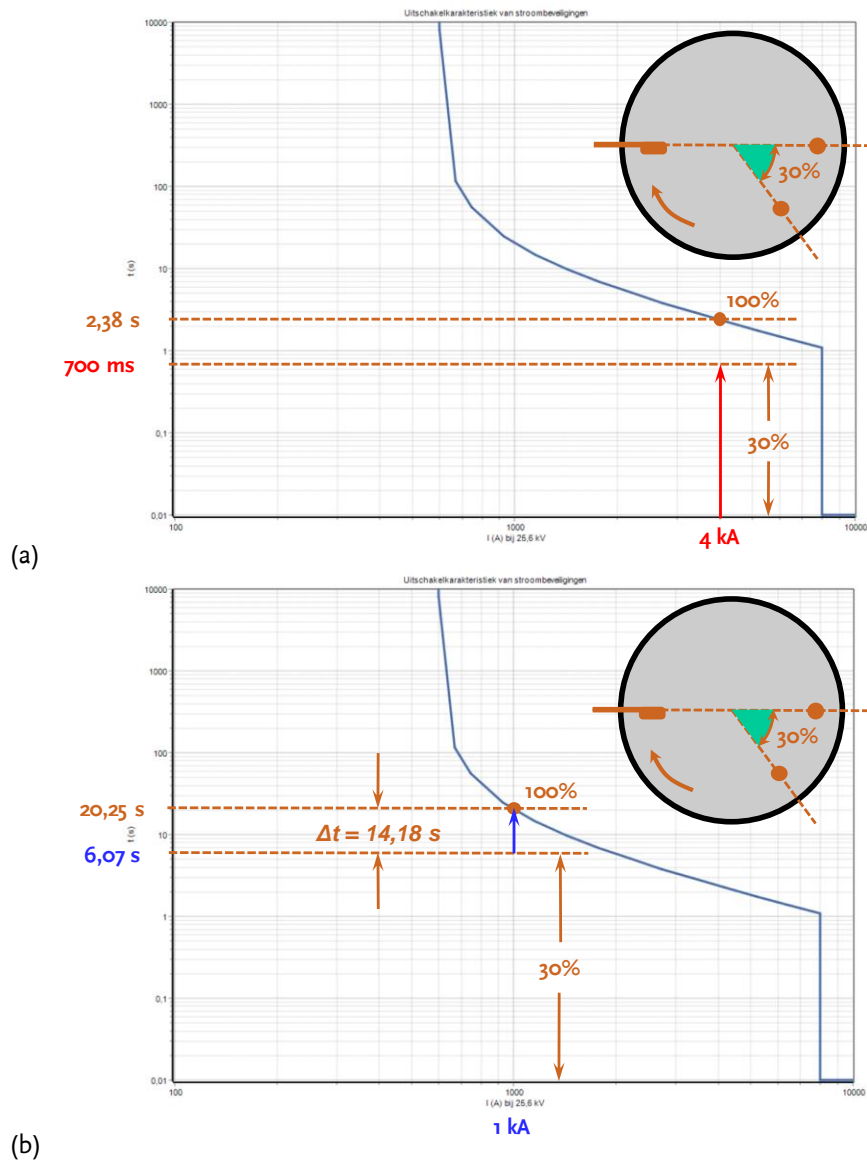
Figuur 3 (b), de triptijd van de tweede sequentie wordt nu:

$$t_{seq2} = 20,25 \cdot \frac{70\%}{100\%} = 14,18 \text{ s}$$

De afschakeltijd van de gehele fout is de som van de tijd van de eerste sequentie en de triptijd van de tweede sequentie vanaf de 30% offset:

$$t_{tot} = t_{seq1} + t_{seq2} = 0,7 + 14,18 = 14,88 \text{ s}$$

Dit principe is toepasbaar op alle AMT-relais voor meerdere sequenties, voor een meer gedetailleerde modellering en omschrijving van de functionaliteit zie (Horowitz & Phadke, 2014).



Figuur 3 Uitschakelsequenties AMT-relais: (a) 1e sequentie; (b) 2e sequentie gevolgd door een trip

2.2 **Resetfunctie**

De resetfunctie van een relais kan een belangrijk criterium zijn bij de coördinatie ingeval van snel herhalende fouten en bij automatische herinschakeling (fast reclosers). De resetfunctie kan op drie manieren geïmplementeerd worden, te noemen: momentaan, vaste tijd en tijdsafhankelijk. Het meest toegepast is de tijdsafhankelijke (schijfemulatie), deze en de momentane reset zijn geïmplementeerd in Vision Network Analysis. Het principe van de tijdsafhankelijke reset is het best uit te leggen aan de hand van de werking van het elektromechanisch AMT-relais; bij het wegvallen van het koppel of indien het koppel kleiner wordt dan de veerconstante zal de schijf terugdraaien en na een bepaalde tijd de beginpositie bereiken. De tijd benodigd voor een volledige reset bij het wegvallen van het koppel is de resettijd, t_{reset} . Hieronder de functie conform de IEEE standaard C37.112-1996 zoals geïmplementeerd in Vision:

$$t_{reset}(G) = \frac{t_{reset}}{\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 - 1} \tag{2}$$

waar:

$t_{reset}(G)$ de resettijd in seconden als functie van G ;
 t_{reset} resettijd voor $G = 0$.

De IEC geeft in de norm 60255-151 de volgende vergelijking voor de resetfunctie:

$$t_{reset}(G) = TMS \left(\frac{t_{reset}}{1 - \left(\frac{G}{G_0}\right)^\alpha} \right) \tag{3}$$

De noemer van resetfunctie is conform de IEEE negatief bij een stroom onder de aanspreekwaarde, waar deze conform de IEC positief is. Dit heeft te maken met conventie en heeft daarom geen directe invloed op de modellering. De IEC resetfunctie geeft echter meer vrijheid door de parameter α niet te specificeren, deze is in veel gevallen echter gelijk aan 2 en derhalve standaard in Vision overgenomen in de vergelijking. In Vision wordt gerekend met daadwerkelijke resettijden, d.w.z. dat de TMS niet in de resettijd is verwerkt, hier geldt:

$$t_{reset_Vision} = TMS \cdot t_{reset} \tag{4}$$

De resettijd is in tegenstelling tot de tripkarakteristiek niet gestandaardiseerd door de IEC, deze schijft voor dat leveranciers de bijhorende parameters moeten geven. Siemens geeft als een van de weinige leveranciers deze parameters, hieronder de resettijden gegeven in de Siemens Siprotec handleiding:

Tabel 2 Constanten inverse resetkarakteristiek Siemens Siprotec

Type	Veelgebruikte naam	Resetkarakteristiek	
		t_{reset} (s)	α
A	Inverse	9.7	2
B	Very inverse	43.2	2
C	Extremely inverse	58.2	2
	Long-Time inverse	80	2

Hieronder een voorbeeld van een AMT-relais die gedeeltelijk reset met een tijdsafhankelijke resetfunctie en vervolgens tript:

Voorbeeld 2

De afhankelijk maximumstroom-tijdfunctie van het relais heeft een Extremely inverse IEC karakteristiek met een I_b instelling van 200 A en een TMS (Time Multiplier Setting) van 1. Het relais ziet in eerste instantie een stroom van 764 A waarop het relais aanspreekt, de stroom is immers groter dan de aanspreekwaarde van 200 A. Deze 1^e sequentie duurt 3 seconden. Vervolgens daalt de stroom tot onder de aanspreekwaarde van het relais, 37 A. Tijdens deze sequentie, welke 20 seconden duurt, zal het relais gedeeltelijk resetten. Bij de 3^e sequentie komt de stroom weer boven de aanspreekwaarde, de stroom is nu 401 A. In dit voorbeeld wordt de tijd berekend benodigd voor de gehele afschakeling. Allereerst wordt de toestand van het relais berekend na de 1^e sequentie, hiervoor wordt Formule (1) toegepast met de parameters uit Tabel 1:

$$t_{trip(1)} = \frac{80}{\left(\frac{764}{200}\right)^2 - 1} = 5,89 \text{ s}$$

De sequentie duurt 3 seconden waardoor het relais niet tript maar wel een bepaalde toestand bereikt, de toestand van het relais na de eerste sequentie is: $(3/5,89) \cdot 100\% = 51\%$. De toestand van het relais is in

Figuur 4 (a) geïllustreerd op basis van de inverse karakteristiek en de hoekverdraaiing van de schijf.

De beginpositie van de tweede sequentie is de toestand van het relais na de eerste sequentie, 51% hoekverdraaiing. Bij deze sequentie is de stroom kleiner dan de aanspreekwaarde waardoor, gerefereerd naar het elektromechanisch relais, de veerconstantie groter is dan het koppel waardoor de schijf terugdraait. De totale resettijd van het relais bij een stroom gelijk aan nul is 58,2 seconden, de IEC schrijft deze tijden niet voor dus zijn de tijden gehanteerd zoals gegeven door Siemens in Tabel 2. De stroom is echter niet gelijk aan nul maar 37 A, de totale resettijd is te berekenen middels Formule (2):

$$t_{reset(2)} = \frac{58,2}{\left(\frac{37}{200}\right)^2 - 1} = 60,26 \text{ s}$$

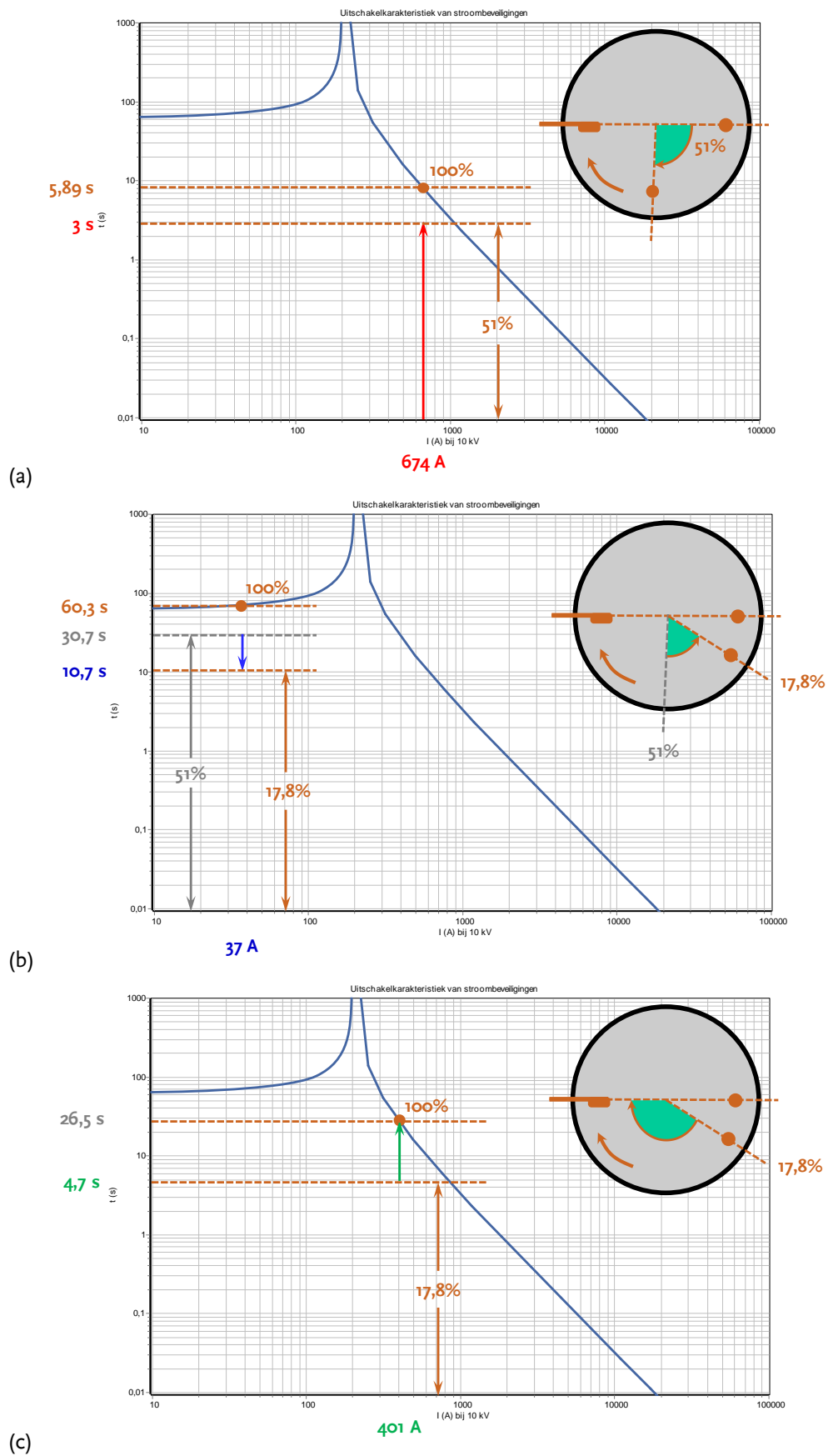
De tweede sequentie heeft een totale duur van 20 seconden, het relais welke start vanaf 51% zal dus $(20/60,26) \cdot 100\% = 33,2\%$ resetten. De toestand van het relais na de tweede sequentie is $51 - 33,2 = 17,8\%$. Dit principe is geïllustreerd in

Figuur 4 (b).

De derde sequentie, met een stroom van 401 A, zal het relais wederom doen aanspreken. Indien het relais zal starten vanaf de beginpositie zal deze na 26,49 seconden trippen:

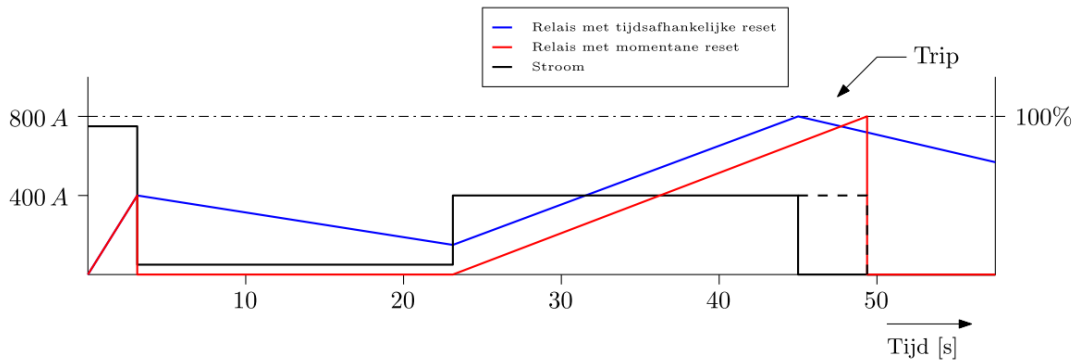
$$t_{trip(3)} = \frac{80}{\left(\frac{401}{200}\right)^2 - 1} = 26,49 \text{ s}$$

De beginpositie is echter de eindpositie van sequentie 2, de tijd benodigd voor het trippen van het relais in de derde sequentie is: $\Delta t = 26,49 \cdot (1 - 0,178) = 21,77$ seconden. Deze sequentie is geïllustreerd in Figuur 4 (c). De totale uitschakeltijd vanaf de eerste fout is daarmee: $3 + 20 + 21,77 = 44,77\text{s}$ seconden.



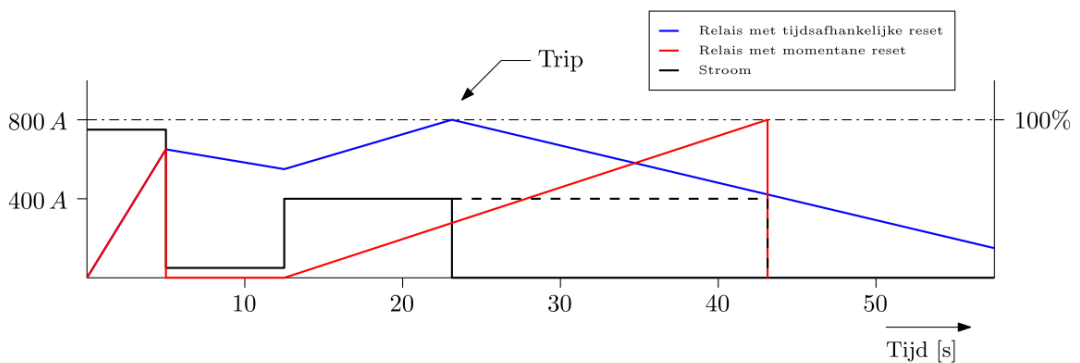
Figuur 4 Uitschakelsequenties AMT-relais: (a) 1e sequentie; (b) 2e sequentie; (c) 3e sequentie gevolgd door een trip

Door in Vision de resettijd, t_{reset} , op 0 te zetten reset het relais momentaan. Bij een momentane reset was het relais in de derde sequentie van bovenstaand voorbeeld pas na 26,49 seconden getrip, dit is 4,72 seconden later dan met de tijdsafhankelijke resetfunctie. In Figuur 5 is de toestand van het relais uit bovenstaand voorbeeld getekend tezamen met de toestand van het relais bij een momentane reset, beide als functie van stroom en tijd. Op de x-as is de tijd gegeven vanaf de eerste fout, op de y-as links de primaire stroom en rechts de toestand van het relais in procenten.



Figuur 5 Toestand relais momentane- en tijdsafhankelijke resetfunctie Voorbeeld 2

Het effect van de resetfunctie bij een terugkerende fout is in dit voorbeeld duidelijk waarneembaar, de tijd dat het relais reset is echter vrij lang. Hieronder in Figuur 6 een voorbeeld met dezelfde stroomwaarden maar met andere tijden. Het verschil in uitschakeling tussen de relais met verschillende resetfuncties is in dit geval ruim 20 seconden!



Figuur 6 Toestand relais momentane- en tijdsafhankelijke resetfunctie Voorbeeld 2 met andere tijden

Zowel bij de modellering als bij de instelling/keuze van beveiligingsrelais is het daarom belangrijk de juiste resetfunctie te kiezen en deze consequent door het gehele netwerk toe te passen, de verschillen in uitschakeltijden bij een gedeeltelijke reset kunnen immers significant zijn!

3 **SPANNINGSAFHANKELIJKE OVERSTROOMBEVEILIGING (ANSI 51V)**

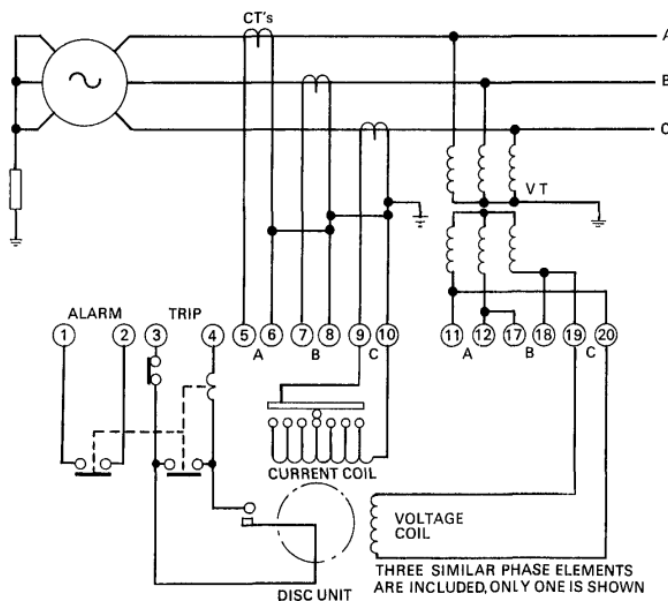
De spanningsafhankelijke overstroomfunctie wordt toegepast bij speciale omstandigheden waar de aanspreekstroom verlaagt dient te worden afhankelijk van de spanning. Een voorbeeld van een dergelijke toepassing is de beveiliging van generatoren. Generatoren in de range van 5 tot 150 MW worden voor externe fouten veelal beveiligd middels een spanningsafhankelijke overstroombeveiliging. In geval van een sluiting elektrisch dichtbij de generator daalt de spanning op de klemmen van deze machine drastisch. Bij bekrachtigingssystemen waarbij de bekrachtiging wordt betrokken van de stator daalt de elektromagnetische kracht (e.m.k.) proportioneel met de klemspanning van de machine en daarmee de bijdrage van de generator aan de kortsluitstroom. In deze gevallen kan de foutstroom geleverd door de generator onder de nominaalstroom dalen. Door de overstroomcurve afhankelijk te maken van de spanning is de machine gevoeliger te beveiligen voor een kortsluiting dichtbij de generator en is deze toch in staat om vermogensvariaties maximaal op te vangen. Over het algemeen worden er twee types toegepast: spanningsproportioneel (voltage restrained) en spanningsgeregeld (voltage controlled).

3.1 **Spanningsgeregelde overstroombeveiliging**

Dit type heeft twee inverse beveiligingskarakteristieken, op basis van de klemspanning van de machine wordt de betreffende beveiligingskarakteristiek geselecteerd. Bij normale bedrijfssituaties dient het relais pas een uitschakelcommando te geven indien de stroom gedurende langere tijd boven de nominaalstroom van de machine is. Een fout elektrisch dichtbij de generator heeft een sterke daling van de spanning tot gevolg waardoor een meer gevoelige relaisinstelling noodzakelijk kan zijn. Deze omschakeling is instelbaar en vindt normaliter plaats tussen de 40 en 90% van de nominale spanning.

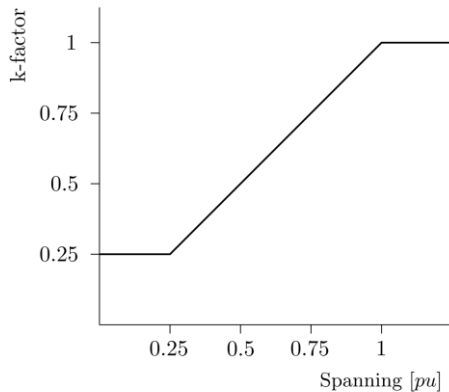
3.2 **Spanningsproportionele overstroombeveiliging**

Het alternatief voor de spanningsgeregelde overstroombeveiliging is het continu regelen van de inverse beveiligingskarakteristiek. Bij dit type wordt de curve proportioneel geregeld tussen de minimaal en maximaal ingestelde limiet. In de Engelstalige literatuur heet dit type 'voltage restrained' hetgeen afkomstig is van het 'beperken' van de overstroomfunctie. In de basis is het een elektromechanisch AMT-relais zoals behandeld in Hoofdstuk 2 uitgerust met een extra spoel welke een tegenwerkend koppel genereert. Bij een gereduceerde spanning zal de spanningsspoel minder tegenwerken waardoor het relais eerder aanspreekt. Hieronder in Figuur 7 een principeschema van een ouder elektromechanisch exemplaar.



Figuur 7 **Spanningsproportioneel overstroomrelais GEC CDV61 (GEC)**

In de tegenwoordige microprocessorrelais is deze ‘tegenwerking’ gerealiseerd middels de k-factor. De aanspreekstroom ($I_{>}$) van de inverse beveiligingskarakteristiek wordt hiermee geschaald. Hieronder in Figuur 8 de typische verhouding tussen de inverse overstroomkarakteristiek en de klemspanning van de machine:



Figuur 8 Spanningsproportionele overstroombeveiliging, k-factor

De k-factor geïmplementeerd in Formule (1) en (2) geeft:

$$t_{trip}(G) = TMS \left(\frac{\beta}{\left(\frac{G}{k \cdot G_{>}} \right)^{\alpha} - 1} + c \right) \tag{5}$$

$$t_{reset}(G) = \frac{t_{reset}}{\left(\frac{G}{k \cdot G_{>}} \right)^2 - 1} \tag{6}$$

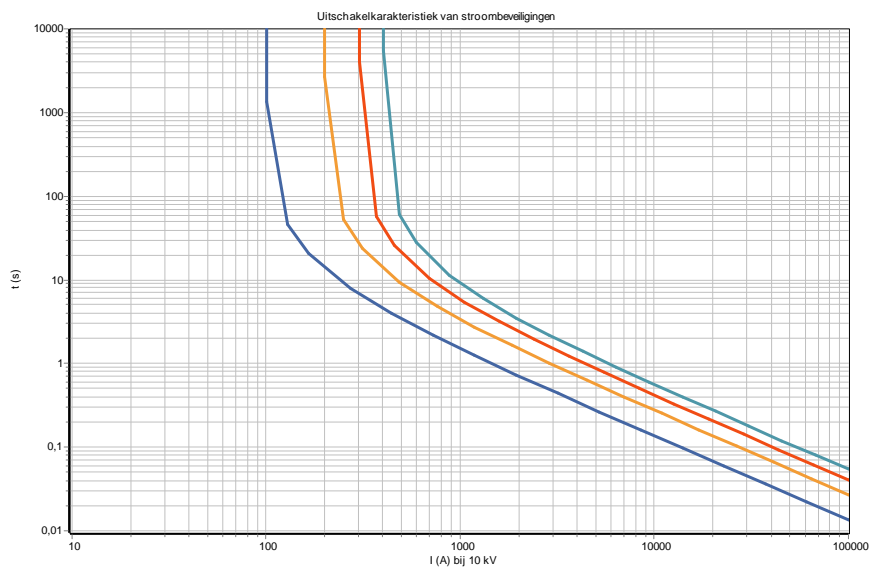
Bovenstaande formules en k-factor (Figuur 8) zijn in Vision geïmplementeerd, de stromen en bijhorende referentiespanningen zijn hieronder gegeven in Tabel 3:

Tabel 3 Stromen en bijhorende referentiespanningen

Stroom	Referentiespanning
I_A	U_{AB}
I_B	U_{BC}
I_C	U_{CA}

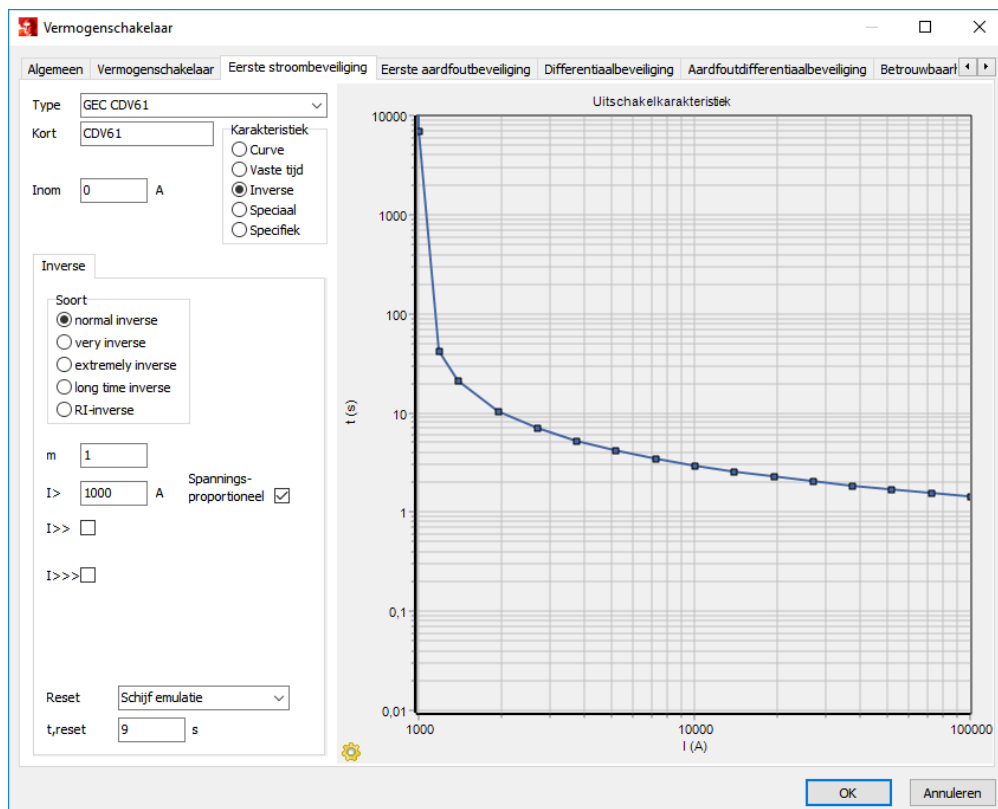
Bij een fout met verschillende sequenties waaronder een gedeeltelijke reset wordt het relais behandeld zoals beschreven in de Paragrafen 2.1 en 2.2 met bovenstaande formules en de k-factor conform Figuur 8 met de spanning van de huidige sequentie.

Hieronder in Figuur 9 de inverse overstroomkarakteristieken van een spanningsproportioneel overstroomrelais met een aanspreekstroom van 400 A en een very inverse IEC karakteristiek. De karakteristieken zijn getekend bij 25, 50, 75 en 100% spanning.



Figuur 9 Inverse overstroomkarakteristiek bij verschillende spanningniveaus

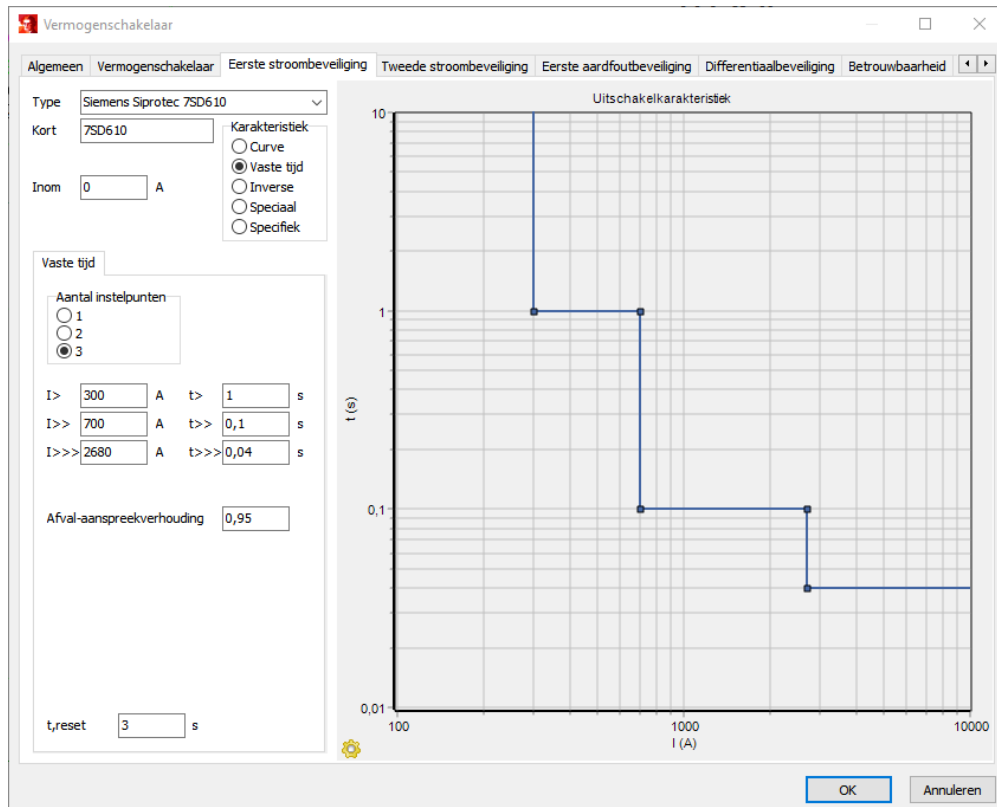
In Vision is deze functie te kiezen door bij de overstroombeveiliging het vinkje 'spanningsproportioneel' te selecteren, zie Figuur 10. Zowel de tripkarakteristiek als de resetfunctie wordt nu behandeld zoals beschreven in de Formules (5) en (6) met de k-factor zoals gegeven in Figuur 8.



Figuur 10 Implementatie spanningsproportionele overstroomfunctie in Vision

4 OMT-RELAIS (ANSI 50 & 50TD)

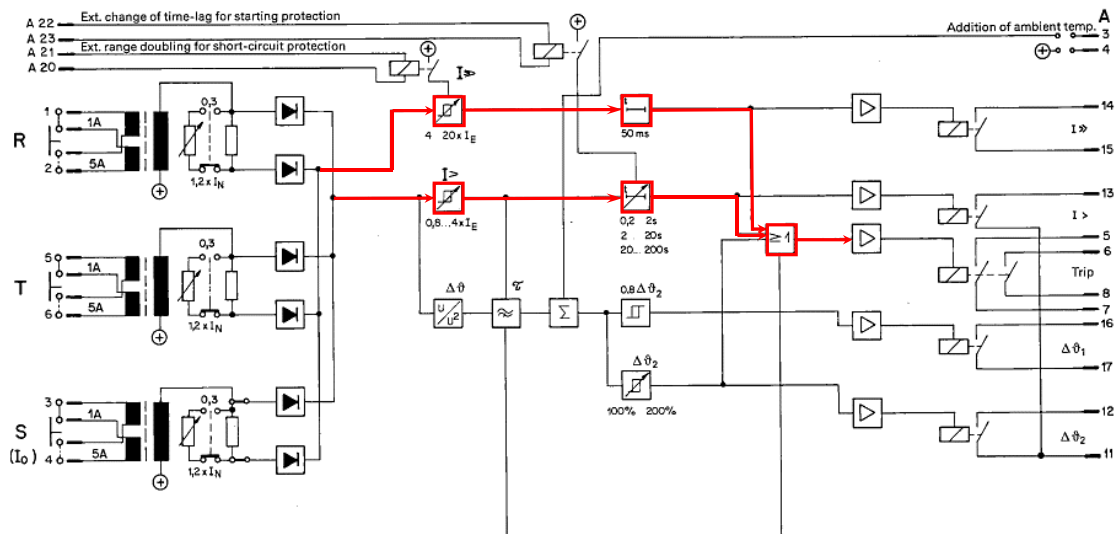
Een onafhankelijk maximaalstroom-tijdbeveiliging geeft een uitschakelcommando aan een vermogensschakelaar indien de gemeten stroom de ingestelde waarde overschrijdt en de bijhorende ingestelde tijd verlopen is. Veelal hebben OMT-relais de mogelijkheid tot instelling van meerdere stroomgrenzen met bijhorende uitschakeltijden, zie hieronder in Figuur 11 als voorbeeld de invoer van een OMT-relais in Vision.



Figuur 11 Invoer OMT-relais in Vision Network Analysis

In Vision is het mogelijk tot drie instelpunten te modelleren. Naast de stroomgrenzen ($I_{>}$, $I_{>>}$ en $I_{>>>}$) en bijhorende tijden ($t_{>}$, $t_{>>}$ en $t_{>>>}$) is de 'afval-aanspreekverhouding' in te stellen, deze representeert de zogenaamde 'drop-out' van het relais. Mocht na het aanspreken van het relais de stroom binnen de ingestelde tijd dalen tot onder de aanspreekwaarde vermenigvuldigd met de afval-aanspreekverhouding dan reset het relais in Vision momentaan of na een vaste tijd. Er volgt in dit geval geen uitschakelcommando. De afval-aanspreekverhouding mag gezien worden als een natuurlijke deadband om te voorkomen dat het relais 'onrustig' wordt rond het aanspreekgebied. Deze zone geldt voor alle ingestelde stroomwaarden.

Hieronder in Figuur 12 een prinsipeschema van een oud OMT-relais van BBC. De stromen afkomstig van de drie CT's worden gefilterd en vervolgens gelijkgericht om een proportioneel DC-signaal te verkrijgen. Het relais detecteert het grootse signaal (maximum value detection) en deze wordt vergeleken met de referentiespanningen berekend middels de ingestelde aanspreekstromen ($I_{>}$ en $I_{>>}$). Bij het overschrijden van een van de referentiespanningen wordt de bijhorende timer gestart en geeft het relais een signaal dat het is aangesproken, bij het overschrijden van de tijd tript het relais en geeft deze een uitschakelcommando aan de vermogensschakelaar. In de modernere microprocessorrelais wordt dit per fase beoordeeld, het principe blijft echter gelijk.

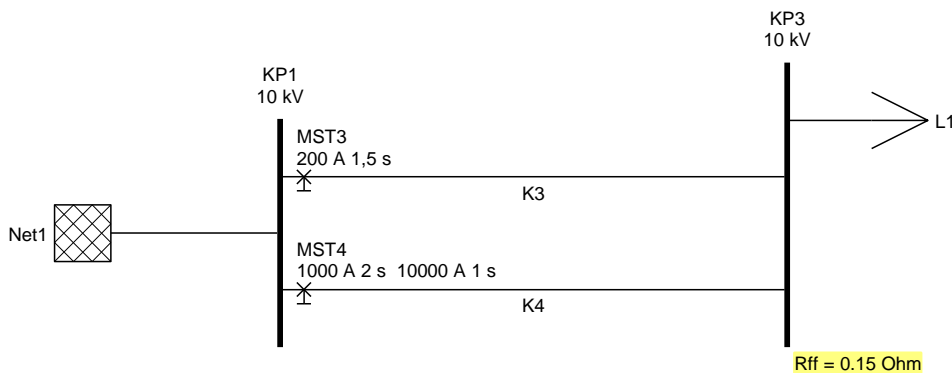


Figuur 12 Principeschema BBC ITX 192 (BBC, 1985)

Zoals te zien in het principeschema van de BCC ITX192 wordt een tripcommando gegeven op het moment dat $(I_{R,S,T} \geq I_{>} \text{ AND } t = t_{>}) \text{ OR } (I_{R,S,T} \geq I_{>>} \text{ AND } t = t_{>>})$. Bij een sequentie waarbij de stroom zich eerst in de eerste trap ($I_{>}$) bevindt en hierna groeit tot boven de tweede trap ($I_{>>}$) zal de timer in de eerste trap doorlopen. Het kan dus voorkomen dat het relais een tripcommando geeft binnen de eerste trap terwijl de stroom zich in de tweede trap bevindt. Dit principe is behandeld in onderstaand voorbeeld.

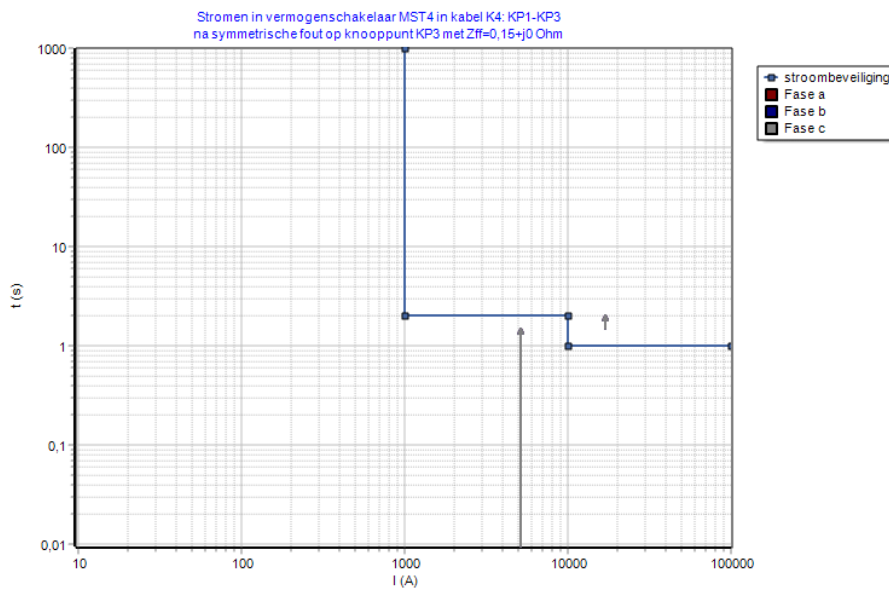
Voorbeeld 3

Om de verschillende stromen door het relais te simuleren wordt gebruikgemaakt van het netwerk geïllustreerd in Figuur 13 met een kortsluiting op KP3, dit netwerk is opgezet om het effect te simuleren en representeert geen werkelijke situatie. Door vermogensschakelaar MST3 op 1,5 seconden af te laten schakelen verandert de stroom door vermogensschakelaar MST4 van 5,15 kA naar 17 kA. Het OMT-relais MS4 heeft twee vaste stroom-tijd trappen, de eerste trap heeft een $I_{>}$ instelling van 1 kA met een bijhorende tijd van 2 seconden en de tweede trap heeft een $I_{>>}$ van 10 kA en een $t_{>>}$ van 1 seconde.

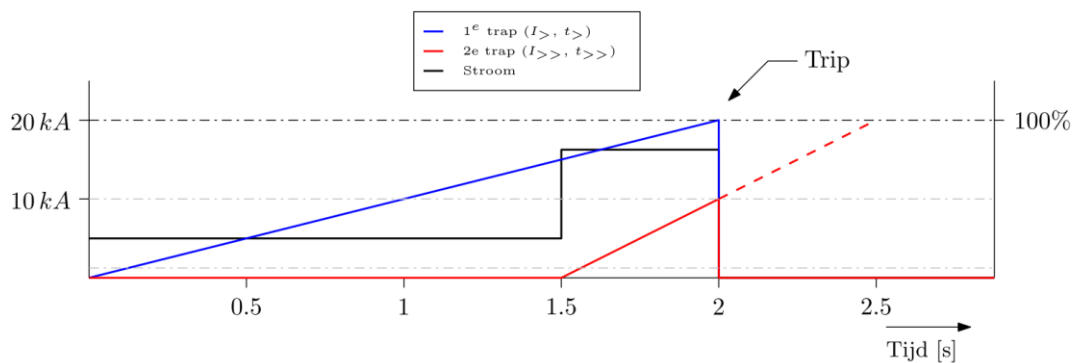


Figuur 13 Netwerk voorbeeld 3 Vision Network Analysis

Na de eerste sequentie (5,15 kA gedurende 1,5 s) heeft de timer van de eerste trap 75% bereikt. De stroom wordt vervolgens 17 kA, deze stroom overschrijdt de ingestelde $I_{>>}$ instelling waardoor ook de tweede timer gestart wordt. De timer behorende bij trap 1 telt echter door (de stroom is immers groter dan $I_{>}$) waardoor deze na 0,5 seconden tript en het relais een uitschakelcommando geeft aan de vermogensschakelaar MST4. In de onderstaande figuren is te zien dat het relais tript op 2 seconden, de tijd die aan de eerste trap toebehoort. De tweede sequentie heeft een duur van 0,5 s, hetgeen vanzelfsprekend te kort is voor de tweede trap om te trippen (dit zal pas na 1 s gebeuren). Hieronder in Figuur 14 de primaire stromen door het relais en in Figuur 15 de toestand van het relais.



Figuur 14 Stromen en instellingen OMT-relais MST4 Voorbeeld 3



Figuur 15 Toestand OMT-relais MST4 Voorbeeld 3

De twee grijze stippellijnen representeren de ingestelde stroomwaarden ($I_{>}$ en $I_{>>}$). Op $t = 0$ s spreekt de eerste trap aan (blauw), de kortsluitstroom is immers groter dan de aanspreekwaarde, 1 kA. Het veranderen van de kortsluitstroom op $t = 1,5$ s doet ook de tweede trap aanspreken (rood). Deze tweede trap tript pas na de ingestelde 1 seconde (rode stippellijn). Op $t = 2$ s bereikt de eerste trap 100% van de bijhorende tijd en tript.

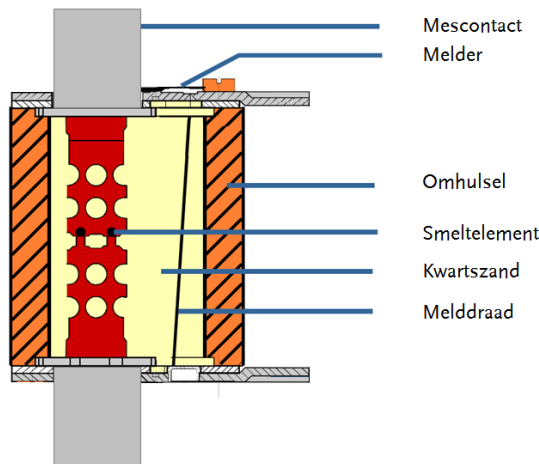
Bovenstaand principe geldt uiteraard ook indien de stroom afneemt. Bij een initiële kortsluitstroom van 17 kA spreekt zowel de eerste als de tweede trap aan en beginnen de twee timers te tellen. Daalt de stroom vervolgens op $t = 0,5$ s onder de $I_{>>}$ instelling vermenigvuldigd met de aanspreekafvalverhouding maar blijft deze boven de $I_{>}$ instelling dan blijft de teller bijhorend bij de eerste trap doortellen vanaf $t = 0,5$ s. Op $t = 2$ s tript het relais vervolgens op de eerste trap.

Dit principe is toepasbaar op de volgende beveiligingsfuncties binnen Vision Network Analysis:

- Overstroombeveiliging fasen;
- Overstroombeveiliging aardfout;
- Onder-/overspanningsbeveiliging;
- Onbalansbeveiliging;
- Differentiaalbeveiliging;
- Aardfoutdifferentiaalbeveiliging.

5 **SMELTVEILIGHEID**

De werking van een smeltveiligheid is gebaseerd op het bewust creëren van een zwakke schakel in een keten welke bij een overstroom als eerste zal bezwijken. Smeltveiligheden bestaan allen uit een of meer elementen welke smelten en verdampen bij het voeren van een stroom boven een bepaalde grens voor een bepaalde tijd. Na het verdampen van het stroomvoerend element ontstaat er een vlamboog in de smeltveiligheid welke na het doven een gehele onderbreking bewerkstelligt.



Figuur 16 Mespatroon (Bron: ZVEI)

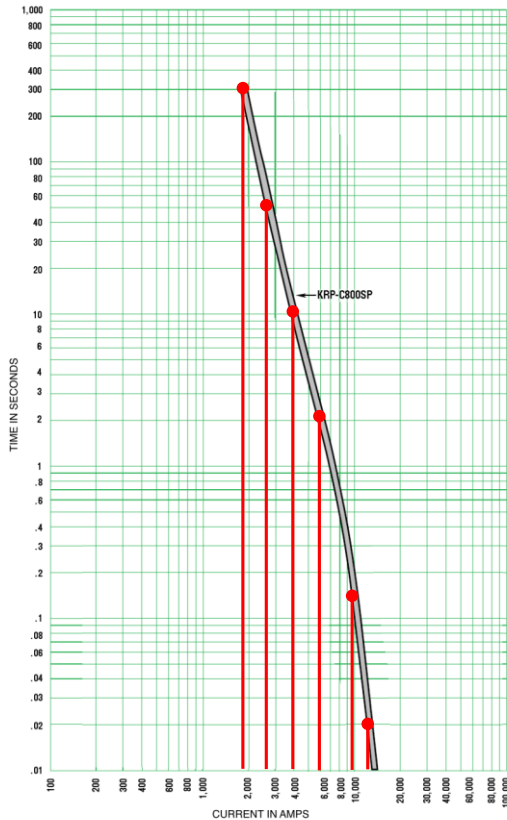
Restricties in het smeltelement, ook wel insnoeringen, zorgen ervoor dat het smeltelement dusdanig snel smelt zodat de kortsluitstroom geen tijd heeft om zijn maximale topwaarde te bereiken. Deze stroombegrenzende eigenschap is de kapstroomwerking van een smeltveiligheid. Deze wordt niet meegenomen in de analyses binnen Vision maar wordt wel in dit document behandeld omdat dit een belangrijke (positieve) eigenschap is welke bepaalde combinaties in de vorm van kortsluitvermogens van installatiedelen toestaat, zie Paragraaf 5.3.

Soms wordt er op een smeltelement soldeer aangebracht (M-effect) om het smeltpunt van het geheel te verlagen, ook eutecticum genoemd. Bij kleine overstromen, zoals overbelasting, smelt het soldeer ten gevolgen van het diffusieproces met het materiaal van de smeltband waardoor de smelttemperatuur plaatselijk verlaagd wordt. Bij het weglaten van het soldeer warmt het smeltelement bij kleinere stromen langzaam op waardoor het geheel niet meer als een adiabatich proces te beschouwen is, de smeltpatroon gaat in dit geval warmte aan de omgeving dissiperen. Bij equilibrium (warmtebalans) zal buitentemperatuur van de smeltveiligheid onacceptabele waarden bereiken en zal het smeltelement niet doorsmelten. Door het toepassen van het M-effect wordt deze warmtebalans bij een lagere temperatuur bereikt waardoor er minder warmte gedissipeerd wordt. Het gebied rondt dit equilibrium wordt het kritisch gebied van een smeltveiligheid genoemd.

5.1 **Beveiligingskarakteristiek**

Het bovenstaande wordt samengevat in de stroom-tijdkarakteristiek welke wordt getekend op basis van metingen. Deze metingen worden uitgevoerd onder voorgeschreven omstandigheden met vaste (lees: steady state) stromen, door de uitschakeltijden bij verschillende stromen te meten wordt de stroom-tijdkarakteristiek verkregen zoals gegeven in Figuur 17. De rode lijnen representeren verschillende metingen bij verschillende stromen, in de werkelijkheid worden uiteraard meerdere metingen uitgevoerd. De karakteristieken worden meestal vanaf 10 ms tot het kritisch gebied getekend, stromen die sneller dan 10 ms afgeschakeld worden bevinden zich in het kapstroomgebied. Zoals te zien in de

curve is er een stroom voor iedere smeltveiligheid waarbij de onderbrekingstijd theoretisch oneindig is, bij deze stroom is de gedissipeerde energie gelijk aan de geproduceerde energie (I^2Rt). Deze tijd is niet experimenteel te bepalen, hierdoor worden de curves meestal tot 1-4 uur gegeven.



Figuur 17 Stroom-tijd karakteristiek smeltveiligheid

De tijd opdat het smeltelement de smelttemperatuur bereikt wordt korter naarmate de stroom de toeneemt. Dit doordat het verschil in energie geproduceerd in de smeltveiligheid (welke proportioneel is aan de stroom in het kwadraat) en de gedissipeerde energie toeneemt. In Vision wordt de smeltveiligheid behandeld volgens het principe van het elektromechanisch relais, het elektromechanisch relais is immers ontworpen om selectief te zijn met de reeds in de tijd veel toegepaste smeltveiligheden. In het geval van de smeltveiligheid wordt niet genormaliseerd op hoekverdraaiing maar op energie, dit laatste is niet helemaal waar omdat er genormaliseerd wordt op de doorlaatintegraal I^2t en niet op de I^2Rt . Hieronder een voorbeeld hoe de smeltveiligheid behandeld wordt binnen Vision bij verschillende sequenties:

Voorbeeld 4

De smeltkarakteristiek van een 160 A smeltveiligheid is gegeven in Figuur 18. In dit voorbeeld lopen er drie verschillende stromen met verschillende tijden door de smeltveiligheid, deze zijn hieronder gegeven:

1. $I_1 = 1609$ A gedurende $t_1 = 0,224$ s;
2. $I_2 = 1563$ A gedurende $t_2 = 0,079$ s;
3. $I_3 = 922$ A tot de uitschakeling (t_3 is onbekend).

De uitschakeltijd die bij de stroom van de eerste sequentie (1609 A) hoort is 0,367 s (uit de uitschakelkarakteristiek van de smeltveiligheid). De genormaliseerde tijd van de eerste sequentie is:

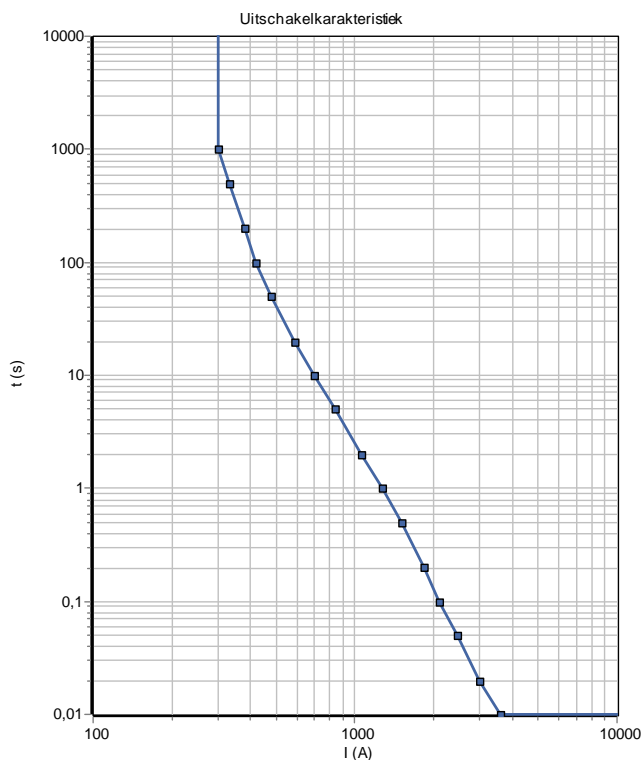
$$t_{norm,1} = \frac{t_1}{t_{uitschakel,1}} \tag{7}$$

$$t_{norm,1} = \frac{0,224}{0,367} = 0,610 \text{ p.u.} = 61,0\%$$

De genormaliseerd tijd in per unit is in principe gelijk aan de genormaliseerde energie:

$$e_{norm,1} = \frac{I_1^2 t_1}{I_1^2 t_{uitschakel,1}} = \frac{t_1}{t_{uitschakel,1}} = t_{norm,1} \tag{8}$$

Dit betekent dat de smeltveiligheid na de eerste sequentie 61% verwarmd is (relatief aan de smeltenergie).



Figuur 18 Siba 160A gL/gC smeltveiligheid

De uitschakeltijd die bij de stroom van de tweede sequentie (1563 A) hoort is 0,420 s (uit de uitschakelkarakteristiek van de smeltveiligheid). De genormaliseerde tijd van de tweede sequentie is:

$$\Delta t_{norm,2} = \frac{0,079}{0,420} = 0,188 \text{ p.u.} = 18,8 \%$$

De totale genormaliseerde tijd na de tweede sequentie is:

$$t_{norm,2} = t_{norm,1} + \Delta t_{norm,2} = 0,610 + 0,188 = 0,798 \text{ p.u.}$$

Voor de derde sequentie willen we de daadwerkelijke uitschakeltijd bepalen. De uitschakeltijd die bij de stroom van de derde sequentie (922 A) hoort is 3,433 seconden. Een dergelijke tijd zal nodig zijn als er

geen sequenties voor deze sequentie zijn die de smeltveiligheid voorverwarmen. De smeltveiligheid is echter al bijna 80% verwarmd (door de vorige sequenties). De tijd benodigd om uit te schakelen is:

$$\Delta t_{norm,3} = 1 - t_{norm,2} = 1 - 0,798 = 0,202 \text{ p. u.}$$

De tijd van de derde sequentie is:

$$t_3 = \Delta t_{norm,3} \cdot t_{uitschakel,3} = 0,202 \cdot 3,433 = 0.693 \text{ s}$$

De daadwerkelijke uitschakeltijd is:

$$t_{uitschakel} = t_1 + t_2 + t_3 = 0,224 + 0,079 + 0,693 = 0,996 \text{ s}$$

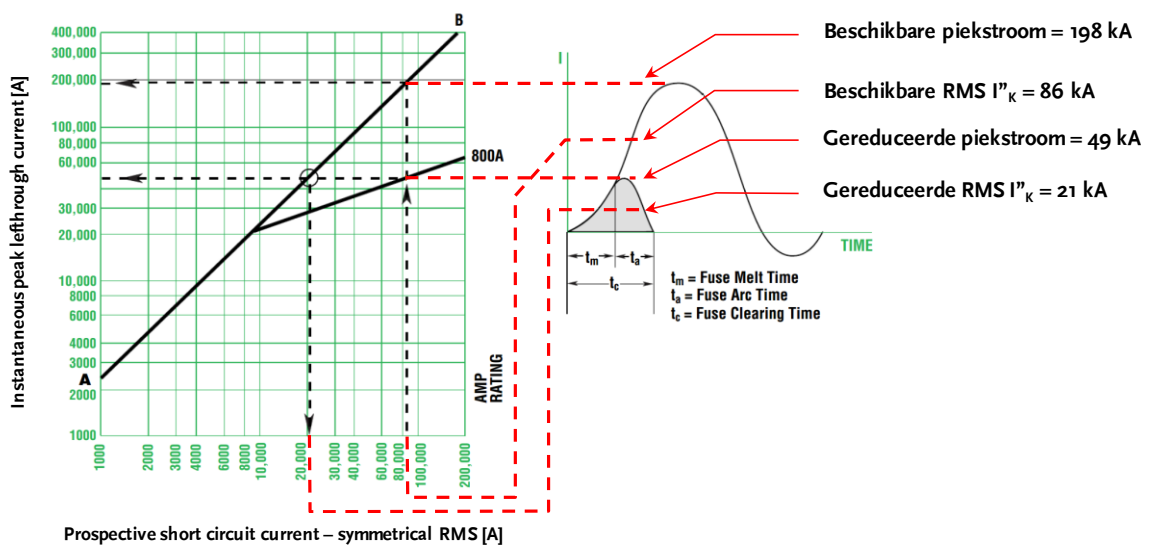
Deze tijd is beduidend korter dan de bij deze stroom beoogde 3,433 seconden.

5.2 Reset/afkoeling

Evenals het mechanischrelais reset de smeltveiligheid indien de stroom onder de 'aanspreekwaarde' van de smeltveiligheid komt. Over deze afkoeling is echter weinig bekend en geheel afhankelijk van het type smeltveiligheid en de toepassing hiervan. Deze functie is derhalve niet meegenomen in de implementatie binnen Vision.

5.3 Kapstroomwerking

Tijdens een kortsluiting met als gevolg een grote stroom door de smeltveiligheid smelten de restricties in het smeltelement momentaan zodat er een serie van vlambogen in de smeltveiligheid ontstaat. De vlamboogspanning neemt toe en daarmee neemt de stroom af tot de vlamboog dooft en de smeltveiligheid de stroom onderbreekt. Doordat dit alles binnen een zeer korte tijd gebeurt zal de stroom de maximale piek niet bereiken. De kapstroomwerking wordt geïllustreerd in Figuur 19.



Figuur 19 Kapstroomwerking principe smeltveiligheid

Op de x-as is de te verwachten subtransiënte RMS-stroom geplott en op de y-as de maximaal te verwachte piekstroom. Zoals te zien is de berekende subtransiënte kortsluitstroom in dit voorbeeld gelijk aan 86 kA, de maximaal te verwachte piekstroom is nu 198 kA. Het smeltelement zal nu binnen zeer korte tijd doorsmelten (t_m) waardoor de piek gereduceerd wordt tot 49 kA, de bijhorende RMS stroom is vervolgens 21 kA. De lijn A-B in Figuur 19 representeert de maximale piek die op zal treden bij de

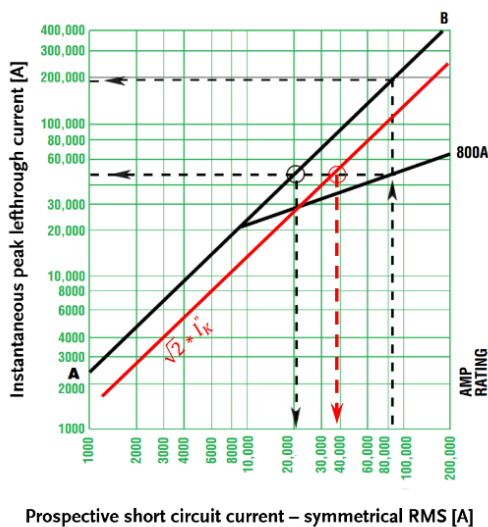
berekende subtransiënte kortsluitstroom I_k'' . De internationaal geaccepteerde norm IEC 60909 schrijft de volgende formule voor om de maximaal te verwachte piekstroom te berekenen:

$$I_p = \kappa\sqrt{2} \cdot I_k'' \tag{9}$$

waar:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-3\frac{R}{X}} \tag{10}$$

Zoals te concluderen uit Formules (9) en (10) is de piekstroom afhankelijk van de R/X-verhouding van het netwerk. In Figuur 19 wordt een R/X-verhouding van 0,16 gehanteerd, deze kan in de werkelijkheid echter sterk afwijken. Om de selectiviteit tussen een smeltveiligheid en een bovenliggende overstroombeveiliging – niet zijnde een smeltveiligheid – te waarborgen dient men rekening te houden met de maximale stroom die de smeltveiligheid in geval van een kortsluiting doorlaat. Een overstroomrelais filtert de effectieve RMS-stroom of de RMS-stroom van de grondfrequentiecomponent. Zoals te zien in Figuur 20 kan de RMS doorlaatstroom hoger uitvallen bij een andere R/X-verhouding dan voorgeschreven door de leverancier van de smeltveiligheid. Bij het instellen van de momentane trip van het bovenliggende beveiligingsrelais dient er dus rekening gehouden te worden met de R/X-verhouding van het net. Deze theorie wordt nader belicht in (Valdes, Cline, Hansen, & Papallo, 2009) ook wordt hier de selectiviteit tussen verschillende smeltveiligheden en tussen smeltveiligheden en automaten/overstroomrelais behandeld.



Figuur 20 Kapstroomwerking bij kappa gelijk aan 1

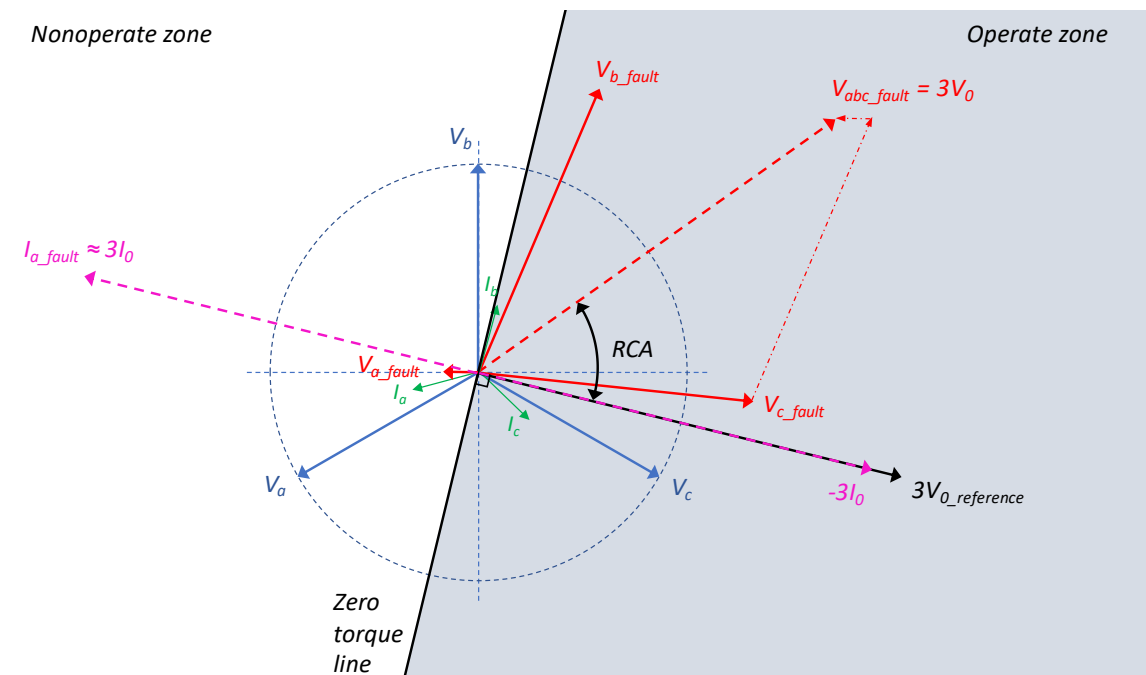
Deze stroombegrenzende werking wordt niet meegenomen in de kortsluitstroomberekeningen en de selectiviteitsanalyse van Vision. Het is zoals hierboven beschreven wel een belangrijke eigenschap welke bij de analyse van kortsluitvastheid en selectiviteit een grote rol kan spelen, derhalve is dit onderwerp hier behandeld.

6 ENERGIERICHTINGRELAIS, AARDFOUT (ANSI 67N)

Richtingsgevoelige elementen worden toegepast om het beveiligingselement te laten opereren in enkel een voor- of achterwaartse richting. Veelal kan een richtingsgevoelige aardfoutbeveiliging worden gezien als twee elementen, één overstroomelement en één element welke de richting van de stroom bepaald. Om het relais te laten trippen dient de stroom de ingestelde stroom-tijdkarakteristiek te snijden en dient de fout zich in de tripzone te bevinden.

De input van de aardfoutbeveiliging is de vectoriële som van de drie gemeten fasestromen ($I_a + I_b + I_c = 3I_0$), deze homopolaire stroom I_0 is alleen aanwezig indien er een pad is naar aarde. De richting van een foutstroom ten gevolgen van een aardfout wordt bepaald aan de hand van de hoek tussen deze stroom en een referentie. Als referentie wordt in de praktijk zowel spanning als stroom gebruikt, respectievelijk spannings- en stroompolarisatie. Bij spanningspolarisatie wordt als referentie de homopolaire foutspanning ($3V_0$) gebruikt, dit in tegenstelling tot richtingsgevoelige overstroombeveiliging (ANSI 67) waar niet de foutspanning maar de gekoppelde spanning van de niet-gestoorte fasen wordt gebruikt als referentie. Bij stroompolarisatie wordt de stroom door een geaard sterpunt als referentie gebruikt. In Vision Network Analysis wordt de richting van de aardfout bepaald middels spanningspolarisatie aangezien dit de meest toegepaste vorm is.

Hieronder in Figuur 21 een illustratie van een fase-aarde kortsluiting in fase a in een distributienet geaard middels een nulpunttransformator. De ongestoorde vectoren van zowel spanning als stroom zijn in respectievelijk blauw en groen getekend. Bij een laagohmige fout naar aarde in fase a verschuift het sterpunt en draait de spanningsvector van de verstoorde fase, als gevolg van deze evenementen nemen de spanningen in de niet-gestoorte fasen toe en draaien ook deze vectoren. De foutspanningen zijn in het rood weergegeven. De spanning wordt gemeten middels een opendriehoekmeting, de input van het relais is de som van de drie spanningsvectoren ($U_a + U_b + U_c$) welke gelijk is aan $3V_0$.



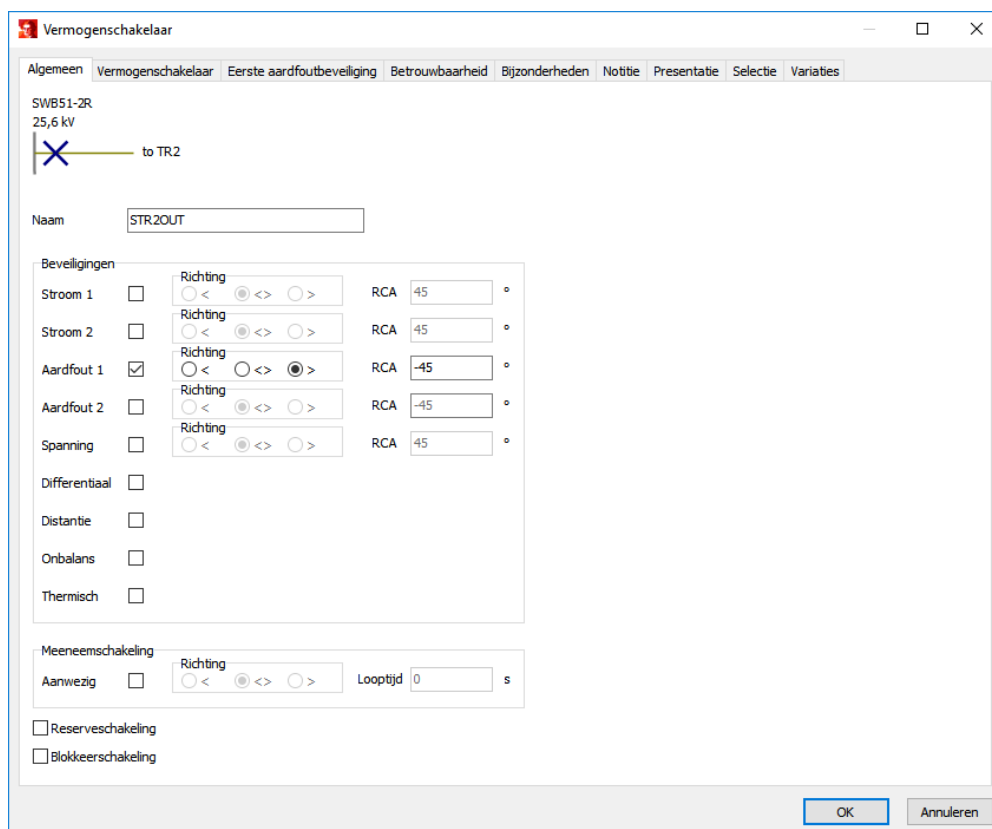
Figuur 21 Vectordiagram energierichtingrelais, aardfout ANSI 67N

De foutstroom I_{a_fault} is groot vergeleken met de stromen I_{b_fault} en I_{c_fault} waardoor I_{a_fault} ongeveer gelijk is aan drie keer de homopolaire stroom, $3I_0$ (stroomvectoren zijn niet op schaal getekend). Deze stroomvector wordt vervolgens 180° gedraaid. In sommige gevallen wordt de spanningsvector $3V_0$

gedraaid, dit heeft te maken met conventie en heeft geen invloed op de werking. Om de betrouwbaarheid van de richtingsbepaling te garanderen wordt de spanningsvector $3V_o$, welke als referentie dient voor de richtingsbepaling, gedraaid zodat deze in fase komt met de homopolaire stroom $-3I_o$. Deze hoek, RCA (Relay Characteristic Angle), is afhankelijk van het homopolaire circuit en zal dus specifiek voor iedere toepassing bepaald moeten worden. De RCA is in de huidige microprocessorrelais vrij te parametren, in eerdere relais waren deze hoeken vast en werd het type relais gekozen op basis van de karakteristieke hoek (RCA). Als richtlijn worden door Alstom (Alstom, 2011) de volgende hoeken voorgeschreven:

- Weerstand gearde netten: 0° RCA;
- Distributienetten, star geaard: -45° RCA;
- Transportnetten, star geaard: -60° RCA.

De locatie van de fout wordt zoals hierboven beschreven bepaald door de hoek te bepalen tussen de referentie $3V_o$ en de homopolaire foutstroom $3I_o$. De maximale gevoeligheid van het relais wordt bereikt als de gemeten stroom in fase ligt met de referentievectro $3V_{o_rotated}$ (maximum torque line). Indien de stroomvector 90° voor- of na-ijlt op de referentievectro (zero torque line) wordt de kleinste gevoeligheid bereikt. Bij een voorwaarts gericht richtingsrelais zoals in Figuur 22 vindt afschakeling plaats indien de negatieve stroomvector $-3I_o$ zich in het grijze gebied van Figuur 21 bevindt.



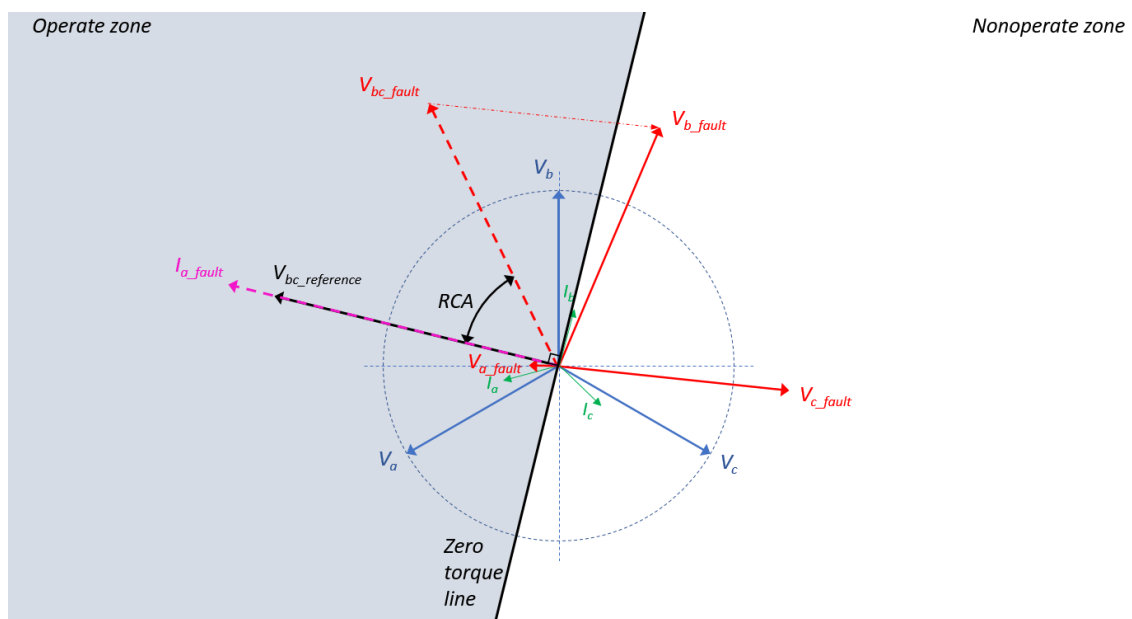
Figuur 22 Invoer richtingsgevoeligheid aardfoutbeveiliging Vision Network Analysis

In de Engelstalige literatuur is deze functie beschreven als: ‘Directional Ground Fault Protection’ en wordt aangeduid met het ANSI nummer 67N.

7 **ENERGIERICHTINGRELAIS, OVERSTROOM (ANSI 67)**

Het energierichtingsrelais bestaat in principe uit twee basiselementen: een maximaalstroom-tijdrelais en een richtingsrelais. Het MST bepaalt of de stroom boven de aanspreekwaarde ligt en bepaalt het moment van afschakeling afhankelijk van de ingestelde karakteristiek. Bij overschrijding van de aanspreekwaarde van het MST wordt de richting van de stroom, in de fase waarin deze overschrijding voorkomt, bepaald door het richtingsrelais. Indien de stroom de ingestelde karakteristiek van het MST snijdt en indien de richting correspondeert met de ingestelde richting tript het relais. Is de stroom in tegengestelde richting verhinderd het richtingsrelais het uitschakelcommando.

Er zijn verschillende manieren om de richting van de stroom te bepalen op basis van de gemeten stromen en spanningen. Bij het energierichtingsrelais is de '90° Quadrature Connection' de standaard aansluitmethode. De meting van de spanning vindt hierbij plaats in de niet-gestoorde fasen, op deze manier is een voldoende grote spanningsvector voorhanden (gekoppelde spanning), de spanning in de gestoorde fase kan immers dalen tot nul. Voor de beveiliging van fase a wordt de fasestroom I_a en de gekoppelde spanning V_{bc} gebruikt. Om maximale gevoeligheid te bereiken wordt de gekoppelde spanning met hoek RCA gedraaid. De hoek RCA was bij de oudere relais standaard 30° of 45°, bij de tegenwoordige microprocessorrelais is deze hoek geheel instelbaar. Hieronder in Figuur 23 is de werking van het energierichtingsrelais geïllustreerd middels het voorbeeld uit Hoofdstuk 2 maar nu gezien door het overstroomrelais.



Figuur 23 Vectordiagram energierichtingsrelais, overstroom ANSI 67

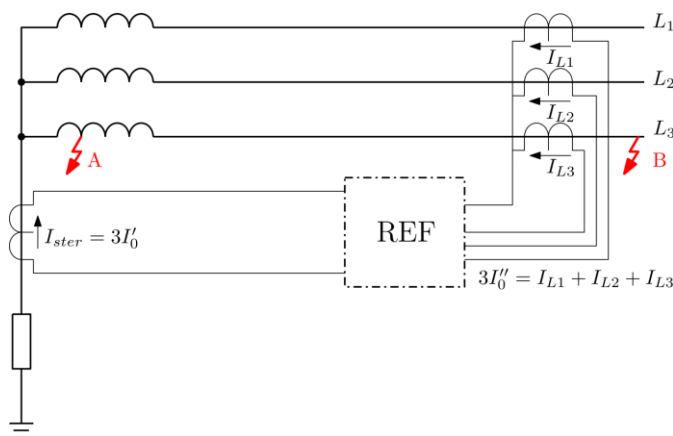
De maximale gevoeligheid van het energierichtingsrelais wordt bereikt indien de referentiespanning in fase is met de foutstroom, in dit voorbeeld in fase met I_{a_fault} . De extra hoekverdraaiing, RCA, is in dit geval 50°. Het richtingselement zal een trip van het relais toestaan indien de stroomvector I_{a_fault} zich in het grijze gebied van Figuur 23 bevindt.

Bovenstaande methode wordt op iedere fase toegepast, indien één van de stromen de aanspreekwaarde van het overstroomrelais overschrijdt wordt de richtingsbepaling van deze fase gestart. Bij meerdere gestoorde fasen wordt de richtingsbepaling voor iedere fase afzonderlijk gestart.

8 AARDFOUTDIFFERENTIAALBEVEILIGING (ANSI 87N)

Aardfoutbeveiliging op basis van overstroom is niet altijd een adequate vorm van beveiliging van transformatoren en generatoren. Met name transformatoren met een (impedantie)geaard sterpunt is moeilijk te beveiligen tegen aardfouten in windingen dichtbij het sterpunt, de primaire stroom blijft immers bij een fout tot ongeveer 40% vanaf het sterpunt onder de 1.5 pu. Of de overstroombeveiliging in het primaire circuit van de transformator op deze stroom zal trippen is geheel afhankelijk van de basisbelasting en de instellingen van het relais.

Aardfoutdifferentiaalbeveiliging (in Engelstalige literatuur: Restricted Earth Fault (REF) protection) kan in dezen een oplossing bieden door een snelle, gevoelige en gerichte beveiliging van transformator of machine in geval van een aardfout in de windingen. Hieronder in Figuur 24 het principe van de aardfoutdifferentiaalbeveiliging:



Figuur 24 Aardfoutdifferentiaalbeveiliging principe

Tijdens de normale bedrijfssituatie loopt er geen stroom door het sterpunt waardoor: $3I_0' = 3I_0'' = 0$. Bij een fase-aardfout binnen de beveiligde zone, fout A, loopt er een stroom door het sterpunt en afhankelijk van het systeem is ook de som van de fasestromen $3I_0''$ niet gelijk aan nul. Beide stromen ($3I_0'$ en $3I_0''$) zijn in dit geval positief waardoor $3I_0' + 3I_0'' \neq 0$. Het relais zal een uitschakelcommando geven wanneer $|3I_0' + 3I_0''|$ de ingestelde waarde ($dI_{>}$) overschrijd en de tijdsduur van de overschrijding langer is dan de ingestelde tijd ($t_{>}$).

In geval van een fase-aardfout buiten de beveiligde zone, fout B in Figuur 24, loopt er een stroom door het sterpunt welke in amplitude gelijk is aan de som van de stromen door de fasen $3I_0''$. De richting is echter tegengesteld waardoor $3I_0' + 3I_0'' = 0$, het relais zal op een dergelijke fout niet aanspreken. In Vision wordt de verzadiging van stroomtransformatoren buiten beschouwing gelaten, deze kan echter in de praktijk bij een externe fout een foutieve afschakeling veroorzaken. Het foutief afschakelen kan worden voorkomen door het toepassen van stabilisatie. Deze stabilisatie is alleen actief bij externe fouten, in Vision heeft verzadiging van stroomtransformatoren geen invloed op de functionaliteit van de aardfoutdifferentiaalbeveiliging en derhalve is de stabilisatie niet meegenomen in de modellering.

De aardfoutdifferentiaalbeveiliging is in Vision gekoppeld aan één vermogensschakelaar en één element of tak met een geaard sterpunt. De som van de stromen door de vermogensschakelaar en de som van de stromen op het punt van connectie van een element of tak worden gebruikt voor de vergelijking, niet de daadwerkelijke stromen door het sterpunt. Eventueel kunnen er meerdere vermogensschakelaars afgeschakeld worden met behulp van de meeneemerschakeling, dit geschied op het niveau van de

vermogenschakelaar en niet op die van afzonderlijke beveiligingsfuncties. Hieronder in Figuur 25 het invulformulier in Vision Network Analysis:

Figuur 25 Invoer aardfoutdifferentialbeveiliging Vision Network Analysis

9 ONBALANSBEVEILIGING (ANSI 46)

Inverse stroom wordt gegenereerd door onbalans in het net, deze onbalans kan veroorzaakt worden door ongebalanceerde belasting, verlies van een fase of een fase-aarde fout. Onbalansbeveiliging wordt veelal toegepast bij asynchrone machines. De inverse stroomcomponent produceert bij deze machines een flux in de luchtspleet (air gap) in tegengestelde richting van het draaiveld. Het effect is een rotorstroom met een dubbele frequentie dat in combinatie met een hogere rotorweerstand (skin-effect) resulteert in een versnelde opwarming. Conform de IEC60034-1 ("Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and Performance") mag de inverse component (U_2) gedurende lange tijd niet groter zijn dan 1% van de normale component (U_1), voor enkele minuten is een percentage van 1,5% toegestaan. Middels deze verhouding kan de instelwaarde voor $I_{2>}$ worden bepaald:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}$$

waar in steady-state geldt:

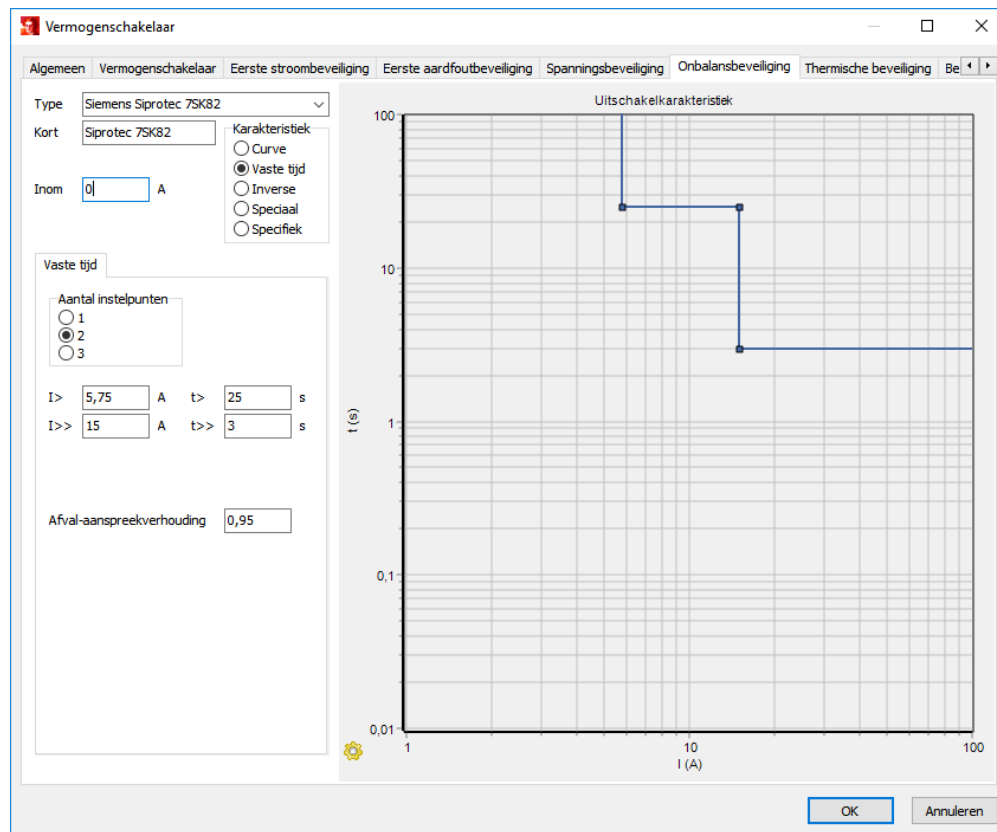
$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{I_{aanloop}}{I_{nom}}$$

dit geeft:

$$I_{2>} = 0,015 \cdot I_{aanloop}$$

Bovenstaande stroom kan de machine gedurende enkele minuten voeren, een praktische waarde voor $t_{2>}$ is 20 seconden. De tweede trap, $I_{2>>}$, kan op ongeveer 40% van de nominaalstroom worden ingesteld met een bijhorende tijd van 3 seconden i.v.m. transiënten.

In sommige relais wordt het percentage van de inverse component bepaald ten opzichte van of de normale component of de nominaalstroom van het te beveiligen object. Bij toepassing van onbalansbeveiliging op machines wordt als referentie de nominaalstroom van de machine aangeraden. De invoer in Vision betreft primaire stromen zoals hieronder weergegeven in Figuur 26, de trip-karakteristiek is zowel van het type vaste stroom-tijd als invers. Deze karakteristieken zijn beschreven in de hoofdstukken 2 en 4, de werking van het relais blijft gelijk behalve dat het relais nu aanspreekt op de inverse stroom component (I_2).



Figuur 26 Invoer onbalansbeveiliging Vision Network Analysis

10 THERMISCH RELAIS (ANSI 49)

Om een motor tegen thermische effecten te beschermen wordt het thermisch relais toegepast. Het relais genereert een thermisch equivalent van de machine als functie van de normale en negatieve component van de motorstroom, hiermee wordt zowel de stator als de rotor beveiligd tegen opwarming als gevolg van overbelasting en onbalans.

10.1 Thermische belastbaarheidskarakteristiek

De vele verschillende motoren en de diversiteit van applicaties resulteert in een zeer complexe thermische relatie. Het is hierdoor praktisch onmogelijk om de thermodynamica van de motor exact met een generiek wiskundig model te beschrijven. Het is echter wel mogelijk om de machine als een homogene massa te beschouwen, hierdoor kan de thermodynamica van de machine beschreven worden middels een eerste orde differentiaalvergelijking. In het tijdsdomein en opgelost voor t als functie van I_{eq} wordt de volgende vergelijking verkregen:

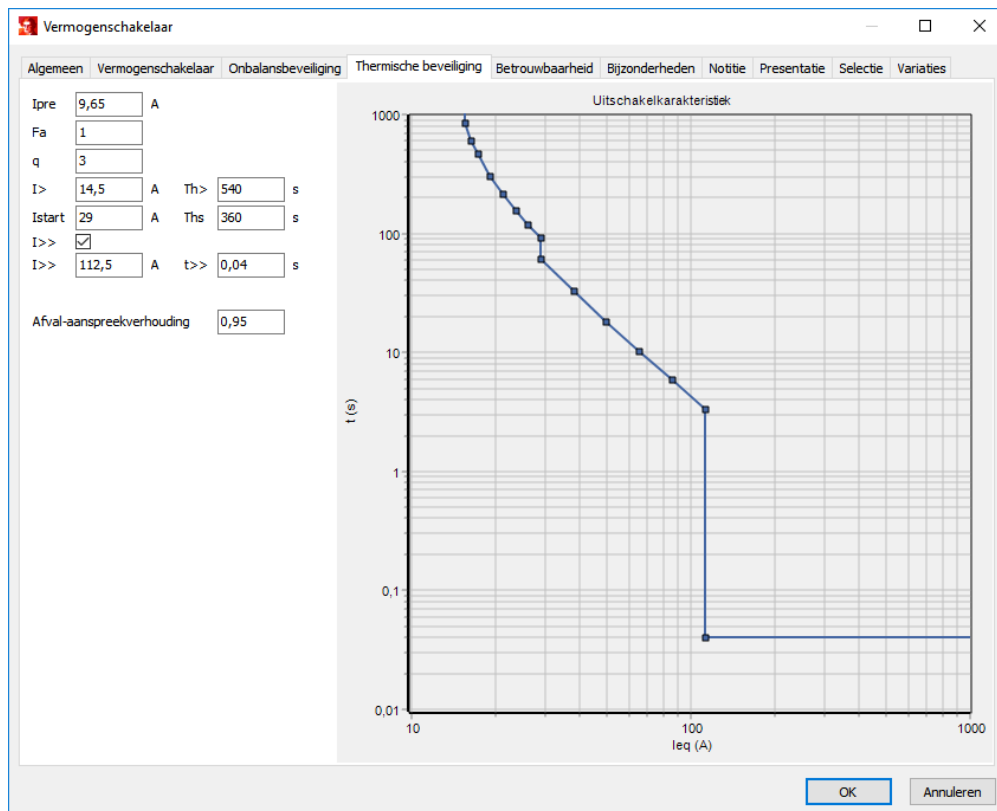
$$t_{trip}(I_{eq}) = \tau \cdot \ln \left(\frac{F_a \cdot I_{eq}^2 - I_{pre}^2}{F_a \cdot I_{eq}^2 - I_{>}^2} \right) \tag{11}$$

waar:

- $t_{trip}(I_{eq})$ triptijd als functie van de equivalente stroom;
- I_{eq} equivalente stroom;
- τ thermische tijdsconstante;
- F_a omgevingstemperatuur factor;
- $I_{>}$ aanspreekstroom van het relais, $I_{>} = I_{nom} \cdot k$ ($k = 1 \dots 1,5$);
- I_{pre} initiële belastingsstroom (loadflow resultaat).

Met behulp van deze vergelijking is een stroom-/tijd karakteristiek te tekenen die binnen de beveiligingsmodule gehanteerd wordt. Het thermisch relais wordt vervolgens behandeld als een maximum stroom-/tijdrelais.

De initiële temperatuur van de machine heeft grote invloed op de tripkarakteristiek van het relais, deze is afhankelijk van de omgevingstemperatuur en de belasting. Deze initiële belasting (I_{pre}) wordt opgegeven in Ampère. Deze zal dus per situatie verschillen, bij aanpassing van het asvermogen van de machine zal deze herzien moeten worden. Hieronder in Figuur 27 de invoer van een thermisch relais in Vision Network Analysis.



Figuur 27 Invoer thermisch relais Vision Network Analysis

Machines zijn ontworpen te opereren bij een specifieke omgevingstemperatuur met een bepaalde tolerantie. Mocht de daadwerkelijke omgevingstemperatuur hoger zijn dan waar de machine voor is ontworpen kunnen de windingen dusdanig opwarmen dat de maximale temperatuur overschreden wordt zelfs als de machine binnen de belasting grenzen opereert. De thermische belastbaarheidskarakteristiek kan middels de factor F_a aan deze afwijkende omgevingstemperatuur worden aangepast. Deze factor is als volgt gedefinieerd:

$$F_a = \frac{T_{max} - T_{limit}}{T_{max} - T_a} \tag{12}$$

waar:

- T_{max} maximale machine temperatuur conform de IEC 60085;
- T_a actuele omgevingstemperatuur;
- T_{limit} maximale omgevingstemperatuur waarvoor de machine ontworpen is.

Als een motor opereert rond de nominale snelheid wordt deze optimaal gekoeld. Tijdens de start van de machine is deze koeling sterk gereduceerd, terwijl er juist nu een hoge stroom opgenomen wordt. Sommige relais voorzien hierin door een tweede 'heating' tijdsconstante, τ_{hs} , op te nemen. Bij een stroom hoger dan een vooraf ingestelde waarde (typisch 1 tot 5 x $I_{>}$) wordt een gereduceerde tijdsconstante gebruikt in het algoritme. Deze drie tijdsconstanten zijn hieronder gegeven met de bijhorende voorwaarden:

- τ_h thermische tijdsconstante opwarming machine (heating) ($I_{stop} \leq I_{eq} < I_{start}$);
- τ_{hs} thermische tijdsconstante opwarming machine tijdens start ($I_{eq} \geq I_{start}$);
- τ_c thermische tijdsconstante koeling machine ($I_{eq} < I_{stop}$).

De beveiligingsmodule geeft inzicht in het gedrag van beveiligingseenheden in geval van een kortsluiting in het net, aangezien I_{stop} in de range van $0,05$ tot $0,2 \times I_N$ ligt wordt de 'cooling' tijdsconstante τ_c niet meegenomen. De stromen tijdens deze analyse zullen zich immers altijd buiten deze range bevinden.

10.2 Equivalente stroom

Onbalans in de statorwikkelingen van de motor heeft tot gevolg dat de rotor van de machine opwarmt, deze opwarming is niet meegenomen in de thermische belastbaarheidskarakteristiek. Om het effect van onbalans mee te nemen wordt gebruik gemaakt van een equivalente stroom, deze stroom wordt als volgt berekend:

$$I_{eq} = \sqrt{I_1^2 + q \cdot I_2^2}$$

waar:

- I_{eq} equivalente stroom;
- I_1 normale component van de stroom;
- I_2 inverse component van de stroom;
- q onbalansfactor.

De q-factor wordt gebruikt om de geproduceerde warmte als gevolg van de inverse component mee te nemen in de thermische belastbaarheidskarakteristiek. Deze factor is gelijk aan de verhouding van de inverse rotor weerstand en de normale rotor weerstand bij nominale snelheid. Voor de meeste motoren zal de q-factor tussen de 3 en de 5 liggen.

10.3 Reset

Mocht na het aanspreken van het relais ($I_{eq} > I_N$) de stroom dalen tot onder de aanspreekwaarde dan zal het relais zich uiteindelijk geheel resetten. De temperatuur in de machine – waarvan het relais een thermisch equivalent bevat (model) – zal afnemen tot deze een nieuwe steady-state waarde aanneemt. De temperatuur is afhankelijk van de actuele stroom, I_{eq} , deze zal in de nieuwe sequentie als I_{pre} gebruikt worden om de initiële temperatuur te vertegenwoordigen. De resettijd van een thermisch relais is – in tegenstelling tot een maximaal stroom-/tijdrelais – vrij lang. Namelijk drie tot vijf keer de tijdsconstante, τ_h , typische waarden voor τ_h zijn 3 tot 8 minuten. Hetgeen resulteert in een totale resettijd van 540 tot 2400 seconden. Dit is buiten de scope van de beveiligingsanalyse, daarnaast is het zeer onwaarschijnlijk dat de stroom binnen een analyse gedurende langere tijd onder de nominaalstroom van de machine komt. De reset van het thermisch relais is hierdoor niet meegenomen in de modellering.

Verantwoording

De eerste orde differentiaalvergelijking die de temperatuur van de machine beschrijft als functie van stroom is hieronder gegeven:

$$R_T r I_{eq}^2 = \tau \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t)$$

In het tijdsdomein:

$$\theta(t) = R_T r I_{eq}^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

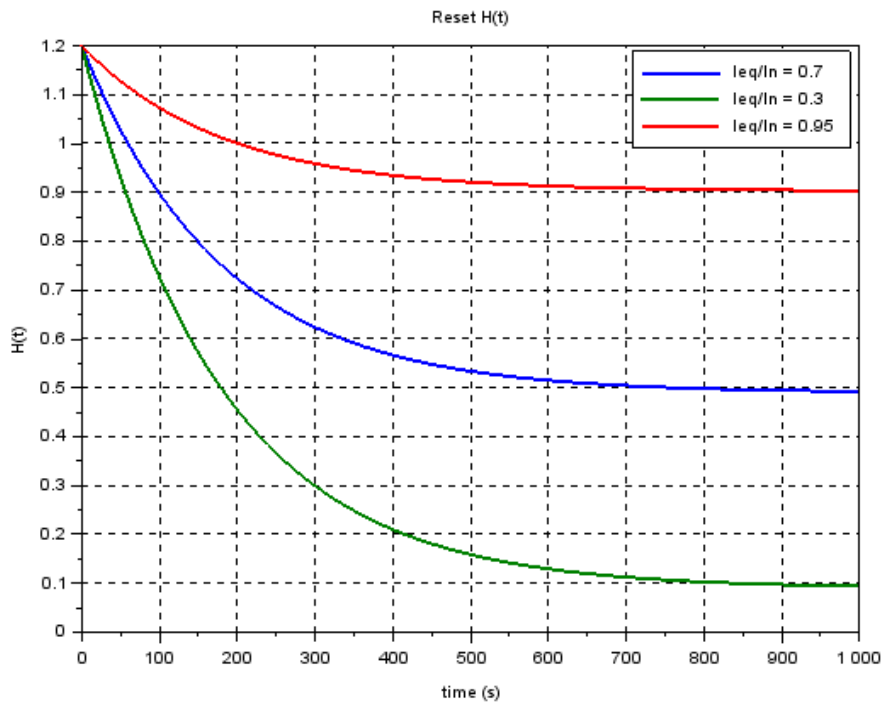
Inclusief initiële belasting en omgevingstemperatuur:

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_n} = \left(\frac{I_{eq}}{I_n}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{\theta_0}{\theta_n} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\theta_{amb}}{\theta_n}$$

Voor de reset van het relais vanaf de maximale temperatuur geldt de onderstaande vergelijking (omgevingstemperatuur is hier niet meegenomen):

$$H(t) = \frac{\theta(t)}{\theta_n} = \left(\frac{I_{eq}}{I_n}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{\theta_{max}}{\theta_n} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Beneden geplot in Figuur 28 de respons van H(t) vanaf $\theta_{max} / \theta_n = 1,2$ naar een stroom onder de nominale stroom van de machine ($\tau = 3 \text{ min}$):



Figuur 28 Overdracht H als functie van tijd

Een volledige reset zal – wiskundig gezien – een oneindige tijd in beslag nemen, praktisch is het om de settling time te bepalen bij 95 tot 98 % van de uiteindelijke waarde. In een uiterst geval zal de stroom resetten vanaf $H(t) = 1,2$, dit is de temperatuur waar het relais (in dit voorbeeld) een tripcommando zal geven. Na minimaal 30 seconden zal de machine bij een stroom van $0,3 \times I_n$ de nominale temperatuur bereiken ($H = 1$). Binnen $\tau = 180 \text{ s}$ zal het relais tot 63% van de gehele stap resetten. Deze tijden vallen buiten de range van de beveiligingsmodule, de tijden liggen hier typisch tussen de 0,01 en de 10 seconden. Hierdoor is de reset van het thermisch relais te verwaarlozen binnen deze module en daarmee binnen de modellering.

REFERENTIES

Alstom. (2011). *Network Protection and Automation Guide*. Alstom Grid.

BBC. (1985). *Static Relay for the Protection of Motors Types ITX192 ITX193, relays and protection schemes*. Baden: BBC Brown, Boveri & Company, Ltd.

Blackburn, J. L., & Domin, T. J. (2006). *Protective Relaying, Principles and Applications*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

GEC. (sd). *Voltage Restraint Overcurrent Relay, Types CDV21 and CDV61*. Stafford: GEC Measurements.

Horowitz, S. H., & Phadke, A. G. (2014). *Power System Relaying*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Valdes, M., Cline, C., Hansen, S., & Papallo, T. (2009). *Selectivity Analysis in Low Voltage Power Distribution Systems with Fuses and Circuit Breakers*. IEEE.