

PHASE TO PHASE

Invloed overzetverhouding op gedrag transformatoren

o8-264 pmo

16 december 2008

Phase to Phase BV
Utrechtseweg 310
Postbus 100
6800 AC Arnhem
T: 026 356 38 00
F: 026 356 36 36
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	4
1.1	Invoergegevens tweewikkelingstransformator HS/MS	4
1.2	Invoergegevens driewikkelingstransformator HS/TS/MS.....	7
2	Storing Sequentieel.....	10
3	IEC 909	12
4	IEC 60909	14
5	Conclusie.....	15

1 INLEIDING

Nominale transformatorspanningen kunnen afwijken van de nominale knooppuntspanningen waar de betreffende wikkelingen op zijn aangesloten. Bovendien is vaak een trappenschakelaar op de transformator aangebracht. Afwijkende nominale spanningen en instellingen van de trappenschakelaar hebben invloed op de berekende resultaten. Dit document beschrijft de uitwerking op loadflow- en kortsluitberekeningen, zoals die in Vision zijn geïmplementeerd.

De beschrijving wordt toegelicht aan de hand van een concreet meetrapport van een 150/10 kV tweewikkelingstransformator en een 150/50/10 kV driewikkelingstransformator.

1.1 Invoergegevens tweewikkelingstransformator HS/MS

Uit het meetrapport van een willekeurige HS/MS-transformator lezen we eerst de algemene gegevens, zoals vermogen, spanning en wikkelingen.

Vermogen	: 66 MVA bij gedwongen luchtcirculatie 46 MVA bij natuurlijke koeling
Hoogspanning	: 145,5 kV, onder belasting regelbaar met +12 en -11 trappen à 2,25 kV; uiterste standen 172,50 resp. 120,75 kV.
Laagspanning	: 10,5 kV
Schakeling	: Yd 5, met volwaardig geïsoleerd uitge- voerd sterpunt.

Figuur 1 Algemene gegevens tweewikkelingstransformator

Het vermogen is gegeven bij gedwongen luchtcirculatie (ONAF) en bij natuurlijke koeling (ONAN). Het nominale vermogen (S_{nom}) waarmee wordt gerekend is dat bij gedwongen koeling. De nominale spanningen van de HS- en MS-wikkelingen zijn 145,5 kV en 10,5 kV. De trappenschakelaar bevindt zich aan de HS-zijde. Volgens het meetrapport komt stand 1 van de trappenschakelaar overeen met de hoogste spanning van de HS-wikkeling. Stand 13 komt overeen met de nominale spanning van de HS-wikkeling en stand 24 komt overeen met de laagste spanning. Hierom is de invoer van de trapstanden 'min' 24, 'nom' 13 en 'max' 1.

Het meetrapport geeft ook informatie over de nominale spanningen en stromen voor enkele standen van de trappenschakelaar.

Ter controle levert het product van nominale stromen en spanningen, vermenigvuldigd met $\sqrt{3}$ bij elke trapstand steeds het nominale vermogen bij geforceerde koeling op:

- primair, trapstand 1 : $172.5\text{ kV} \times 220.9\text{ A} \times \sqrt{3} = 66000\text{ kVA}$
- primair, trapstand 13 : $145.5\text{ kV} \times 261.9\text{ A} \times \sqrt{3} = 66000\text{ kVA}$
- primair, trapstand 24 : $120.75\text{ kV} \times 315.6\text{ A} \times \sqrt{3} = 66000\text{ kVA}$
- secundair : $10.5\text{ kV} \times 3629\text{ A} \times \sqrt{3} = 66000\text{ kVA}$

Onderstaande tabel geeft ook de gegarandeerde waarde voor het kortsluitverlies. De waarde voor de middenstand van de trappenschakelaar wordt gebruikt voor de invoer van Vision.

Stand van de regelschakelaar		1	8	9	13	16	17	24
Spanningen aan $\frac{h.s.}{l.s.}$ zijde	kV	172,5	156,75	154,5	145,5	138,75	136,5	120,75
	kV	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Nom.stromen aan $\frac{h.s.}{l.s.}$ zijde bij 66 MVA	A	220,9	243,1	246,6	261,9	274,6	279,2	315,6
	A	3629	3629	3629	3629	3629	3629	3629
<u>Gemeten wikkeliingsweerstand</u>								
bij 19,9°C								
hoogsp.wikkelingen tussen klemmen:								
A en N	ohm	0,8120	0,7248	0,6919	0,6381	0,6039	0,5872	0,4957
B en N	ohm	0,8117	0,7245	0,6914	0,6370	0,6035	0,5872	0,4955
C en N	ohm	0,8125	0,7246	0,6927	0,6378	0,6042	0,5886	0,4958
laagspanningswikkeling tussen klemmen a en b	ohm	0,005218						
b en c	ohm	0,005212						
a en c	ohm	0,005217						
<u>Berekende Joule-verliezen</u>								
bij 66 MVA								
a) bij 19,9°C	kW	221,9	231,5	229,3	234,2	239,6	240,5	251,1
b) bij 75°C = $\frac{235+75}{235+19,9} \cdot a$	kW	269,9	281,6	278,9	284,8	291,4	292,5	305,1
<u>Kortsluitverlies</u> bij 66 MVA								
c) gemeten waarde bij 19,9°C	kW	300,0	297,4	297,9	294,3	296,0	304,1	302,1
d) extra verlies bij 19,9°C = c-a	kW	78,1	65,9	68,6	60,1	56,4	63,6	51,0
e) extra verlies bij 75°C = $\frac{235+19,9}{235+75} \cdot d$	kW	64,2	54,2	56,4	49,4	46,4	52,3	41,9
f) op 75°C omgerekend kortsl. verlies = b+e	kW	334,1	335,8	335,3	334,2	337,8	344,8	347,3
g) gegar.waarde (tol.+0 -2 %)	kW	316	-	-	325	-	-	340

Figuur 2 Nominale spanningen, stromen en kortsluitverliezen bij verschillende trapstanden

De kortsluitspanning is gemeten voor verschillende trapstanden. Voor de middenstand van de trappenschakelaar is u_k gelijk aan 24 %.

Stand van de regelschakelaar		1	8	9	13	16	17	24
<u>Kortsluitspanning</u> , betrokken op 66 MVA								
Gemeten waarde aan h.s.-zijde	kV	46,01	39,06	38,56	34,87	32,45	32,30	26,83
Gemeten waarde	% U_n	26,7	24,9	25,0	24,0	23,4	23,7	22,2
Gegarandeerde waarde (tol.+10%)	% U_n	26,0	-	-	24,0	-	-	22,5

Figuur 3 Kortsluitspanningen bij verschillende trapstanden

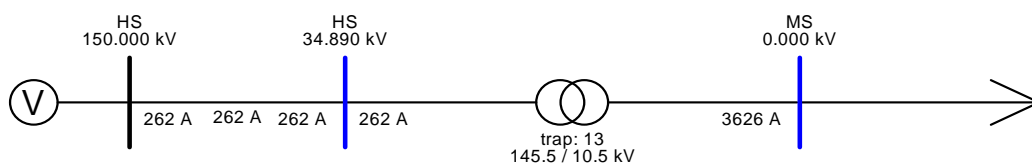
De invoer voor Vision is voor deze transformator samengevat in het invoerscherm.

The screenshot shows a software window titled 'Transformator' with several tabs: 'Algemeen', 'Transformator', 'Aansluiting', 'U-regeling', 'Betrouwbaarheid', 'Bijzonderheden', 'Beeld', and 'Selectie'. The 'Transformator' tab is active. The interface contains various input fields and radio buttons for configuring transformer parameters:

- Type:** A dropdown menu.
- Korte naam:** A text input field.
- Snom:** 66 MVA.
- Prijs:** 0 €.
- Wikkeling 1:** 145.5 kV.
- Wikkeling 2:** 10.5 kV.
- Schakeling:** Radio buttons for D, Y, YN, Z, ZN and d, y, yn, z, zn.
- Trapzijde:** Radio buttons for w1 and w2.
- uk:** 24 %.
- Pk:** 325 kW.
- Pnul:** 0 kW.
- Inul:** 0 A.
- Z0:** 0 Ohm.
- R0:** 0 Ohm.
- Ik (2s):** 0 kA.
- Klokgetal:** 5.
- Trapgrootte:** 2.25 kV.
- Trap:** A table with columns 'min', 'nom', 'max' and values 24, 13, 1.

Figuur 4 Invoerscherm Vision: typegegevens tweewikkelingstransformator

Ter controle kan de kortsluitproef worden nagebootst door de transformator aan secundaire zijde kort te sluiten door middel van een oneindig grote belasting (benaderd met een constante-impedantie-belasting van 99 999 999 MW) en aan primaire zijde te voeden door middel van een verbinding met zodanige impedantie, dat primair en secundair de nominale stroom vloeien (zie tabel in figuur 2). De primaire spanning is dan de kortsluitspanning.



Figuur 5 Simulatie kortsluitproef

Trapstand	Impedantie (Ohm)	U_k (kV)	u_k (%)
1	283	41.49	24.0
13	254	34.89	24.0
24	221	29.02	24.0

De berekende kortsluitspanningen wijken af van de metingen in de werkelijke proef (zie figuur 3). Dit komt doordat bij een wijziging van de trapstand het magnetische veld in de transformator verandert. Als gevolg wijzigt de impedantie en dus de relatieve kortsluitspanning. Door deze constant te houden ontstaat in dit voorbeeld een maximale fout van 11% voor trapstand 1 en 6% voor trapstand 24. Voor praktische berekeningen worden de relatieve kortsluitspanning en de kortsluitverliezen van de transformator constant gehouden. In dit geval zijn dat 24% en 325 kW. Indien men de transformator

nauwkeuriger wil modelleren, moeten voor elke trapstand de bijbehorende relatieve kortsluitspanning (volgens de tabel in figuur 3) en de kortsluitverliezen (volgens de tabel in figuur 2) worden aangepast.

1.2 Invoergegevens driewikkelingstransformator HS/TS/MS

Het betreft in dit voorbeeld een Yy0d11 transformator voor de nominale spanningen: 150/52,5/10,5 kV. De gegevens zijn afgeleid uit het meetrapport van een bestaande transformator. De transformator heeft volgens het meetrapport een nominaal vermogen van 70 MVA op het hoogspannings- en tussen-spanningsniveau. Op het middenspanningsniveau heeft de transformator een vermogen van 33 MVA.

WIKKELINGSWEERSTANDEN-JOULVERLIEZEN-KORTSLUITVERLIEZEN-KORTSLUITSPANNING- MONOPOLAIRE GROOTHEDEN							
Stand v.d. regel(aftak-) schakelaar		1	7	11	15	21	
Onderzochte transformatie	kV	172,5	150,0	150,0	141,0	127,5	
	kV	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	
Nominale stromen bij 70 MVA	A	234,3	254,2	269,4	286,6	317,0	
	A	769,8	769,8	769,8	769,8	769,8	
Onderzochte transformatie	kV	172,5	172,5	150,0	150,0	150,0	
	kV	10,5	9,975	9,975	10,5	11,025	
Nominale stromen bij 33 MVA	A	110,4	110,4	127,0	127,0	127,0	
	A	1815	1910	1910	1815	1720	
Onderzochte transformatie	kV	52,5	52,5	52,5			
	kV	9,975	10,5	11,025			
Nominale stromen bij 33 MVA	A	362,9	362,9	362,9			
	A	1910	1815	1728			

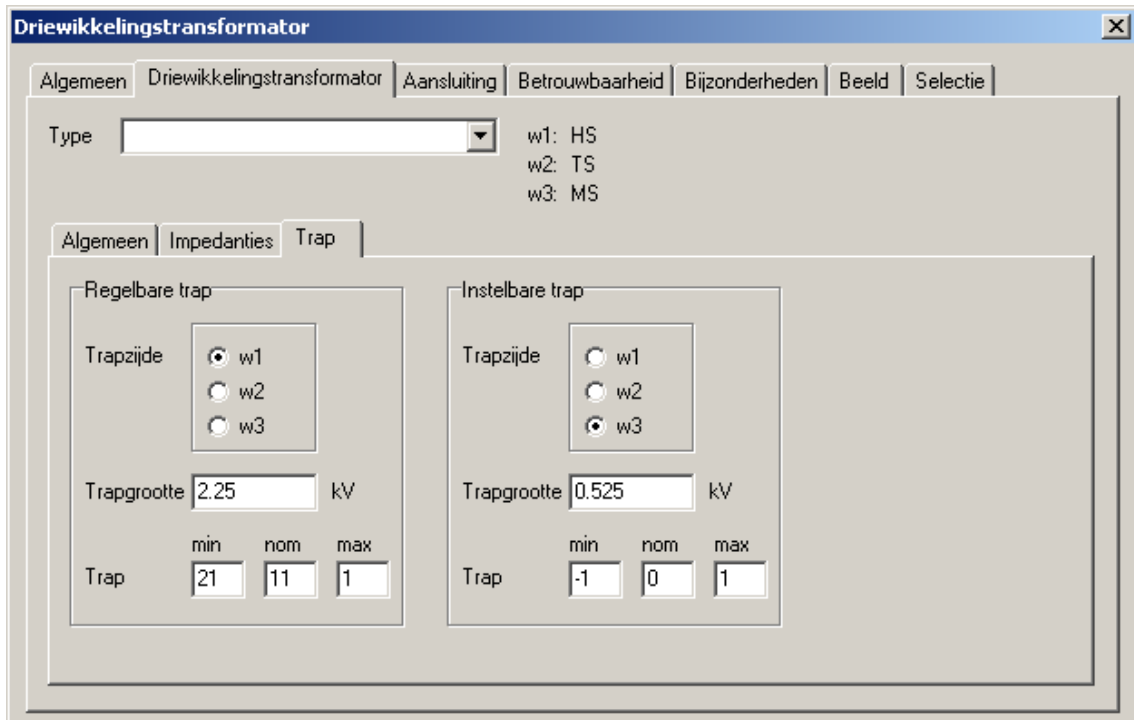
De trappenschakelaar aan de HS-zijde is regelbaar in 21 stappen van 2,25 kV van 1 tot en met 21. De spoelen aan de MS-zijde zijn voorzien van een instelbare trappenschakelaar met drie stappen van 0,525 kV met aanduiding -1, 0 en 1. In onderstaand invoerscherm zijn de algemene gegevens ingevuld.

The screenshot shows a software window titled "Driewikkelingstransformator" with several tabs: "Algemeen", "Driewikkelingstransformator", "Aansluiting", "Betrouwbaarheid", "Bijzonderheden", "Beeld", and "Selectie". The "Algemeen" tab is active. It contains a "Type" dropdown menu and three winding labels: w1: HS, w2: TS, w3: MS. Below this are sub-tabs for "Algemeen", "Impedanties", and "Trap". The "Algemeen" sub-tab contains the following fields:

- Snom: 70, 70, 33 (MVA)
- Unom: 150, 52.5, 10.5 (kV)
- Ik (2s): 0, 0, 0 (kA)
- Prijs: 0 (€)
- Schakeling: Radio buttons for D, Y, YN, Z, ZN for each winding. For w1, YN is selected. For w2, yn is selected. For w3, d is selected.
- Klok w1-w2: 0
- Klok w1-w3: 5

Figuur 6 Invoerscherm Vision: typegegevens driewikkelingstransformator

De trappenschakelaar en de instelbare aftakkingen zijn als volgt ingevoerd:



Figuur 7 Invoerscherm Vision: gegevens trappenschakelaars

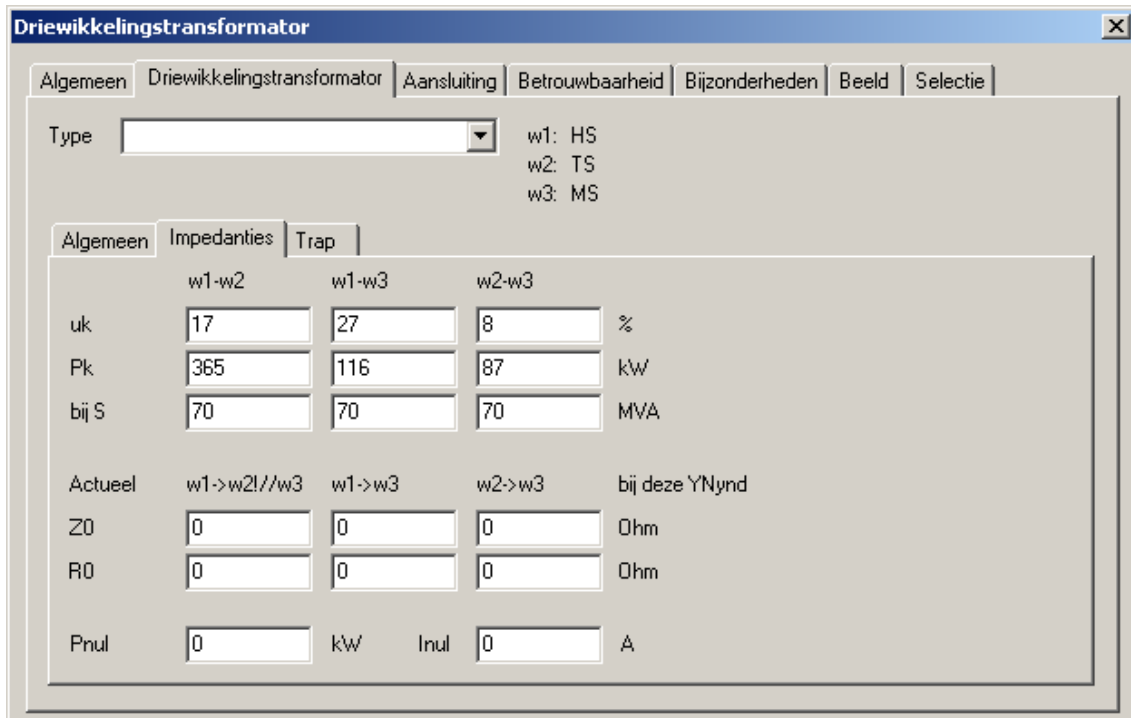
WIKKELINGSWEERSTANDEN-JOULEVERLIEZEN-KORTSLUITVERLIEZEN-KORTSLUITSPANNING
HOMOPOLAIRE GROOTHEDEN

Stand v.d. regel(aftak-) schakelaar		1	1	11	11	11
Onderzochte transformatie	kV	172,5	172,5	150,0	150,0	150,0
Nominale stromen bij 33 MVA	kV	10,5	9,975	9,975	10,5	11,025
	A	110,4	110,4	127,0	127,0	127,0
	A	1815	1910	1910	1815	172,8
Kortsluitspanning						
Gemeten waarde bij 70 MVA	%U _n	26,1	26,2	25,2	25,1	25,1
Gespecificeerde waarde	%	27,0	-	-	27,0	-
Tolerantie	%	+ 10	-	-	+ 10	-

Figuur 8 Uit het meetrapport van een driewikkelingstransformator

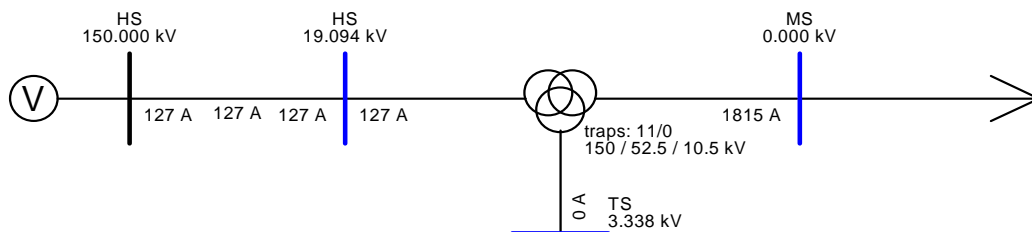
Volgens het meetrapport zijn kortsluitspanning en kortsluitverlies bij verschillende trapstanden gemeten van HS- naar TS-zijde, van HS- naar MS-zijde en van TS- naar MS-zijde. Hierbij valt op dat, hoewel het vermogen van HS naar MS maximaal 33 MVA kan zijn, de kortsluitspanning toch bij het maximale vermogen van 70 MVA is gedefinieerd (zie boven). Dit resulteert in de waarden, ingevuld bij het betrokken vermogen: "bij S". In onderstaand scherm zijn de invoergegevens ingevuld. Overigens komt de waarde van 27% bij 70 MVA overeen met 12,7% bij 33 MVA:

$$U_{k,33} = U_{k,70} \cdot \frac{33}{70}$$



Figuur 9 Invoerscherm Vision: impedantiegegevens driewikkelingstransformator

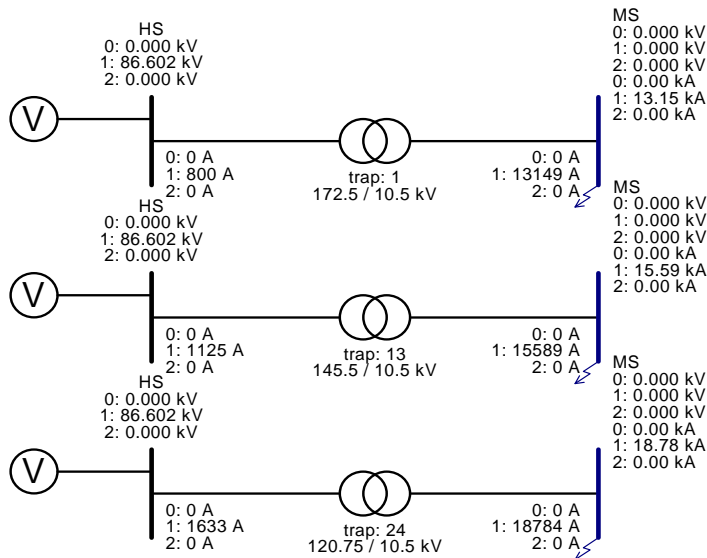
In onderstaand schema is de kortsluitproef van HS naar MS nagebootst, waarbij de nominale stromen vloeien. De kortsluitspanning is gelijk aan 19.094 kV. Dat komt overeen met een relatieve kortsluitspanning van $u_k = 12,7\%$ bij een vermogen van 33 MVA. Dit is gesimuleerd met een verbinding met een impedantie van 595 Ohm.



Figuur 10 Simulatie kortsluitproef HS-MS

2 **STORING SEQUENTIEEL**

De kortsluitberekening volgens de methode "Storing Sequentieel" is gebaseerd op de berekende loadflowsituatie, net vóór de kortsluiting. Dat betekent dat de berekende kortsluitstroom afhangt van de actuele spanningen in het net. Daarmee zijn dus netvoeding, generatoren en belastingen van invloed op de kortsluitstroom. Dit is overigens conform de werkelijkheid.



Figuur 11 Resultaten Storing Sequentieel voor drie trapstanden

Controleberekening voor de middenstand (trap 13):

- >> $U_{nom,HS} = 145.5 \text{ kV}$
- >> $U_{nom,MS} = 10.5 \text{ kV}$
- >> $S_{nom} = 66 \text{ MVA}$
- >> $U_k = 24 \%$
- >> $P_k = 325 \text{ kW}$

$$Z_t = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{nom,MS}^2}{S_{nom}} = \frac{24}{100} \cdot \frac{10.5^2}{66} = 0.4009 \text{ Ohm}$$

$$R_t = \frac{P_k}{1000 \cdot S_{nom}} \cdot \frac{U_{nom,MS}^2}{S_{nom}} = \frac{325}{1000 \cdot 66} \cdot \frac{10.5^2}{66} = 0.0082 \text{ Ohm}$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} = 0.4008 \text{ Ohm}$$

- >> $U_{voeding} = 150 \text{ kV}$

$$I_{k,MS} = \frac{\left(\frac{U_{voeding}}{\sqrt{3}}\right) \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}}}{Z_t} = \frac{\left(\frac{150}{\sqrt{3}}\right) \cdot \frac{10.5}{145.5}}{0.4009} = 15.5887 \text{ kA}$$

$$I_{k,HS} = I_{k,MS} \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}} = 15.5887 \cdot \frac{10.5}{145.5} = 1.1250 \text{ kA}$$

Doordat de transformatorimpedantie aan de andere zijde (MS) is gekozen dan de trappenschakelaar, is de waarde van deze impedantie niet afhankelijk van de stand van de trappenschakelaar. Wel is de

naar de MS-zijde omgerekende voedingspanning afhankelijk van de overzetverhouding. Ook de berekende primaire stroom bij een kortsluiting aan secundaire zijde is afhankelijk van de overzetverhouding. Dit blijkt uit de controleberekeningen voor de laagste (1) en hoogste (24) stand van de trappenschakelaar.

Controleberekening voor de laagste stand (trap 1):

>> $U_{nomHS}=172.5 \text{ kV}$

>> $U_{nomMS}=10.5 \text{ kV}$

>> $S_{nom}=66 \text{ MVA}$

>> $P_k=325 \text{ kW}$

>> $U_k=24 \%$

>> $Z_t=0.4009 \text{ Ohm}$

>> $U_{voeding}=150 \text{ kV}$

$$I_{k,MS} = \frac{(U_{voeding} / \sqrt{3}) \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}}}{Z_t} = \frac{(150 / \sqrt{3}) \cdot \frac{10.5}{172.5}}{0.4009} = 13.1488 \text{ kA}$$

$$I_{k,HS} = I_{k,MS} \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}} = 15.5887 \cdot \frac{10.5}{172.5} = 0.8004 \text{ kA}$$

Controleberekening voor de hoogste stand (trap 24):

>> $U_{nomHS}=120.75 \text{ kV}$

>> $U_{nomMS}=10.5 \text{ kV}$

>> $S_{nom}=66 \text{ MVA}$

>> $P_k=325 \text{ kW}$

>> $U_k=24 \%$

>> $Z_t=0.4009 \text{ Ohm}$

>> $U_{voeding}=150 \text{ kV}$

$$I_{k,MS} = \frac{(U_{voeding} / \sqrt{3}) \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}}}{Z_t} = \frac{(150 / \sqrt{3}) \cdot \frac{10.5}{120.75}}{0.4009} = 18.7839 \text{ kA}$$

$$I_{k,HS} = I_{k,MS} \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}} = 15.5887 \cdot \frac{10.5}{120.75} = 1.6334 \text{ kA}$$

Trapstand	$I_{k,primair} \text{ (kA)}$	$I_{k,secundair} \text{ (kA)}$
1	0.800	13.149
13	1.125	15.589
24	1.633	18.784

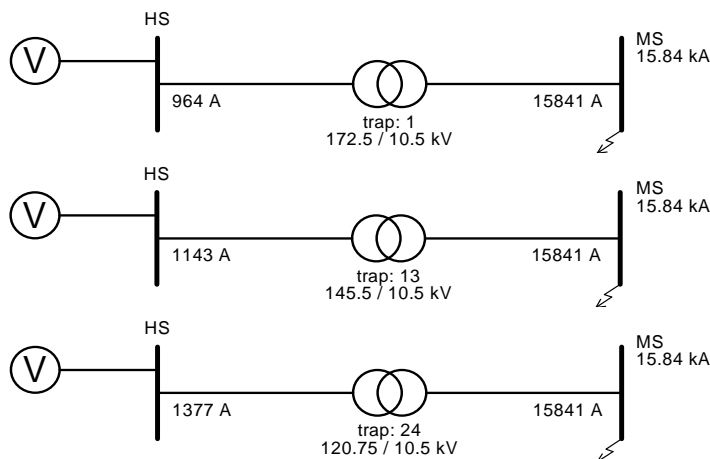
Conclusie: de stand van de trappenschakelaar is van invloed op de overzetverhouding van de transformator en heeft invloed op de primaire en de secundaire stroom bij berekening van een kortsluiting aan de secundaire zijde van de transformator.

3 IEC 909

De kortsluitberekening volgens de norm IEC 909 gaat van heel andere principes uit dan de kortsluitberekening volgens Storing Sequentieel. In de IEC-benadering is het gehele netwerk passief gemaakt. Alle actieve elementen zijn vervangen door de kortsluitimpedanties van die machines. Op de foutplaats wordt dan een spanningsbron aangebracht, ongeveer ter grootte van de nominale spanning, gecorrigeerd met een in de norm gedefinieerde factor (1,1 voor MS-netten).

Gevolg van deze methode is dat de nominale spanning van het knooppunt, waarvoor de kortsluitstroom berekend moet worden, van invloed is op de kortsluitstroom. De nominale spanningen zijn dan ook genormeerd (IEC 60038). De nominale spanning van het primaire knooppunt heeft geen invloed op de kortsluitstroom in het secundaire circuit van de transformator.

De kortsluitberekening volgens IEC 909 is standaard niet afhankelijk van de transformatortrapstanden. In de berekening is de mogelijkheid ingebouwd om deze invloed toch mee te nemen. In het voorbeeld is van deze optie gebruik gemaakt. Onderstaande afbeelding geeft de resultaten weer voor de drie trapstanden van de tweewikkelingstransformator.



Figuur 12 Resultaten IEC 909 voor drie trapstanden

Controleberekening voor de middenstand (trap 13):

>> $U_{nomHS} = 145.5 \text{ kV}$

>> $U_{nomMS} = 10.5 \text{ kV}$

>> $S_{nom} = 66 \text{ MVA}$

>> $U_k = 24 \%$

>> $P_k = 325 \text{ kW}$

$$Z_t = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{nom,MS}^2}{S_{nom}} = \frac{24}{100} \cdot \frac{10.5^2}{66} = 0.4009 \text{ Ohm}$$

$$R_t = \frac{P_k}{1000 \cdot S_{nom}} \cdot \frac{U_{nom,MS}^2}{S_{nom}} = \frac{325}{1000 \cdot 66} \cdot \frac{10.5^2}{66} = 0.0082 \text{ Ohm}$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} = 0.4008 \text{ Ohm}$$

De c-factor voor een kortsluiting op MS-niveau is 1,1. De nominale spanning van het MS-knooppunt is 10 kV. Het valt op dat voor deze transformator de overzetverhouding niet terugkomt in de berekening van de secundaire stroom bij een kortsluiting aan de secundaire zijde.

$$I_{k,MS} = \frac{(c \cdot U_{b,MS} / \sqrt{3})}{Z_t} = \frac{(1.1 \cdot 10 / \sqrt{3})}{0.4009} = 15.8411 \text{ kA}$$

$$I_{k,HS} = I_{k,MS} \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}} = 15.8411 \cdot \frac{10.5}{145.5} = 1.1432 \text{ kA}$$

Controleberekening voor de laagste stand (trap 1):

>> $U_{nomHS}=172.5 \text{ kV}$

>> $U_{nomMS}=10.5 \text{ kV}$

>> $S_{nom}=66 \text{ MVA}$

>> $P_k=325 \text{ kW}$

>> $U_k=24 \%$

>> $Z_t=0.4009 \text{ Ohm}$

>> $Uvoeding=150 \text{ kV}$

$$I_{k,MS} = \frac{(c \cdot U_{b,MS} / \sqrt{3})}{Z_t} = \frac{(1.1 \cdot 10 / \sqrt{3})}{0.4009} = 15.8411 \text{ kA}$$

$$I_{k,HS} = I_{k,MS} \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}} = 15.8411 \cdot \frac{10.5}{172.5} = 0.9642 \text{ kA}$$

Controleberekening voor de hoogste stand (trap 24):

>> $U_{nomHS}=120.75 \text{ kV}$

>> $U_{nomMS}=10.5 \text{ kV}$

>> $S_{nom}=66 \text{ MVA}$

>> $P_k=325 \text{ kW}$

>> $U_k=24 \%$

>> $Z_t=0.4009 \text{ Ohm}$

>> $Uvoeding=150 \text{ kV}$

$$I_{k,MS} = \frac{(c \cdot U_{b,MS} / \sqrt{3})}{Z_t} = \frac{(1.1 \cdot 10 / \sqrt{3})}{0.4009} = 15.8411 \text{ kA}$$

$$I_{k,HS} = I_{k,MS} \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}} = 15.8411 \cdot \frac{10.5}{120.75} = 1.3775 \text{ kA}$$

Trapstand	$I_{k,primaair} \text{ (kA)}$	$I_{k,secundair} \text{ (kA)}$
1	0.964	15.841
13	1.143	15.841
24	1.378	15.841

Conclusie: de stand van de trappenschakelaar heeft bij berekening van een kortsluiting aan de secundaire zijde van de transformator alleen invloed op de primaire stroom en niet op de secundaire stroom.

4 IEC 60909

De norm IEC 909 is vernieuwd in de nieuwe norm IEC 60909. Deze vernieuwde norm gaat van dezelfde principes uit als de oude norm, maar er zijn enkele wijzigingen. Één van de wijzigingen betreft de impedantie van de transformator. Bij de berekening van de impedantie is een correctiefactor K_T toegevoegd. Als gevolg is de kortsluitstroom voor de transformator van het voorgaande hoofdstuk in het geval van dit voorbeeld volgens de nieuwe norm groter. De berekening gaat als volgt:

Controleberekening voor de middenstand (trap 13):

>> $U_{nomHS} = 145.5 \text{ kV}$

>> $U_{nomMS} = 10.5 \text{ kV}$

>> $S_{nom} = 66 \text{ MVA}$

>> $U_k = 24 \%$

>> $P_k = 325 \text{ kW}$

>> $c_{max} = 1.1$

$$Z_t = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{nom,MS}^2}{S_{nom}} = \frac{24}{100} \cdot \frac{10.5^2}{66} = 0.4009 \text{ Ohm}$$

$$R_t = \frac{P_k}{1000 \cdot S_{nom}} \cdot \frac{U_{nom,MS}^2}{S_{nom}} = \frac{325}{1000 \cdot 66} \cdot \frac{10.5^2}{66} = 0.0082 \text{ Ohm}$$

$$X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} = 0.4008 \text{ Ohm}$$

Berekening correctiefactor:

$$x_t = \frac{X_t}{U_{nom,MS}^2 / S_{nom}} = \frac{0.4008}{10.5^2 / 66} = 0.2399 \text{ pu}$$

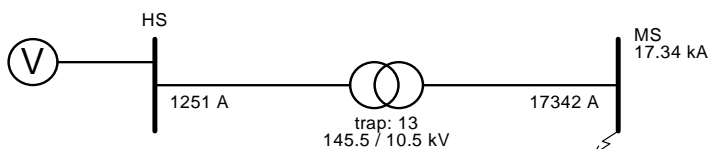
$$K_T = 0.95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0.6x_t} = 0.95 \cdot \frac{1.1}{1 + 0.6 \cdot 0.2399} = 0.9135$$

Berekening kortsluitstromen:

$$I_{k,MS} = \frac{(c_{max} \cdot U_{b,MS} / \sqrt{3})}{K_T \cdot Z_t} = \frac{(1.1 \cdot 10 / \sqrt{3})}{0.9135 \cdot 0.4009} = 17.3414 \text{ kA}$$

$$I_{k,HS} = I_{k,MS} \cdot \frac{U_{nom,MS}}{U_{nom,HS}} = 17.3414 \cdot \frac{10.5}{145.5} = 1.2514 \text{ kA}$$

Berekening met Vision levert op:



Figuur 13 Resultaten IEC 60909 voor trappenregelaar in de middenstand

5 CONCLUSIE

Voor de loadflow geldt dat de secundaire spanning van transformatoren voornamelijk bepaald wordt door de voedingsspanning en de overzetverhouding. De voedingsspanning wordt bepaald door de instelling van de voeding (U_{ref}) en de nominale spanning van het knooppunt waar de voedingsbron op is aangesloten. De berekende spanning wordt niet beïnvloed door de nominale spanning van de secundaire knooppunten.

De kortsluitberekening volgens de methode Storing Sequentieel gaat uit van de berekende loadflow situatie. Dat betekent dat een hogere primaire spanning ook een grotere kortsluitstroom tot gevolg heeft. De overzetverhouding van de transformator heeft invloed op de stromen aan de primaire en secundaire zijde.

De kortsluitberekening volgens IEC 909 en IEC 60909 gaat uit van de nominale spanning van het knooppunt waar de kortsluiting wordt aangebracht. Wanneer een kortsluitberekening voor een knooppunt aan de secundaire zijde van de transformator wordt uitgevoerd, heeft de nominale spanning van het secundaire knooppunt een grote invloed. De nominale spanning van het primaire knooppunt heeft geen invloed. De overzetverhouding van de transformator (de stand van de trappenschakelaar) heeft bij berekening van de kortsluiting op een knooppunt aan secundaire zijde geen invloed op de stromen aan de secundaire zijde, maar wel op de stromen aan de primaire zijde.

Voor een transformator met de trappenschakelaar aan de primaire zijde en bij een kortsluiting aan de secundaire zijde geldt:

- Bij de kortsluitberekening volgens Storing Sequentieel is de spanning aan primaire zijde van de transformator constant. Dit resulteert in een hogere kortsluitstroom aan primaire en secundaire zijde bij een lagere overzetverhouding (U_{nomHS}/U_{nomMS}).
- Bij de kortsluitberekening volgens IEC (60)909 is de spanning aan secundaire zijde van de transformator constant. Dit resulteert in een hogere kortsluitstroom aan primaire zijde bij een lagere overzetverhouding. De kortsluitstroom aan secundaire zijde blijft constant.