



**Modellering van transformatorinrush
in Vision Network Analysis**

25-014 AIS

17 april 2025

Building 026
Koningstraat 27-1d
6811 DG Arnhem

Postbus 2013
2800 BD Gouda

026 352 37 00
www.phasetophase.nl



Documentversies

Versie	Datum	Auteur	Commentaar	Review
1.0	7-4-2025	AIS	Initiële versie	CWI
1.1	17-4-2025	AIS	Stijlcheck en typfouten correctie	BHE

© 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

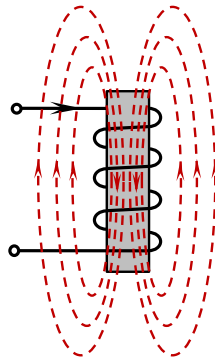
1	THEORETISCHE BASIS	1
1.1	Magnetische flux en inductantie	1
1.2	Mutuele koppeling	1
1.3	Equivalent circuit en verzadiging	2
1.4	Constructie van de transformator	4
2	MODELLERING VAN INRUSH IN EEN DYNAMISCHE ANALYSE MODULE	5
2.1	Niet-lineair transformatormodel in een dynamische analyse module	5
2.2	Invoer van de parameters van het model	6
2.3	Invoer van de dynamische casus	6
2.4	Dynamische simulatie	7
2.5	Resultaten van de berekening	8
3	HET PLOTTEN VAN INRUSHSTROMEN OP EEN SELECTIVITEITSGRAFIEK	10
3.1	Empirische formule voor de inrushstroom	10
3.2	Invoer van inrushstroomcoëfficiënt en inrushtijdconstante	10
3.3	Het plotten van de inrushstroomkromme op de selectiviteitsgrafiek	11

1 THEORETISCHE BASIS

In dit hoofdstuk wordt in het kort een theoretische basis gelegd voor modellering van inrushverschijnselen bij transformatoren. Eerst worden basale begrippen zoals magnetische flux, inductantie en mutuele magnetische koppeling tussen spoelen uitgelegd. Daarna worden het equivalente vervangingsschema en de constructie van transformatoren beschouwd. Verzadiging van de transformator-ijzerkern door de magnetische flux is essentieel om inrush te modelleren en te begrijpen.

1.1 Magnetische flux en inductantie

Stroom door de spoel (zwart in Figuur 1) veroorzaakt een magnetisch veld of magnetische flux (rood).



Figuur 1: Magnetische flux in een spoel

De magnetische flux ψ is nauw met de stroom i verbonden. Deze verbinding of proportionaliteitsfactor wordt *inductantie* L genoemd:

$$\psi = L \cdot i$$

Verandering van de magnetische flux veroorzaakt de spanning op de klemmen van de spoel u :

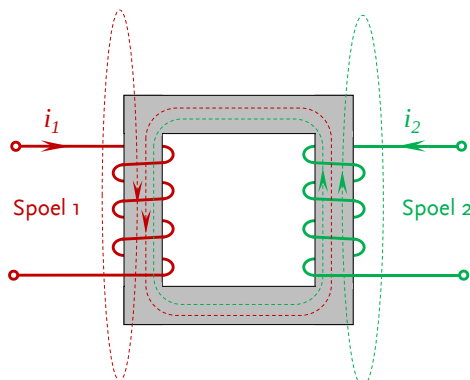
$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

Er moeten twee belangrijke opmerkingen bij de vergelijking gemaakt worden:

1. De geïnduceerde spanning is afhankelijk van de inductantie.
2. De stroom/flux moet variëren met de tijd (anders is de afgeleide gelijk aan nul).

1.2 Mutuele koppeling

Indien twee spoelen rondom dezelfde ijzerkern gewikkeld zijn (zoals in Figuur 2), zijn deze spoelen magnetisch mutueel gekoppeld. De magnetische flux gaat veel gemakkelijker door het ijzer heen dan door de lucht. Daarom gaat de flux grotendeels door het ijzer heen. Dit deel van de flux zorgt voor de mutuele magnetische koppeling (mutuele flux). Een kleiner gedeelte van de flux gaat door de lucht heen. Dit deel van de flux is niet gekoppeld met de andere spoel en wordt *strooiflux* genoemd.



Figuur 2: Twee mutueel gekoppelde spoelen

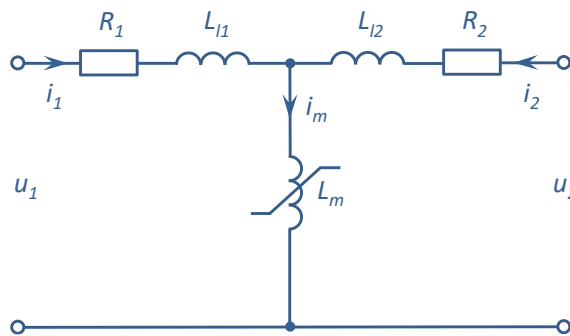
1.3 Equivalent circuit and saturation

Het elektromagnetisch model van twee mutueel gekoppelde spoelen kan in de volgende vergelijkingen weergegeven worden:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{l1} \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di_m}{dt}$$

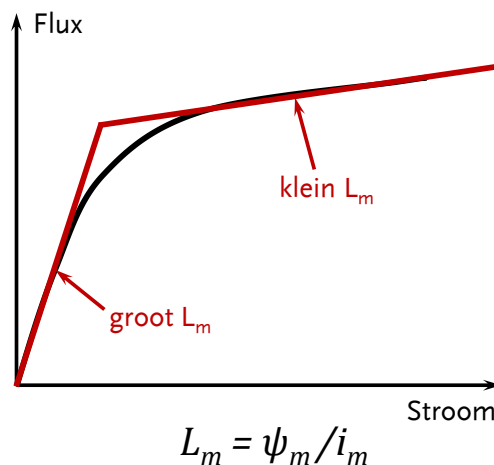
$$u_2 = R_2 i_2 + L_{l2} \frac{di_2}{dt} + L_m \frac{di_m}{dt}$$

De strooi fluxen van de spoelen worden vertegenwoordigd door L_{l1} en L_{l2} . De totale mutuele flux is met inductantie L_m gemodelleerd. De vergelijkingen kunnen ook in de vorm van het equivalente elektrisch vervangingsschema weergegeven worden (zie Figuur 3).



Figuur 3: Elektrisch vervangingsschema van twee mutueel gekoppelde spoelen

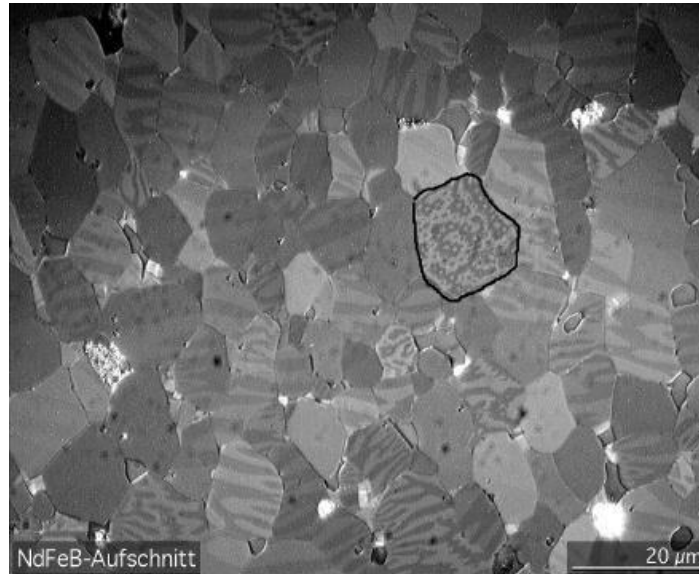
Als de flux-stroomverhouding gemeten wordt (die is indirect af te leiden vanuit metingen van de primaire en secundaire spanningen en stromen), kan het zijn dat de karakteristiek niet lineair is. De karakteristiek kan in de meest eenvoudige vorm met twee lineaire secties benaderd worden. In het begin veroorzaakt een kleine verandering van de stroom een grote verandering van de flux. De mutuele inductantie (en de reactantie) zijn groot en er loopt weinig stroom. Naarmate de ijzerkern verzadigd wordt, leidt een kleine verandering van de flux tot een grote wijziging van de stroom. De mutuele inductantie L_m is in dit geval klein.



Figuur 4: Mutuele inductantie en flux-stroomkarakteristiek van de ijzerkern

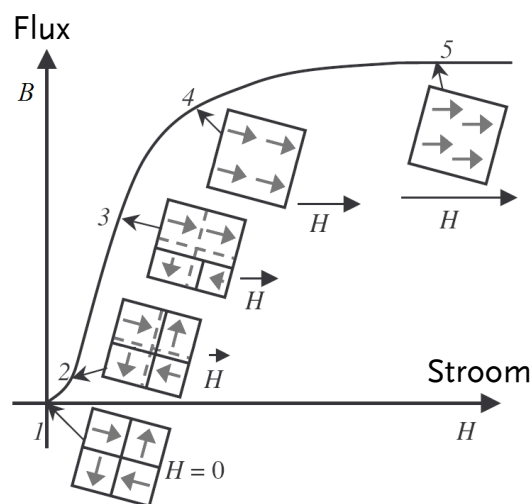
De reden voor verzadiging is de volgende. Als we op zeer kleine schaal naar een atoom van het materiaal kijken zien we de atoomkern; rond de kern vliegt een elektron. Het vliegende elektron wekt de (zeer kleine) stroom op. De stroom veroorzaakt een magnetisch veld dat in een bepaalde richting gericht is. Het atoom heeft een zogenoemd magnetisch moment. In een diëlektricum zijn deze magnetische momenten willekeurig georiënteerd. In een metaal hebben deze momenten aanzienlijk meer geordende structuur (door het kristalrooster van het metaal). Er zijn Weissgebieden of magnetische domeinen in

het ijzer aanwezig waar de magnetische momenten in één richting georiënteerd zijn. Deze gebieden, die miljoenen individuele atomen bevatten, kunnen wel in de microscoop gezien worden (Figuur 5).



Figuur 5: Magnetische domeinen van neodymium in de microscoop¹

Als het gebied door een extern magnetisch veld beïnvloed wordt, kunnen de magnetische momenten zich steeds meer in één richting oriënteren². Als we de flux-stroomkromme bekijken, zien we dat de magnetische momenten in het begin volledig willekeurig gericht zijn. De magnetische veldsterkte H (gerelateerd aan de magnetiseringsstroom) is klein. Naarmate steeds meer domeinen in een bepaalde richting kijken, wordt de magnetische veldsterkte H (en dus de magnetiseringsstroom) aanzienlijk hoger. Dit is schematisch afgebeeld in Figuur 6.



Figuur 6: Verzadiging en magnetische domeinen³

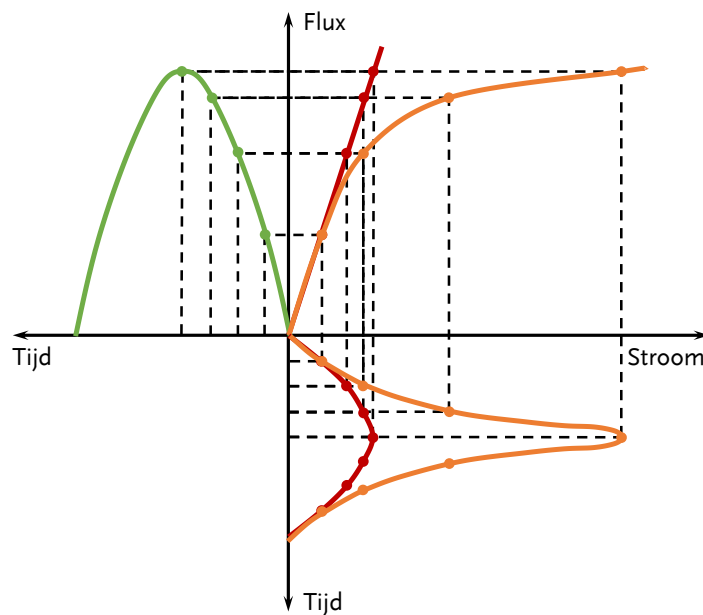
Verzadiging kan ook in het tijddomein geïllustreerd worden (Figuur 7). In de linker bovenkant van de grafiek staat een halve periode van de sinusoidale flux (groen). De onverzadigde en verzadigde stroom-fluxkarakteristieken zijn respectievelijk rood en oranje in de rechter bovenhoek afgebeeld. Corresponderende onverzadigde en verzadigde stromen bevinden zich rechtsonder in de grafiek. In het verzadigde gedeelte is de momentane stroom aanzienlijk hoger dan in onverzadigd gebied.

¹ Bron: Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:NdFeB-Domains.jpg>.

² Dit is met een mooie animatie geïllustreerd op Wikipedia:

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Moving_magnetic_domains_by_Zureks.gif.

³ Bron: https://www.e-magnetica.pl/doku.php/magnetic_saturation.

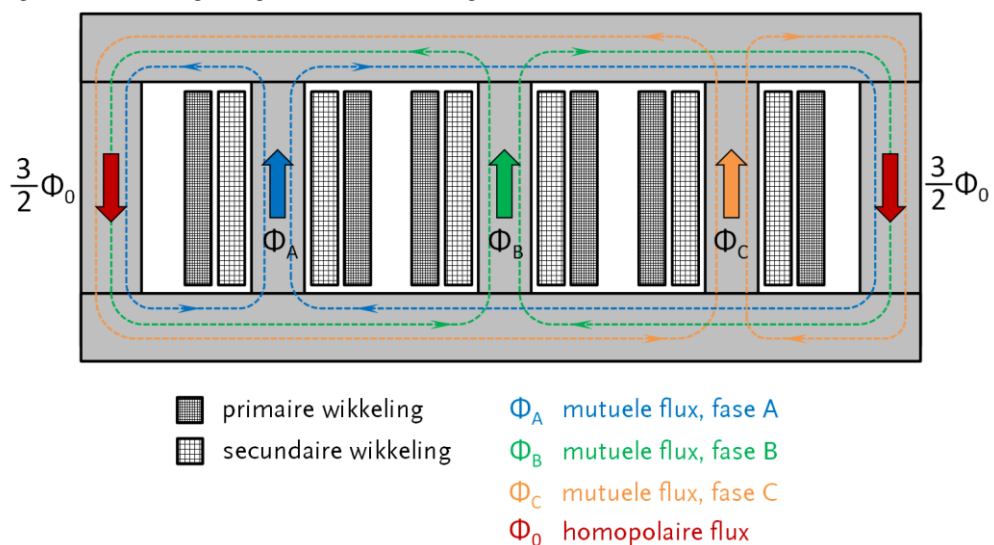


Figuur 7: Flux en stroom in tijddomein geplot

1.4 Constructie van de transformator

Traditionele elektriciteitsnetten zijn driefasig opgebouwd. Daarom bestaan de typische transformatoren uit drie mutueel gekoppelde spoelen. Soms worden er drie afzonderlijke éénfasetransformatoren toegepast. De vaakst voorkomende constructies zijn driepootkern- en vijfpoetkerntriefasetransformatoren. De doorsnede van de vijfpoetkerntransformator is schematisch in Figuur 8 weergegeven. De wikkelingen zitten rondom de poten van de transformator. Indien er onbalans in de mutuele fluxen van de poten ontstaat, gaat deze *homopolaire* flux door het juk en de buitenpoten van de transformator. De transformatorbak is in dit geval niet van belang en wordt niet weergegeven.

Bij een driepootkerntransformator (en als er geen derde interne driehoekswikkeling is) gaat de homopolaire flux door de lucht en de transformatorbak heen. In dit geval is de homopolaire reactantie relatief klein, wat bij asymmetriën en fase-aardkortsluitingen hoge homopolaire stromen kan veroorzaken⁴. Bij modellering van inrush in onbelaste of normale (bijna symmetrische) belastingsituaties is dit gedrag van minder belang.



Figuur 8: Doorsnede van de vijfpoetkerntransformator

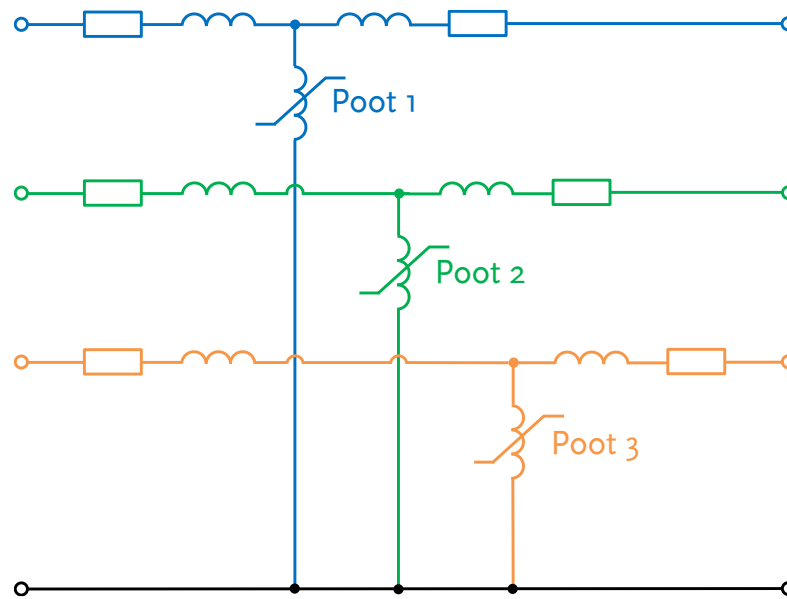
⁴ Meer hierover in hoofdstuk 8 van het Phase to Phase-boek *Netten voor distributie van elektriciteit*: https://www.phasetophase.nl/boek/boek_2_8.html

2 MODELLERING VAN INRUSH IN EEN DYNAMISCHE ANALYSE MODULE

In dit hoofdstuk worden een dynamisch transformatormodel, de invoer van transformatorparameters en een dynamische casus beschreven. Het resultaat van de dynamische simulatie zijn de tijddomeingrafieken van de stromen in de transformatorwindingen en in de fasen. De grafieken moeten in principe hetzelfde zijn als ze met meetapparatuur gemeten worden (de momentane waarden).

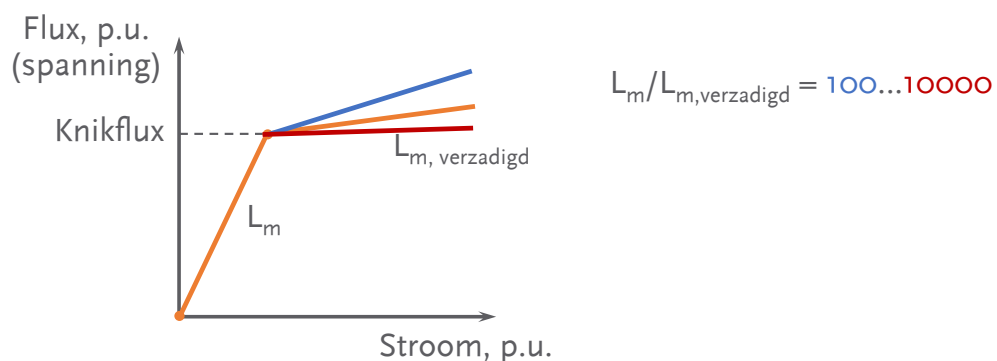
2.1 Niet-lineair transformatormodel in een dynamische analyse module

Er bestaat een breed scala van gedetailleerde dynamische modellen van transformatoren. In de praktijk ontbreken meestal de gegevens om uit zulke modellen parameters af te leiden. Daarom is er in de dynamische analyse module voor gekozen om het meest eenvoudige, niet-lineaire model te implementeren (zie Figuur 9).



Figuur 9: Niet-lineair model van een transformator in dynamische analyse module

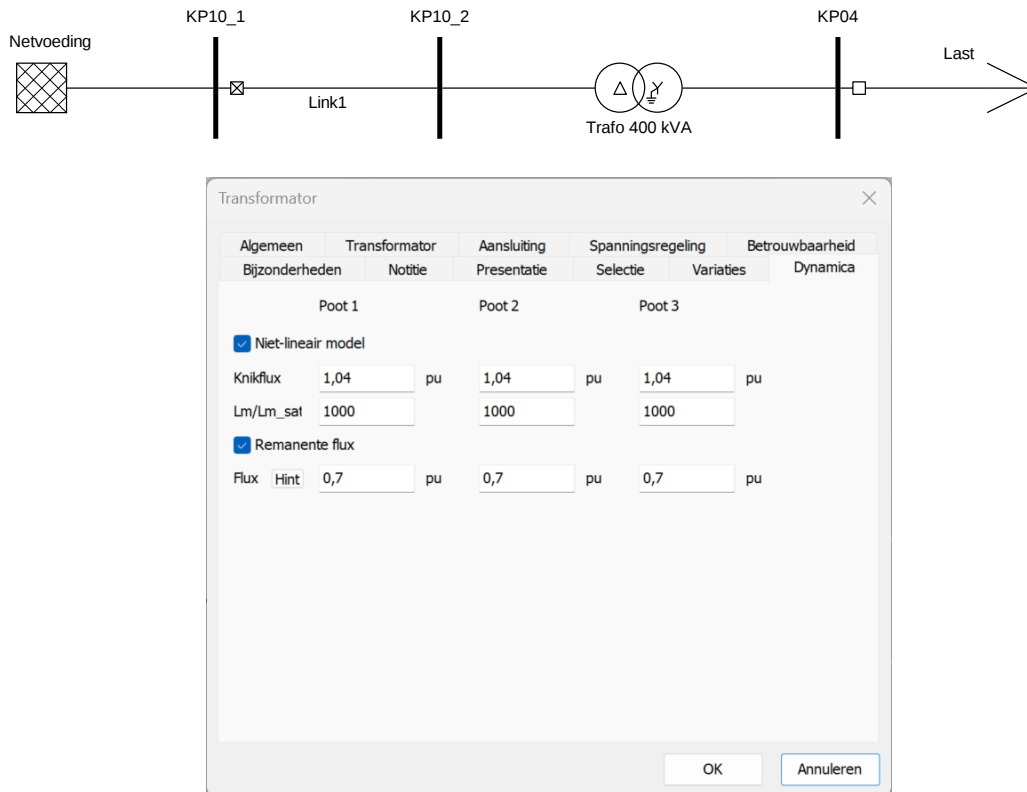
Het model bestaat uit zes mutueel gekoppelde spoelen (twee per poot), met niet-lineaire verzadigingskarakteristiek voor de mutuele koppeling van iedere poot. De flux-stroomkarakteristiek is benaderd met twee lineaire secties (Figuur 10). De helling van de lijnen (L_m en $L_{m, verzadigd}$) bepaalt de steilheid van karakteristieken van de onverzadigde en verzadigde gedeelten. De verhouding $L_m/L_{m, verzadigd}$ wordt als de invoerparameter van het model gebruikt. Grotere waarden van de verhouding leiden tot aanzienlijk hogere inrushstromen dan de kleinere waarden. Knikflux (of de spanning waarop de verzadiging begint plaats te vinden bij de nullasttest; ze zijn in per unit gelijk) bepaalt het knikpunt van de karakteristiek.



Figuur 10: Verzadigingskarakteristiek benaderd met twee lineaire secties

2.2 Invoer van de parameters van het model

De parameters van een transformator voor de inrushstudies kunnen via het tabblad *Dynamica* van de transformator ingevuld worden:

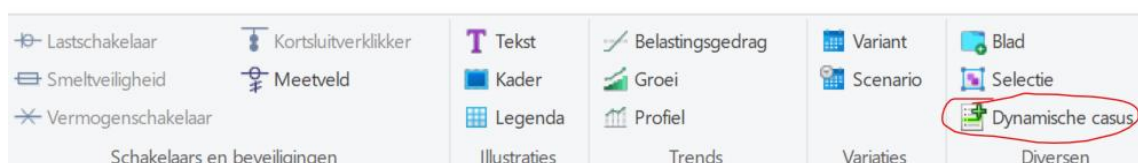


Figuur 11: Voorbeeld van de parameters van een niet-lineair transformatormodel

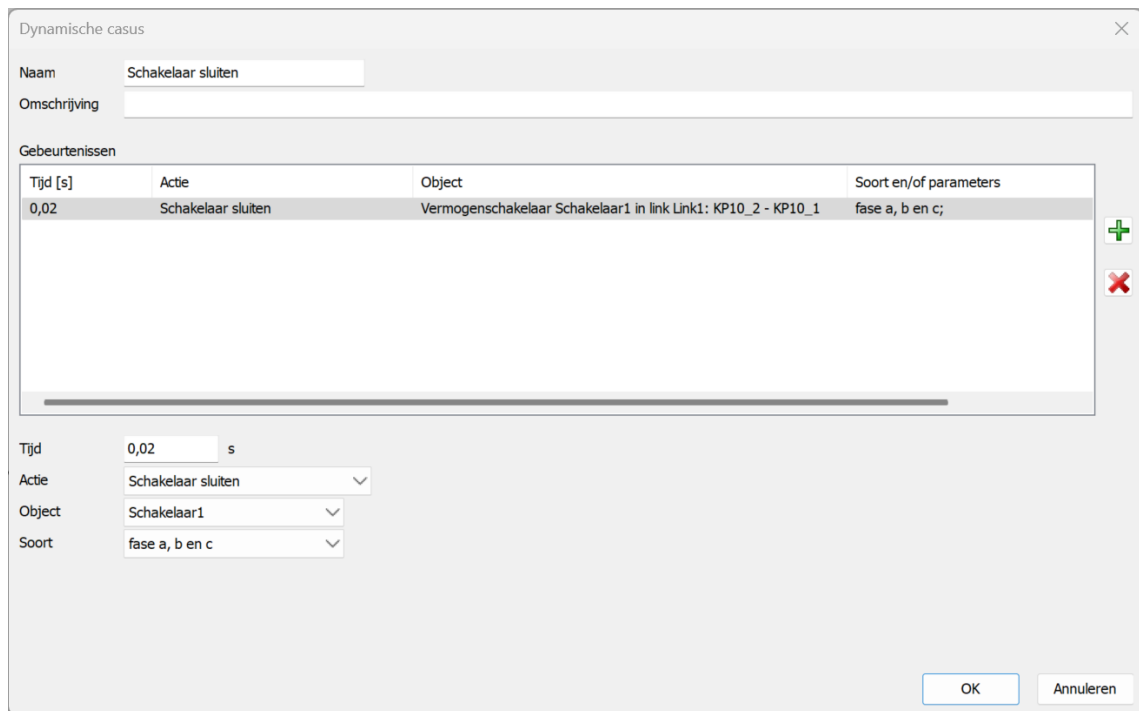
Het vinkje *Niet-lineair model* schakelt de mogelijkheid van de verzadiging van de transformator aan of uit. Let op dat het gebruik van veel niet-lineaire modellen in het net de berekening aanzienlijk kan vertragen, terwijl dit niet per se nodig is. Per poot van de transformator moeten de knikfluxen ingevuld worden (die zijn gelijk aan de spanning in p.u. waarop de verzadiging begint plaats te vinden bij de nullasttest), evenals de verhoudingen tussen de onverzadigde en verzadigde waarden van de mutuele inductanties (die zijn ook vanuit de nullasttestkarakteristieken te bepalen) en de remanente fluxen. Deze laatste bepalen de initiële toestand voor de berekening en simuleren de invloed van remanent magnetisme bij de vorige uitschakelingen. Deze waarden zijn moeilijk in te schatten; er kunnen daarom beter vuistregels gebruikt worden. Deze waarden kunnen met de *Hint*-knop (afhankelijk van de schakeling van de transformatorwikkelingen) ingevuld worden.

2.3 Invoer van de dynamische casus

Voordat de dynamische simulatie van inrush gestart kan worden, moet er eerst een dynamische casus gedefinieerd worden. Die kan worden ingevuld via het tabblad *Invoegen|Diversen|Dynamische casus* van de Vision-ribbon (helemaal rechts op het tabblad).



Figuur 12: Invoer van de dynamische casus



Dynamische casus

Naam: Schakelaar sluiten

Omschrijving:

Gebeurtenissen

Tijd [s]	Actie	Object	Soort en/of parameters
0,02	Schakelaar sluiten	Vermogensschakelaar Schakelaar1 in link Link1: KP10_2 - KP10_1	fase a, b en c;

Tijd: 0,02 s

Actie: Schakelaar sluiten

Object: Schakelaar1

Soort: fase a, b en c

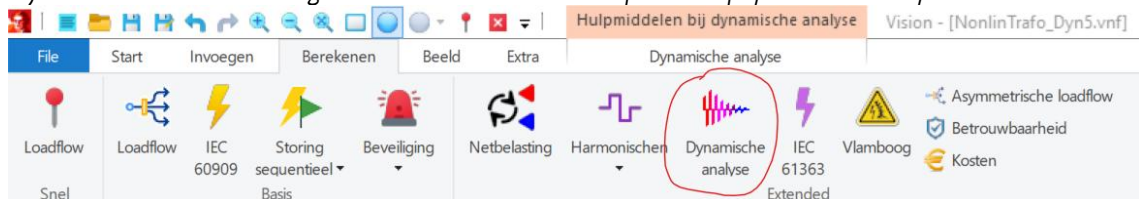
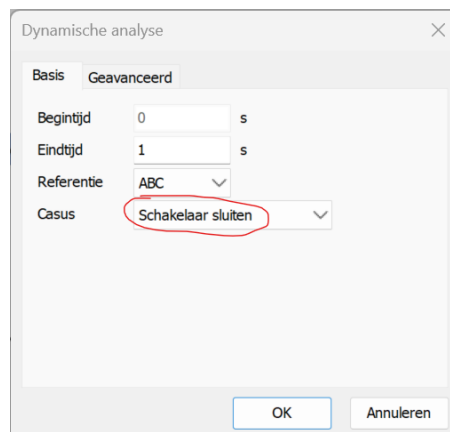
OK Annuleren

Figuur 13: Parameters van een dynamische casus

Met het groene plusje kunnen er dynamische gebeurtenissen toegevoegd worden, zoals bijvoorbeeld een *Schakelaar sluiten*-gebeurtenis van een bepaalde vermogensschakelaar. Indien er één of meer schakelaars geselecteerd zijn voordat het *Dynamische casus*-venster wordt geopend, komen alleen deze schakelaars in de lijst van de *Object*-combobox terecht. Anders wordt de lijst met alle schakelaars op een huidig blad van dit net ingevuld. Let op dat de schakelaar zich oorspronkelijk in een open toestand moet bevinden (dit kan gedaan worden in het parametersvenster van een tak of een element). Verder kan de begintijd van de gebeurtenis ingesteld worden, evenals de fase of fasen die gesloten worden (dit kan indien wenselijk ook asymmetrisch plaatsvinden).

2.4 Dynamische simulatie

Dynamische simulatie kan gestart worden via *Berekenen/Extended/Dynamische analyse*:

Dynamische analyse

Basis: Geavanceerd

Begintijd: 0 s

Eindtijd: 1 s

Referentie: ABC

Casus: Schakelaar sluiten

OK Annuleren

Figuur 14: Parameters van dynamische simulatie

In de berekeningsinstellingen kunnen de eindtijd van de simulatie en de dynamische casus ingesteld worden. Let op dat *Schakelaars openen/sluiten*-gebeurtenissen op dit moment alleen in een ABC-referentie te simuleren zijn.

2.5 Resultaten van de berekening

Na de berekening kunnen de resultaten (momentane of RMS-waarden) van de spanningen en stromen op de grafiek geplotted worden. Dit kan gedaan worden door te rechtsklikken op een transformator en daarna op de OK-knop:

Dynamische berekening: grafiekopties

X-as instellingen

☒ gebruik tijd als x-variabele Sample tijd: 10 µs Auto ☒

Klasse	Soort	Naam	Stelsel	Variabele	Eenheid
tak	transformator	Trafo 400 kVA	ABC	stroom, primaire kant, fase a	A

Overig

Auto ☒ Auto ☒

Xmin: 0 Ymin: 0 Xmax: 0 Ymax: 0

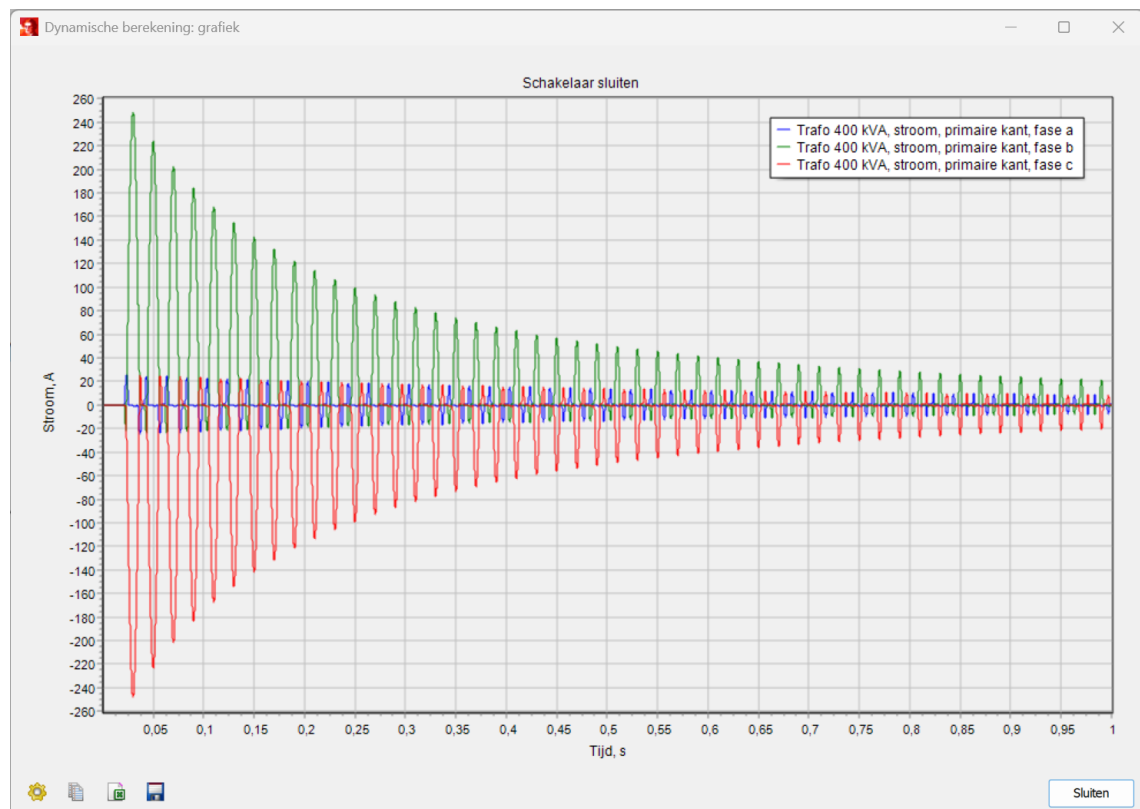
Legenda: ☒ rechtsboven Kleurenschema: grijs

Y-as instellingen

Klasse	Soort	Naam	Stelsel	Variabele	Eenheid	Lijntype	Dikte	Kleur
tak	transformator	Trafo 400 kVA	ABC	stroom, primaire kant, fase a	A		1	Blauw
tak	transformator	Trafo 400 kVA	ABC	stroom, primaire kant, fase b	A		1	Groen
tak	transformator	Trafo 400 kVA	ABC	stroom, primaire kant, fase c	A		1	Rood

MS MR +M Object bewerken OK Annuleren

Figuur 15: Grafiekopties voor inrushstromen van de fasen aan de primaire zijde



Figuur 16: Momentane waarden van de inrushstromen van de fasen aan de primaire zijde in A

De grafiek kan naar het klembord gekopieerd worden, terwijl numerieke waarden naar Microsoft Excel geëxporteerd kunnen worden of opgeslagen kunnen worden in het geheugen. Dit kan nuttig zijn om bijvoorbeeld een vergelijking te maken met de resultaten van andere simulaties door knopjes links onderin het venster. Verder kunnen de titel, legenda en x-/y-as-labels aangepast worden door met de linkermuisknop op een bijhorend element van de grafiek te klikken.

De grafiekopties kunnen ook ingesteld worden om de stromen in de driehoekwikkeling en in p.u. te plotten. Een voorbeeld hiervan:

Dynamische berekening: grafiekopties

X-as instellingen

☒ gebruik tijd als x-variabele Sample tijd: 10 µs Auto: ☒

Klasse: tak Soort: transformator Naam: Trafo 400 kVA Stelsel: ABC Variabele: stroom, primaire kant, fase a Eenheid: A

Overig

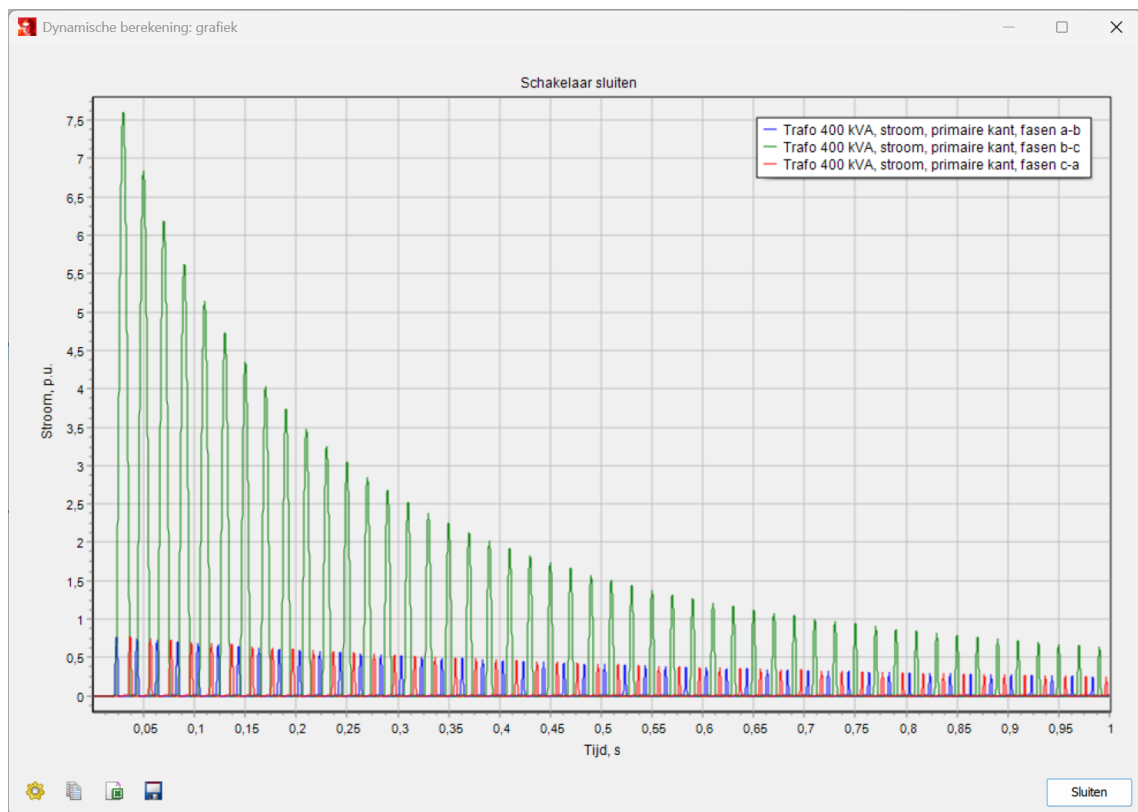
Xmin: 0 Ymin: 0 Xmax: 0 Ymax: 0 Legenda: ☒ rechtsboven Kleurenschema: grijs

Y-as instellingen

Klasse	Soort	Naam	Stelsel	Variabele	Eenheid	Lijntype	Dikte	Kleur
tak	transformator	Trafo 400 kVA	ABC	strom, primaire kant, fasen a-b	p.u.		1	blauw
tak	transformator	Trafo 400 kVA	ABC	strom, primaire kant, fasen b-c	p.u.		1	groen
tak	transformator	Trafo 400 kVA	ABC	strom, primaire kant, fasen c-a	p.u.		1	rood

MS MR +M Object bewerken OK Annuleren

Figuur 17: Grafiekopties voor inrushstromen in de driehoekwikkeling



Figuur 18: Momentane waarden van de inrushstromen in de driehoekwikkeling in per unit

In dit geval zijn de inrushstromen in de orde van grootte van 7,5x de nominale stroom van de transformator; het inschakelverschijnsel duurt ongeveer 1 seconde.

3 HET PLOTEN VAN INRUSHSTROMEN OP EEN SELECTIVITEITSGRAFIEK

Inrushverschijnselen in een transformator zijn zeer belangrijk bij de selectiviteitsstudies en bij het bepalen van beveiligingsinstellingen. Beveiligingen moeten niet trippen in normale situaties, zoals het inschakelen van een transformator. In de praktijk ontbreken de parameters vaak om een gedetailleerde dynamische analyse uit te voeren. In dit geval is er een vereenvoudigde empirische benadering mogelijk, met maar één formule en twee parameters die bij de fabrikant van de transformator geraadpleegd kunnen worden. Met deze empirische formule kunnen inrushstromen op de selectiviteitsgrafiek geplott worden. Dit hoofdstuk legt uit op welke manier dit gedaan kan worden in Vision.

3.1 Empirische formule voor de inrushstroom

De volgende empirische formule kan gebruikt worden voor de modellering van inrushstroom op de selectiviteitsgrafiek:

$$I_{inrush}(t) = K_i \cdot \frac{I_{nom}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-t/\tau}$$

De formule is de analytische benadering van krommes die vanuit meetdata en/of dynamische simulaties afgeleid kunnen worden. De belangrijke parameters zijn de dimensieloze inrushstroomcoëfficiënt K_i en de inrushtijdconstante τ in seconden. Beide parameters zijn te raadplegen bij de fabrikant van de transformator. De inrushstroomcoëfficiënt geeft aan hoe groot de momentane waarde van de inrushstroom is ten opzichte van de nominale stroom (RMS-waarde). Omdat men de RMS-waarde vaak op de selectiviteitsgrafiek wil terugvinden, wordt K_i met wortel 2 geschaald. De inrushtijdconstante geeft aan hoelang de transiënte na de inschakeling van de transformator duurt. Driemaal de tijdconstante is de tijd die nodig is voor de variabele om 95% van zijn eindwaarde te behalen.

3.2 Invoer van inrushstroomcoëfficiënt en inrushtijdconstante

De inrushstroomcoëfficiënt K_i en de inrushtijdconstante τ kunnen via typebestand ingevuld worden voor de inrushgrafiek. De parameters van een aantal MS/LS-transformatoren zijn beschikbaar in het standaardtypebestand dat door Phase to Phase aangeleverd wordt (Figuur 19). De waarden kunnen ook ingevuld/aangepast worden in het invoervenster van de specifieke transformator (tabblad *Transformator/Overig*, Figuur 20).

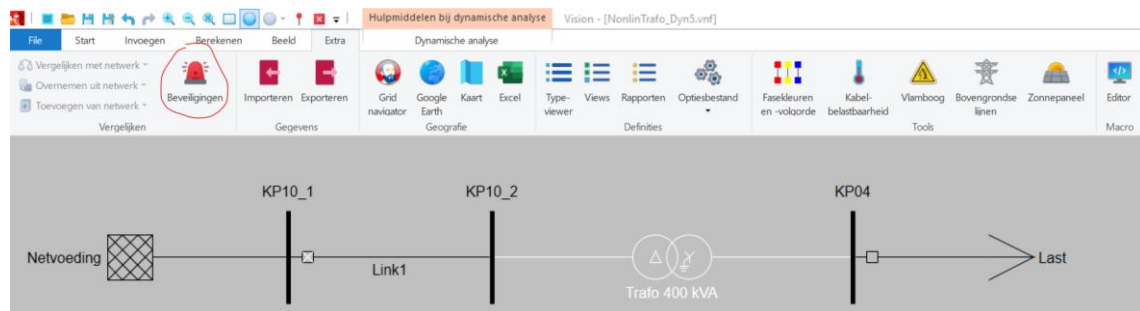
	A	B	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z					
1	Name	Shortname	Clock	Tapside	Tapsize kV	Tapmin	Tapnom	Tapmax	Controllable	Ki	Tau s	Preference						
2																		
3	10250/400 V 50 kVA	50 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		15	0,1	0						
4	10250/400 V 100 kVA	100 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		14	0,15	0						
5	10250/400 V 160 kVA	160 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		12	0,2	0						
6	10250/400 V 200 kVA	200 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		12	0,21	0						
7	10250/400 V 250 kVA	250 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		12	0,22	0						
8	10250/400 V 315 kVA	315 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		12	0,23	0						
9	10250/400 V 400 kVA	400 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		12	0,25	0						
10	10250/400 V 500 kVA	500 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		12	0,25	0						
11	10250/400 V 630 kVA	630 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		11	0,3	0						
12	10250/400 V 800 kVA	800 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		10,5	0,33	0						
13	10250/400 V 1000 kVA	1000 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		10	0,35	0						
14	10250/400 V 1250 kVA	1250 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		10	0,35	0						
15	10250/400 V 1600 kVA	1600 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		10	0,4	0						
16	10250/400 V 50 kVA	50 kVA	5	1	0,25	-2	0	2		15	0,1	0						
	Cable	Cable (2)	Cable (3)	Trafo	Specialtrafo	Coil	3wt	Rail	Sg	Sm	Asg	Asm	Zigzag	Wind	Fuse	Switch	Breaker	Current

Figuur 19: Invoer van Ki en Tau via het typebestand

Figuur 20: Invoer van Ki en Tau via transformatorparameters

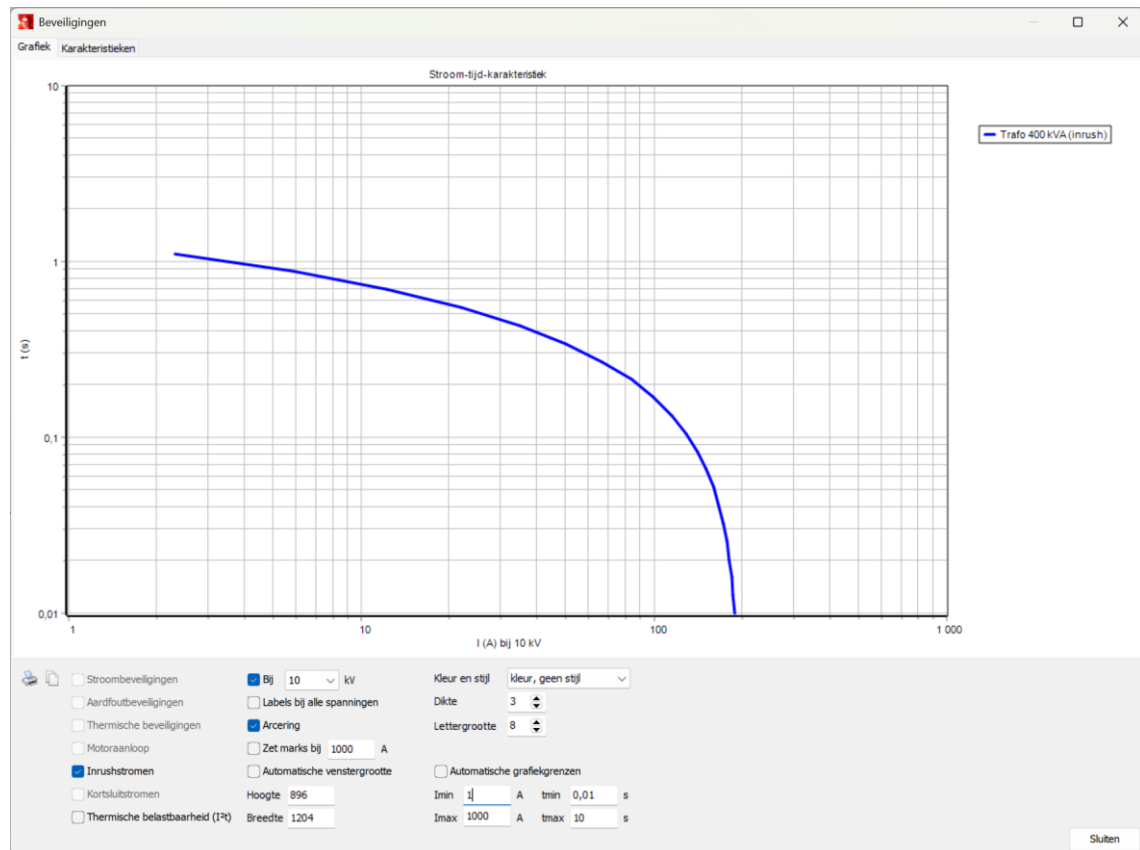
3.3 Het plotten van de inrushstroomkromme op de selectiviteitsgrafiek

Om de selectiviteitsgrafiek te maken, moeten er één of meerdere vermogenschakelaars of smeltveiligheden in het netschema geselecteerd worden, anders is de knop op het tabblad *Extra/Beveiligingen* niet actief. Daarnaast moeten er één of meerdere transformatoren geselecteerd worden (bijvoorbeeld door Ctrl+linkermuisknopklik op een transformator, Figuur 21).



Figuur 21: Het plotten van selectiviteitsgrafieken in Vision

De RMS-waarde van de inrushstroom (afhankelijk van tijd) verschijnt op de grafiek (Figuur 22). Om niet te trippen in normale situaties (zoals bij het inschakelen van de transformator) moet de karakteristiek van de transformatorbeveiliging hoger liggen dan de inrushkromme. Moderne digitale beveiligingsrelais hebben een blokkeringsoptie op de tweede harmonische van de stroom die in hoge mate aanwezig is in de inrushstroom (door de hoge asymmetrie van de tijdsdomeinkromme ten opzichte van de x-as). Smeltveiligheden hebben zo'n optie natuurlijk niet, en er moet dan extra aandacht aan besteed worden dat er voldoende afstand is tussen de krommes (gezien ook de onzekerheid die hoort bij de stroom-tijdkarakteristiek van de smeltveiligheid).



Figuur 22: Inrushstroomkromme (RMS-waarde afhankelijk van tijd) op de selectiviteitsgrafiek