

Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen

geproduceerd door apparatuur met een vermogen
groter dan 11 kVA

EnergieNed



Richtlijnen voor toelaatbare harmonische stromen

**geproduceerd door apparatuur met een vermogen
groter dan 11 kVA**

Samengesteld door de Werkgroep Netvervuiling (WGNV) in opdracht van
de Werkgroep Distributievraagstukken Elektriciteitsvoorziening (CDE) van
EnergieNed:

prof.ir. H.H. Overbeek, voorzitter	EBA
ing. R. de Jongh	EWR
ir. J.N. Luttjehuizen	EDON
ing. B. Wolvers	REMU
ir. G. Blom, secretaris	KEMA

EnergieNed



Arnhem, juni 1997 (herziene versie)

Table 1 Compatibility levels for individual harmonic voltages in medium voltage network

Odd harmonics non-multiple of 3		Odd harmonics multiple of 3		Even harmonics	
harmonic order n	harmonic voltage %	harmonic order n	harmonic voltage %	harmonic order n	harmonic voltage %
5	6	3	5 (1)	2	2
7	5	9	1,5 (1)	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	0,2+1,3.25/n (2)				

- (1) Values given for 3rd and 9th harmonics relate to single-phase networks. The levels in three-phase three-wire networks are about 1/3 of the levels given above.
- (2) This formula of compatibility level takes account of possible resonance conditions in the supply network. For the connection of large loads, subject to agreement between the supply authority and the customer, target levels are set to limit the current emissions which may depend on the network impedance. These target levels may be expressed by the formula $0,2 + 0,5 \times 25/n$ and are lower than the compatibility level.

Bijlage II

Uit IEC 1000-2-2

Table 1 Compatibility levels for individual harmonic voltages in low voltage networks

Odd harmonics non-multiple of 3		Odd harmonics multiple of 3		Even harmonics	
harmonic order n	harmonic voltage %	harmonic order n	harmonic voltage %	harmonic order n	harmonic voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	0,2+0,5 x 25/n				

Inhoud

Over deze richtlijnen	blz. 4
1 Inleiding	5
1.1 Netvervuiling	5
1.2 Waarom nieuwe richtlijnen voor netvervuiling?	6
1.3 Gevolgde filosofie	7
2 Toepassing van de richtlijnen	9
2.1 Aansluitvoorwaarden	10
2.2 Toetsing aan de richtlijnen	10
2.3 Aansluiting van de belasting	11
2.4 Overschrijding van de compatibiliteitsniveaus	11
2.5 Registratie van genomen maatregelen	12
3 Richtlijnen voor niet-lineaire belastingen voorzien van gelijkrichter- of wisselrichterschakelingen	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Toelichting	17
3.3 Voorbeeld	20
3.4 Wisselrichterschakelingen	22
4 Richtlijnen voor triac- en thyristorgeregelde ohmse belastingen	23
5 Richtlijnen voor softstarters voor asynchrone motoren	25
6 Richtlijnen voor assimilatieverlichting	26
6.1 Inleiding	26
6.2 Eisen te stellen aan installaties voor assimilatieverlichting	26
6.3 Toelichting bij KEMA-rapport over assimilatieverlichting	27
6.4 Voorbeeld	28
7 Centrale compenserende voorzieningen in het elektriciteitsnet	32
7.1 Compatibiliteitsniveaus	32
7.2 Het toepassen van zuigfilters	32
7.3 Financiering	33
Toelichting op de richtlijnen en geraadpleegde literatuur	34
Bijlage I Definities	36
Gebruikte symbolen	41
Bijlage II Compatibiliteitsniveaus volgens IEC 1000-2-2 en IEC 1000-2-12	42

Over deze richtlijnen

Toepassingsgebied

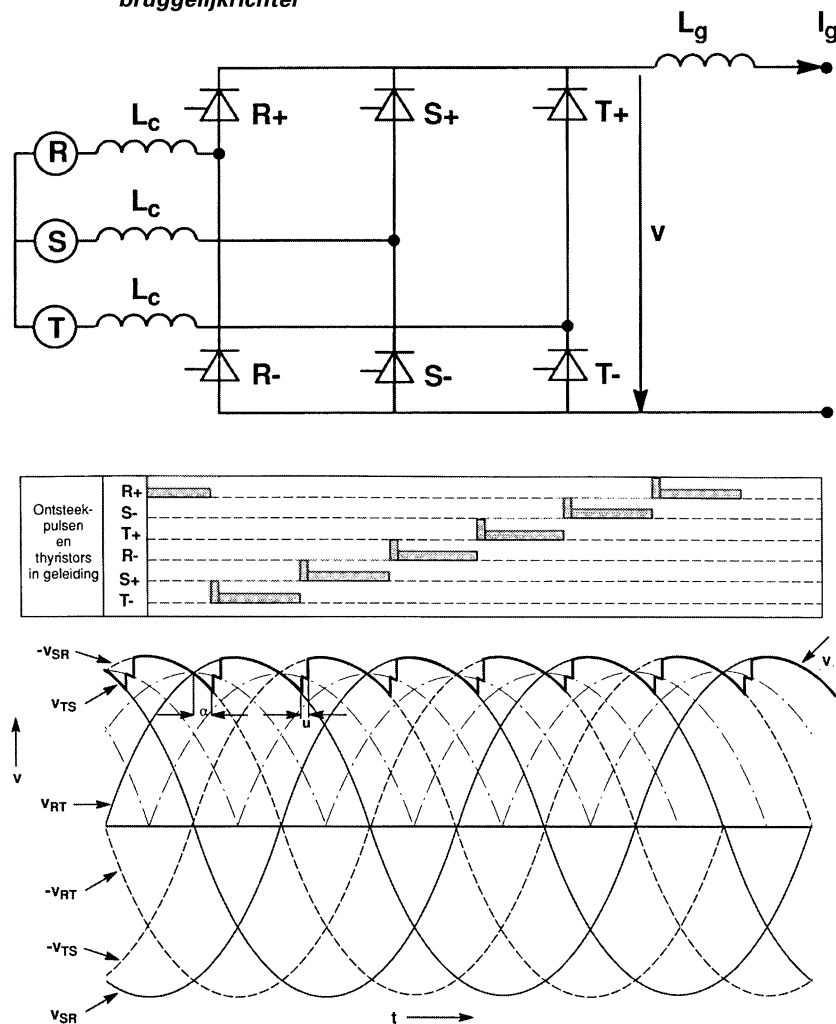
Deze richtlijnen zijn van toepassing op driefasige niet-lineaire belastingen in een industriële of daarmee vergelijkbare omgeving met een nominaal vermogen groter dan 11 kVA. Dat wil zeggen dat de aansluitwaarde van de stroom groter is dan 3 x 16 A als de nominale spanning van de belasting 230/400 V bedraagt.

Begrippen die zijn opgenomen in de Definities (Bijlage I) zijn waar zij voor het eerst in een hoofdstuk voorkomen *cursief* weergegeven.

Gebruikte symbolen

α	ontsteekhoek van een (gestuurde) gelijkrichter
ε_k	kortsluitspanning van een distributie- of vermogenstransformator (doorgaans uitgedrukt in % van de nominale transformatorspanning)
φ	fasehoek tussen spanning en stroom
C_L	de capaciteit van de blindstroomcondensatoren in een verlichtingsarmatuur (bij assimilatie-verlichting) in μF
L_{sper}	de zelfinductie van een (eventueel toe te passen) sperspoel in een verlichtingsarmatuur voor assimilatieverlichting in mH
M	rimpelfactor van de gelijkrichterstroom
n_L	het totale aantal verlichtingsarmaturen in een installatie voor assimilatieverlichting
P_{extra}	extra-koperverliezen van een distributie- of vermogenstransformator
$P_{\text{extra,nom}}$	extra-koperverliezen van een distributie- of vermogenstransformator bij de nominale onvervormde stroom
P_{cu}	koperverliezen van een distributie- of vermogenstransformator
$P_{\text{cu,nom}}$	koperverliezen van een distributie- of vermogenstransformator bij de nominale onvervormde stroom
P_k	kortsluitverliezen van een distributie- of vermogenstransformator
$P_{k,\text{nom}}$	de kortsluitverliezen van een distributie- of vermogenstransformator bij de nominale, onvervormde stroom
S	het schijnbare vermogen (in deze aanbevelingen wordt dit symbool gebruikt voor het schijnbare vermogen waarmee een transformator, waarop een niet-lineaire belasting zal worden aangesloten, reeds is belast)
S_{nom}	het nominale (schijnbare) vermogen van een distributie- of vermogenstransformator
u	overlappingshoek (van een gelijkrichter)

Figuur 2 Verloop van uitgangsspanning v van gestuurde zespulsige bruggelijkrichter



1 Inleiding

1.1 Netvervuiling

Netvervuiling wordt voornamelijk veroorzaakt door niet-lineaire belastingen van verbruikers. Dit kunnen zowel huishoudelijke (bijvoorbeeld TV-toestellen, spaarlampen) als niet-huishoudelijke ofwel industriële apparaten zijn. Bij niet-huishoudelijke apparatuur betreft het doorgaans apparatuur, toegepast in een industriële omgeving. Netvervuiling kan problemen en kosten voor verbruikers en nutsbedrijven opleveren. Het is dus zaak eisen te stellen waarmee het netvervuilingsniveau binnen de perken kan worden gehouden. Deze eisen hebben een economische en milieutechnische achtergrond:

- netvervuiling kan de goede werking van op het elektriciteitsnet aangesloten apparatuur nadelig beïnvloeden en snellere veroudering van componenten, zoals condensatoren en transformatoren, veroorzaken. Beide gevallen hebben financiële consequenties
- netvervuiling veroorzaakt extra netverliezen. Het gevolg is een groter energieverbruik, dus ook een grotere uitstoot van schadelijke stoffen. Daarnaast wordt ook de transportcapaciteit van een elektriciteitsnet erdoor beperkt.

Harmonische vervorming van de netspanning is naast kortstondig optredende stoorspanningen en spanningsfluctuaties één van de vormen van netvervuiling. Kenmerkend voor *harmonischen* is dat ze nauwelijks door het elektriciteitsnet worden verzwakt en resonantieverschijnselen kunnen veroorzaken.

Uitgangspunt voor het beoordelen van de grootte van harmonische spanningen in elektriciteitsnetten zijn IEC 1000-2-2 voor laagspanningsnetten en IEC 1000-2-12 voor middenspanningsnetten (zie Bijlage II). Om de niveaus volgens deze normen niet te overschrijden worden twee, trapsgewijs toe te passen mogelijkheden aanbevolen om netvervuiling te beperken:

- door bij de bron, dus in de *niet-lineaire belasting* zelf, tot op redelijke hoogte technische voorzieningen aan te brengen
- door het aanbrengen van centrale compenserende voorzieningen in het elektriciteitsnet door het energiebedrijf op kosten van de betreffende verbruikers, als voornoemde mogelijkheden zijn uitgeput en verdere beperkende voorzieningen zijn gewenst omdat de maximaal toelaatbare niveaus van de harmonische spanningen in het elektriciteitsnet worden overschreden. Hierdoor behouden de energiebedrijven een goed overzicht op de configuratie van hun elektriciteitsnetten, waardoor eventuele netvervuilingsproblemen beter te beheersen zijn, en kunnen genoemde technische voorzieningen daar worden geïnstalleerd, waar ze het meeste effect hebben.

Er zijn vier soorten *niet-lineaire belastingen* waarvoor technische eisen in deze richtlijnen zijn opgenomen:

- belastingen welke met het elektriciteitsnet zijn gekoppeld via een gestuurde of ongestuurde gelijkrichter c.q. schakelingen bestaande uit een energiebron die via een wisselrichter energie aan het elektriciteitsnet leveren;
- triac- en thyristorgeregelde ohmse belastingen zoals die onder meer worden gebruikt voor de regeling van verlichtingsinstallaties (bijvoorbeeld in theaters) en van heaters;
- softstarters voor asynchrone motoren;
- assimilatieverlichting gebruikt in de glastuinbouw.

Deze opsomming houdt niet in, dat er aan eventuele andere soorten niet-lineaire belastingen geen eisen zouden moeten worden gesteld. Als ander-soortige belastingen in niet te verwaarlozen aantallen toegepast gaan worden, zullen hiervoor eisen worden geformuleerd.

Naast een weergave van deze technische eisen is aangegeven hoe de richtlijnen bij het aansluiten van een niet-lineaire belasting moeten worden toegepast. Daarnaast worden voorbeelden gegeven om de toepassing van de richtlijnen te illustreren.

1.2 Waarom nieuwe eisen voor netvervuiling?

Door de voormalige Commissie Harmonische Componenten (CHC) van de VDEN zijn in 1975 aanbevelingen uitgebracht voor de maximaal toelaatbare netvervuiling in de vorm van harmonische componenten in de netspanning veroorzaakt door niet-huishoudelijke verbruikers. Op grond van de resultaten van een evaluatie in de periode 1988-1989 gericht op het gebruik en de bruikbaarheid van deze aanbevelingen, die algemeen worden aangeduid met het kenmerk CHC 75/10, kwam genoemde commissie tot de conclusie, dat de aanbevelingen door de meeste energiebedrijven niet worden opgevolgd.

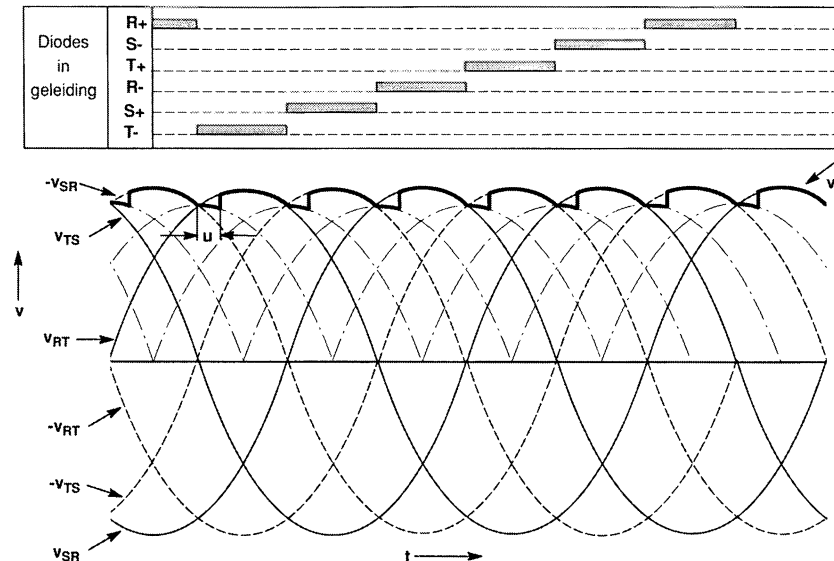
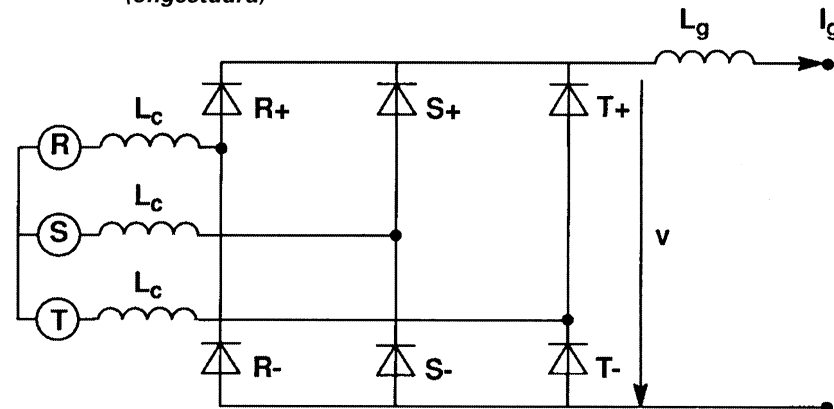
Als belangrijkste reden daarvoor kan worden genoemd, dat de aanbevelingen als te streng worden ervaren, ook in relatie tot het relatief geringe aantal door netvervuiling veroorzaakte klachten over de werking van op het elektriciteitsnet aangesloten toestellen e.d. Een computersimulatie bevestigde dit. Een gesimuleerde overschrijding van de CHC-eisen door een aantal verbruikers leidde in lang niet alle gevallen tot een ontoelaatbaar netvervuilingsniveau. Er is dus geen eenduidig verband tussen de door een verbruiker veroorzaakte netvervuilende stromen en het netvervuilingsniveau.

Het veelal ontbreken van zo'n verband is terug te voeren tot factoren als gelijktijdigheid (van het ingeschakeld zijn van niet-lineaire belastingen) en

$$I_{eff} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

(I_1 is de effectieve waarde van de 1e harmonische in de stroom etc.)

Figuur 1 Verloop van uitgangsspanning v van zespulsige bruggelijkrichter (ongesturd)



- door bij de bron, dus in de niet-lineaire belasting zelf tot op redelijke hoogte technische voorzieningen aan te brengen
- als voornoemde mogelijkheden zijn uitgeput en verdere beperkende voorzieningen zijn gewenst, omdat wordt geconstateerd dat de maximaal toelaatbare niveaus van de harmonische spanningen in een openbaar elektriciteitsnet worden overschreden: door het aanbrengen van centrale compenserende voorzieningen in het elektriciteitsnet door de energiebedrijven op kosten van de betreffende verbruikers. Hierdoor behouden de energiebedrijven een goed overzicht op de configuratie van hun elektriciteitsnetten, waardoor eventuele netvervuilingsproblemen beter te beheersen zijn, en kunnen genoemde technische voorzieningen daar worden geïnstalleerd, waar ze het meeste effect hebben.

De filosofie vraagt een antwoord op het volgende:

- wanneer zijn de te stellen eisen **redelijk** en **waarom**?
- als er centrale maatregelen dienen te worden genomen, hoe wordt dit dan **gefinancierd**, zoveel mogelijk uitgaande van het principe: de vervuiler betaalt?

De antwoorden op bovenstaande vragen heeft de werkgroep als volgt geformuleerd.

Redelijk wil in dit geval zeggen, dat de regelgeving economisch verantwoord dient te zijn. Dus dat de belangen die gediend worden met het hanteren van eisen ten aanzien van de geproduceerde netvervuiling, moeten zijn afgewogen tegen de inspanningen en kosten die fabrikanten en verbruikers zich voor wat betreft het aanbrengen van technische voorzieningen ter beperking van de veroorzaakte netvervuiling moeten getroosten om aan de gestelde eisen te voldoen.

Wat het '**waarom**' betreft, in de richtlijnen voor de te stellen eisen aan apparatuur heeft de werkgroep veel moeite gedaan in te gaan op de achtergronden en argumenten te geven waarom bepaalde eisen worden gesteld.

Naast de, uitgaande van de voornoemde filosofie, ontwikkelde eisen is deze richtlijnen, in aparte hoofdstukken, ook aandacht besteed aan het toepassen van zuigfilters en aan de mogelijkheden die de energiebedrijven ter beschikking staan om de centraal te installeren technische voorzieningen ter beperking van de grootte van de netvervuiling te **financieren**.

Meer informatie

De stukken [1.6], [1.7] en [1.8] liggen ten grondslag aan de filosofie waarop de aanbevelingen zijn gebaseerd en gaan in op het waarom van de nieuwe eisen. In [1.11] is aangegeven wat extra netverliezen veroorzaakt door netvervuiling in economisch opzicht kunnen betekenen.

Ontsteekhoek (ook wel stuur- of ontsteekvertragshoek)

Bij gestuurde gelijkrichters: de hoek waarover de ontsteking (van de in een gestuurde gelijkrichter toegepaste thyristors) vertraagd wordt, gerekend ten opzichte van het tijdstip van natuurlijke ontsteking welke zou optreden als er in plaats van thyristors, diodes zouden zijn toegepast. (zie geraadpleegde literatuur, toelichting [1.1], figuur 2: ontsteekhoek = α).

Asymmetrie van de ontsteekhoeken

Het verschil van de ontsteekhoeken van de verschillende thyristors of diodes van een gelijkrichter gerekend ten opzichte van de gemiddelde waarde van de ontsteekhoeken.

Toelichting: de ontsteekhoek van de verschillende thyristors of diodes zullen over het algemeen niet gelijk zijn. Als van de gemiddelde waarde van de ontsteekhoeken wordt uitgegaan, dan vertoont de ontsteekhoek van iedere thyristor of diode een afwijking (= asymmetrie) ten opzichte van dat gemiddelde.

Overlappingshoek

De tijdsduur gedurende welke de gelijkrichterstroom van de ene thyristor of diode in een gelijkrichter door de andere wordt overgenomen uitgedrukt in de overeenkomende fasehoek (zie geraadpleegde literatuur, toelichting [1.1], o.a. figuur 1 en 2: overlappingshoek = u).

Pulsgetal

Van een gelijkrichter: de verhouding van de frequentie van de rimpel van de niet afgevlakte gelijkrichter-spanning tot de netfrequentie. In feite is het het aantal thyristors of diodes c.q. thyristor- of diodeparen dat gedurende een periode in geleiding komt (en weer dooft).

Rimpelfactor

De verhouding van de top-top-waarde van de rimpel op de gelijkrichterstroom tot de topwaarde van die stroom.

Kortsluitverliezen

In een transformator: de (joulse) verliezen veroorzaakt door de transformatorstroom. De kortsluitverliezen zijn de som van de koperverliezen en de extra-koperverliezen.

Koperverliezen

In een transformator: de joulse verliezen in de gelijkstroomweerstand van de wikkelingen van de transformator.

Extra-koperverliezen

In een transformator: door stroomverdringingseffecten zal de weerstand voor wisselstroom van de transformatorwikkelingen niet gelijk zijn aan die

bijlage I

Definities

Niet-lineaire belasting

Een belasting waarvan de relatie tussen de aangesloten spanning en de opgenomen stroom niet kan worden beschreven door middel van een lineaire vergelijking of een lineaire differentiaalvergelijking. Of in simpeler bewoordingen: bij een niet-lineaire belasting verloopt de stroom door die belasting met de tijd - behoudens een eventueel faseverschil - niet identiek met de spanning over die belasting.

(Hogere) harmonischen, subharmonischen en interharmonischen

Een periodiek verschijnsel, zoals bijvoorbeeld een elektrische spanning of stroom in een elektriciteitsnet, kan worden ontbonden in het zogenaamde tijdsdomein. Dat betekent, dat het opgebouwd kan worden gedacht uit een sinusvormige grondgolf met een frequentie gelijk aan de frequentie van dat periodieke verschijnsel (= de grondfrequentie), met daarop gesuperponeerd diverse sinusvormige componenten met verschillende frequenties, te weten:

- (hogere) harmonischen met een frequentie gelijk aan een geheel veelvoud van de grondfrequentie. In formulevorm:

$$f_{\text{harm}} = n \cdot f_{\text{grond}}$$

waarbij n de rij natuurlijke getallen doorloopt.

Harmonischen van de netspanning (met een frequentie van 50 Hz) zijn dus de eventueel in die netspanning aanwezige componenten met een frequentie van 100 Hz (2e harmonische), 150 Hz (3e harmonische) etc.

- subharmonischen met een frequentie gelijk aan de grondfrequentie gedeeld door een geheel getal. In formulevorm:

$$f_{\text{sub}} = f_{\text{grond}} / n$$

Subharmonischen van de netspanning (met een frequentie van 50 Hz) zijn dus de eventueel in die netspanning aanwezige componenten met een frequentie van 25 Hz, 16,67 Hz etc.

- interharmonischen met een frequentie die geen relatie vertoont met de grondgolf en die tussen die van twee harmonischen inligt.

Diversiteit

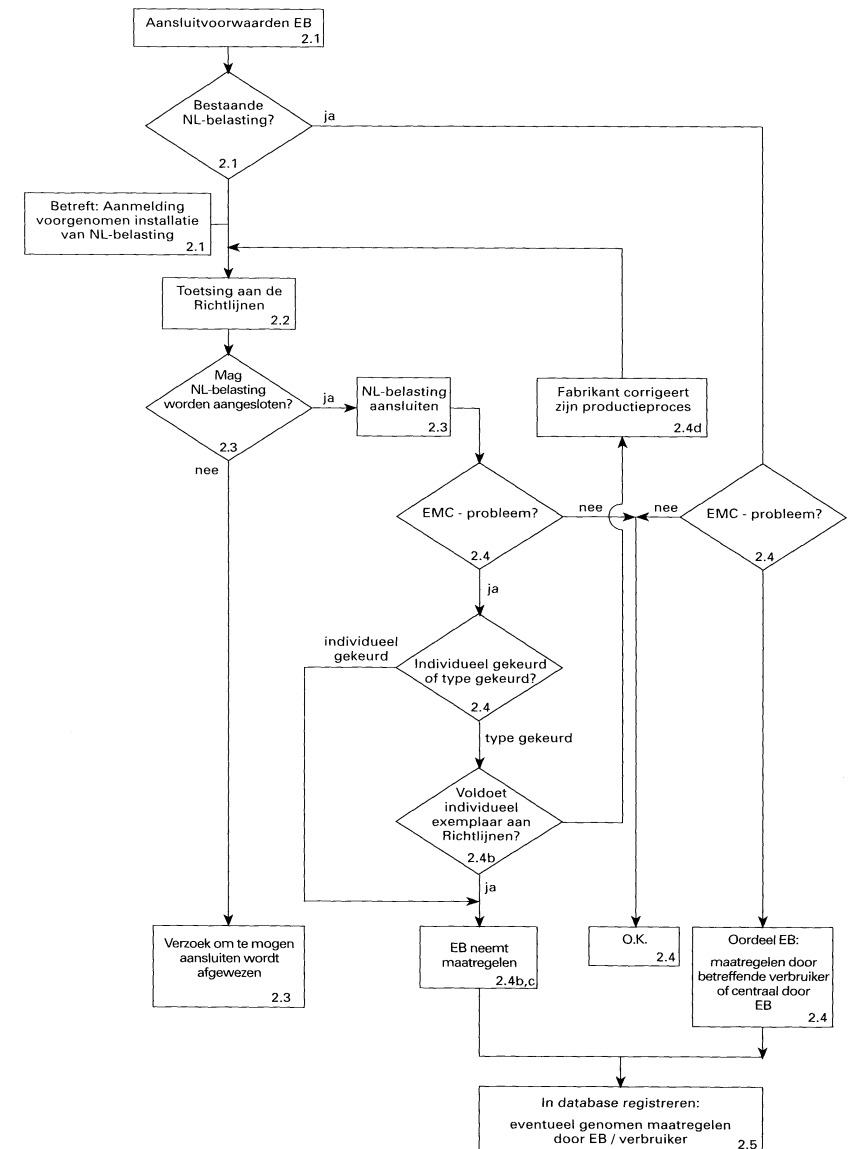
Met deze term wordt bedoeld op de mate waarin harmonische componenten met hetzelfde ranggetal geproduceerd door verschillende niet-lineaire belastingen in een net qua grootte en fase verschillen. De diversiteitsfactor geeft daarbij aan in welke mate deze componenten elkaar elimineren.

Gelijktijdigheid

Met deze term wordt bedoeld op de mate waarin meerdere niet-lineaire belastingen in een net tegelijkertijd zijn ingeschakeld, dus het net tegelijkertijd belasten.

2 Toepassing van de richtlijnen

In de flow chart is de aansluitprocedure van een niet-lineaire belasting (NL-belasting) weergegeven die door het energiebedrijf (EB) kan worden gevolgd. De nummers in de flow chart verwijzen naar de paragrafen van dit hoofdstuk.



2.1 Aansluitvoorwaarden

Als een energiebedrijf van mening is, dat de niet-lineaire belastingen waarop de richtlijnen van toepassing zijn, aan deze richtlijnen dienen te voldoen, dan zal dat in de aansluitvoorwaarden van dat bedrijf kenbaar moeten worden gemaakt.

Na de introductie ervan zullen de richtlijnen met inachtneming van een bepaalde overgangstermijn uitsluitend van toepassing zijn op nieuw te installeren niet-lineaire belastingen. De voorgenomen installatie van een dergelijke belasting dient door de desbetreffende gebruiker bij het energiebedrijf te worden aangemeld. Dit laatste moet dan in de aansluitvoorwaarden zijn vastgelegd.

2.2 Toetsing aan de richtlijnen

In de richtlijnen worden eisen geformuleerd waaraan niet-lineaire belastingen moeten voldoen. Of aan deze eisen wordt voldaan is in sommige gevallen eenvoudig na te gaan (bijvoorbeeld de eisen die worden gesteld aan het pulsgetal en het vermogen van een gelijkrichter). Voor een aantal eisen zal aan de hand van beproevingen moeten worden beoordeeld of daaraan wordt voldaan. Daartoe worden twee categorieën niet-lineaire belastingen onderscheiden.

De eerste categorie zijn niet-lineaire belastingen waarvan er van hetzelfde type meerdere worden gemaakt. Voorbeelden zijn softstarters en spannings/frequentie-omzetters voor de toerentalregeling van elektromotoren. Van deze categorie moet aan de hand van de resultaten van een typebeproeving worden aangetoond dat aan de eisen wordt voldaan. Dit onderzoek moet worden uitgevoerd door:

- een onafhankelijke instantie, of
- de fabrikant van de desbetreffende niet-lineaire belasting, mits het productiesysteem (vanaf ontwerp, via het fabricageproces tot en met de eindcontrole/-beproeving) van deze fabrikant door een als zodanig erkende instantie is gecertificeerd aan de hand van de kwaliteitsnorm ISO 9001. Deze certificerende instantie dient daarbij onder meer te verifiëren, dat het productiesysteem zodanig is ingericht dat met een hoge mate van betrouwbaarheid mag worden aangenomen dat de afgeleverde producten aan de in deze richtlijnen opgenomen technische eisen voldoen.

De tweede categorie zijn niet-lineaire belastingen ontworpen voor één specifieke toepassing. Voor deze categorie belastingen zal van geval tot geval moeten worden onderzocht of aan de richtlijnen wordt voldaan aan de hand van de resultaten van metingen uitgevoerd aan de desbetreffende niet-lineaire belasting door het betreffende energiebedrijf of door een in onderling overleg tussen dat energiebedrijf en de betreffende gebruiker aangewezen instantie.

- 2 KEMA-rapport: "Beperking van harmonische stromen in installaties voor assimilatieverlichting", referentie 22182-KCS/KL 92-2136, 1 december 1992.
- 3 Aanbevelingen en eisen met betrekking tot de maximaal toelaatbare harmonische componenten geproduceerd door niet-lineaire belastingen in een industriële of daarmee vergelijkbare omgeving in andere Europese landen (25138-06 KCS/KL 92-1434).
- 4 Beproeivingsvoorschrift voor niet-lineaire belastingen te installeren in een industriële omgeving (25138-06 KCS/KL 92-1432).
- 5 IEC 1000-4-7: Electromagnetic Compatibility - Part 4 (General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurement).
- 6 Prof. Dr.-Ing. S. Fryze: "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung". Elektrotechnische Zeitschrift 1932, Heft 25, 26, 29.
- 7 Ing. K.H.R. de Jongh: "Concluderende resultaten omtrent metingen verricht bij gebruikers met assimilatieverlichting op laag-, midden- en hoogspanningsniveau". Rapport van N.V. Energie- en Watervoorziening Rijnland (EWR).
- 8 Ir. R.J.R. Waumans (red.): "Openbare netten voor elektriciteitsdistributie", Arnhem, 1986.

Toelichting op de richtlijnen en geraadpleegde literatuur

Als toelichting op de richtlijnen kan worden verwezen naar een serie notities, rapporten en tijdschriftartikelen. Een deel hiervan is gebundeld onder de titel *Toelichtingen op de "Aanbevelingen voor de maximaal toelaatbare harmonische stromen geproduceerd door niet-lineaire belastingen in een industriële of daarmee vergelijkbare omgeving" (25138-06-KCS/KL 92-1457)*. Het gaat om de volgende notities, rapporten en tijdschriftartikelen:

- 1.1 Toelichting op het begrip commutatiereaktantie en de relatie ervan met het begrip overlappingshoek en met de daling van de gelijkrichterspanning
- 1.2 Toelichting op het hanteren van een reductiefactor voor wat betreft de maximaal toelaatbare belasting van nettransformatoren belast met gelijkrichters
- 1.3 Toelichting op de keuze in de richtlijnen van de maximaal toegestane grootte van de harmonische stromen veroorzaakt door een gelijkrichter
- 1.4 De maximaal toelaatbare belasting van nettransformatoren belast met een triac- of thyristorgeregelde ohmse belasting
- 1.5 Onderbouwing van de keuze van de grenzen van de gelijkrichter vermogens in de richtlijnen betreffende de maximaal toelaatbare harmonische stromen geproduceerd door niet-lineaire belastingen in een industriële omgeving
- 1.6 Diversiteit en gelijktijdigheid
- 1.7 Aanvulling op 1.6
- 1.8 The influence of various non-linear loads on the total harmonic distortion in industrial electricity networks. A study by means of computer simulation
- 1.9 G. Blom : "Het toepassen van zuigfilters in vervuilde elektriciteitsnetten". Elektrotechniek 63 (1985) (7) blz. 711..726
- 1.10 Het centraal toepassen van zuigfilters
- 1.11 A.E. Emanuel e.a. : "The engineering economics of power system harmonics in subdistribution feeders. A preliminary study". Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991

Het verrichten van metingen dient bij voorkeur bij de fabrikant van de betreffende belasting plaats te vinden en bij wijze van uitzondering in de installatie na plaatsing.

2.3 Aansluiting van de belasting

Als moet worden geconcludeerd, dat de niet-lineaire belasting niet aan de richtlijnen voldoet, dan wordt het verzoek om deze belasting aan te sluiten, afgewezen.

Voldoet de niet-lineaire belasting wel aan de richtlijnen, dan wordt het verzoek om aan te mogen sluiten gehonoreerd.

2.4 Overschrijding van de compatibiliteitsniveaus

Blijkt na aansluiting, dat de belasting niet een zodanige bijdrage levert aan het netvervuilingsniveau, dat de in IEC-verband gestelde compatibiliteitsniveaus worden overschreden, dan hoeft er verder geen actie te worden ondernomen.

Worden daarentegen deze niveaus wel overschreden, dan zal - afhankelijk van de wijze waarop is geconcludeerd, dat de betreffende niet-lineaire belasting aan de richtlijnen voldoet - het vervolgtraject er als volgt dienen uit te zien:

- a is de conclusie getrokken op grond van de resultaten van metingen uitgevoerd aan de betreffende niet-lineaire belasting zelf (zie 2.2), dan zal het energiebedrijf maatregelen dienen te nemen om het netvervuilingsniveau te reduceren
- b ligt een produktcertificatie (zie 2.2) of een systeemcertificatie (zie 2.2) ten grondslag aan de conclusie dat de belasting aan de richtlijnen zou voldoen, dan dient te worden geverifieerd of dat inderdaad voor het betreffende exemplaar ook het geval is. Een dergelijke verificatie kan bijvoorbeeld inhouden, dat de fabrikant wordt verzocht de desbetreffende beproevingsresultaten (eventueel op papier) te controleren of, in het uiterste geval, dat een beproeving door het energiebedrijf of een daarvoor ingeschakelde instantie wordt uitgevoerd aan de betreffende belasting
- c als uit de verificatie blijkt, dat wordt voldaan aan de richtlijnen, dan betekent dit, dat het energiebedrijf maatregelen dient te nemen ter reductie van het netvervuilingsniveau
- d in het andere geval zal de fabrikant zijn productieproces zodanig moeten wijzigen, dat alsnog wordt voldaan aan de richtlijnen, hetgeen eventueel door een (aanvullende) typekeuring wordt geverifieerd. Overeenkomstig 2.2 wordt deze aanvullende typekeuring uitgevoerd door een onafhankelijke instantie of door de fabrikant zelf. In het laatste geval eventueel in combinatie met een extra controle op het gehanteerde kwaliteitssysteem uitgevoerd door de instantie die dit systeem heeft gecertificeerd.

De betreffende, inmiddels geïnstalleerde niet-lineaire belasting zal zodanig moeten worden gemodificeerd, dat alsnog aan de richtlijnen wordt voldaan.

Bij reeds geïnstalleerde niet-lineaire belastingen, waarop de richtlijnen dus niet van toepassing zijn, geldt de volgende benadering. In het geval dat blijkt, dat de voornaamste oorzaak van eventueel geconstateerde overschrijdingen van de compatibiliteitsniveaus zijn toe te schrijven aan de desbetreffende belasting, dient er door het energiebedrijf te worden beslist welke reducerende maatregelen er dienen te worden genomen en door wie.

2.5 Registratie van genomen maatregelen

In een database dienen gegevens omtrent de genomen reducerende maatregelen te worden geregistreerd.

Meer informatie

In het Beproevoingsvoorschrift [4] is vermeld wat er moet worden gemeten en is aangegeven op welke wijze dat zou kunnen gebeuren.

men. Bij het toepassen van zuigfilters moet aan verschillende zaken aandacht worden besteed. Om deze reden, en ook omdat het toepassen van zuigfilters in financieel opzicht aantrekkelijker is, wordt in deze richtlijnen extra aandacht besteed aan het toepassen van deze filters.

7.3 Financiering

De volgende mogelijkheden staan de energiebedrijven ter beschikking om centrale compenserende maatregelen te financieren:

- verrekening van het blindverbruik
- het invoeren van een toeslag op de energieprijs afhankelijk van de grootte van de arbeidsfactor die minimaal bij een industriële gebruiker optreedt
- het heffen van een eenmalige bijdrage bij installatie van een niet-lineaire belasting.

Meer informatie

In het in de Toelichting opgenomen tijdschrift-artikel "Het toepassen van zuigfilters in vervuilde elektriciteitsnetten" [1.9] wordt uitgebreid ingegaan op deze componenten. Het daarbij gekozen uitgangspunt is de "Aanbevelingen voor toelaatbare harmonische stromen bij niet-huishoudelijke toestellen" van de VDEN (CHC 75/10). Vandaar dat de inhoud van dat artikel vooral is toegesneden op het toepassen van zuigfilters door de individuele gebruiker.

Voor het centraal toepassen van zuigfilters is een wat andere benadering vereist, maar kan voor een groot deel toch aan de inhoud van genoemd tijdschriftartikel worden gerefereerd. In de [1.10] genoemde toelichting is aangegeven hoe kan worden gekomen tot een verantwoord ontwerp voor centraal toe te passen zuigfilters.

7 Centrale compenserende voorzieningen in het elektriciteitsnet

7.1 Compatibiliteitsniveaus

Voor het totale toegestane netvervuilingsniveau in de vorm van harmonische componenten in de netspanning kan voor wat betreft het laagspanningsniveau worden verwezen naar IEC technical report 1000-2-2 en voor wat betreft het middenspanningsniveau naar IEC 1000-2-12. Een kopie van de tabellen uit deze rapporten is als bijlage II bijgevoegd. Aanbevolen wordt voor netten op hoogspanningsniveau dezelfde waarden te hanteren als in IEC 1000-2-12.

Indien de in deze tabellen vermelde "compatibility levels" worden overschreden, dan wordt aangeraden maatregelen te nemen door het centraal installeren van zuigfilters of zo mogelijk door het vervangen van een distributie- of vermogenstransformator door één met een groter nominaal vermogen. Er zal moeten worden vastgesteld op welke plaats het treffen van maatregelen het meest effectief is. Daartoe dient vooraf door berekening, waarvoor onder meer de belangrijkste bronnen van netvervuiling moeten worden gelokaliseerd, te worden onderzocht of de voorgenomen maatregelen een optimaal effect zullen opleveren.

7.2 Het toepassen van zuigfilters

Zoals bij de beschrijving van de bij het opstellen van de richtlijnen gevolgde filosofie reeds is aangegeven, wordt er uitgegaan van twee, trapsgewijs toe te passen mogelijkheden om de mate van netvervuiling te beperken (zie hoofdstuk 1). Als de aan de niet-lineaire belastingen gestelde eisen onvoldoende effect ressembleren, dan dient door het betreffende energiebedrijf te worden overgegaan tot het installeren van centrale compenserende voorzieningen in het elektriciteitsnet. Dat zullen over het algemeen zuigfilters zijn die op één of meerdere vaste frequenties zijn afgestemd. Een nieuwe ontwikkeling op dat gebied is het toepassen van statische compensatoren die de harmonische stromen in het net elimineren door even grote harmonische stromen die 180° uit fase zijn met de eerste, in het net te injecteren. Het toepassen van dergelijke compensatoren heeft geen invloed op de netconfiguratie, in tegenstelling tot het gebruik van zuigfilters waarvan de aanwezigheid tot gevolg heeft, dat de bestaande resonantiefrequenties van het net verschuiven en er nieuwe aan worden toegevoegd. De ontwerpcriteria van statische compensatoren zijn onder meer daarom een stuk eenvoudiger dan die van zuigfilters.

Voor wat betreft het functioneren van statische compensatoren geldt uitsluitend het bovengenoemde criterium, dat harmonische stromen moeten kunnen worden gegenereerd die even groot, maar 180° uit fase zijn met de door niet-lineaire belastingen in het net geïnjecteerde harmonische stromen.

3 Richtlijnen voor niet-lineaire belastingen voorzien van gelijkrichter- of wisselrichterschakelingen

3.1 Inleiding

De eisen voor niet-lineaire belastingen zijn zowel van toepassing op gelijkrichters als op wisselrichters via welke energie aan het elektriciteitsnet wordt teruggeleverd. Gelijkrichters zetten wisselspanning om in gelijkspanning. Daarbij worden twee categorieën onderscheiden:

- ongestuurde gelijkrichters, deze zijn in principe opgebouwd uit diodes (zie Bijlage I, figuur 1);
- gestuurde gelijkrichters, deze zijn in principe opgebouwd uit thyristors (zie Bijlage I, figuur 2);

In het vervolg van deze richtlijnen wordt uitsluitend nog gesproken over gelijkrichters. De richtlijnen in deze paragraaf gelden echter ook voor bedoelde wisselrichters, echter met de in paragraaf 3.4 gemaakte aantekeningen.

De eisen die aan gelijkrichters worden gesteld, zijn opgenomen in tabel 1, waarin voor de maximaal toegestane stromen wordt verwezen naar de tabellen 2 tot en met 4. De gestelde eisen zijn in de eerste plaats afhankelijk van:

- het spanningsniveau waarop de gebruiker is aangesloten die de desbetreffende belasting wil installeren;
- de vermogensruimte van de distributie- c.q. vermogenstransformator waarop de niet-lineaire belasting wordt aangesloten;
- het vermogen van de niet-lineaire belasting.

Op basis hiervan worden - naast de maximale toegestane harmonische stromen - ook eisen gesteld aan:

- het *pulsgetal*,
- de *overlappingshoek*,
- de *rimpelfactor* en
- de *asymmetrie* van de *ontsteekhoeken*.

Tabel 1

verbruiker aangesloten op	maximaal niet-lineair vermogen ¹	minimaal ver- eist pulsgetal van gelijk- richter	$u_0 \geq 2^\circ$	$M \leq$	asymme- trie in $\alpha \leq$	maximale toegestane harmonische stromen
1 LS-niveau	a) 200 kVA of $0,9 \cdot (S_{nom} - S)^*$ b) $0,95 \cdot (S_{nom} - S)$ (maar > 1a)	6 12	20° 20°	0,7 –	3° 2°	zie tabel 2: LS-niveau zie tabel 3: LS-niveau
2 MS-niveau	a) 1 MVA of $0,85 \cdot (S_{nom} - S)^*$ b) 5 MVA of $0,9 \cdot (S_{nom} - S)^*$ (maar > 2a) c) $0,95 \cdot (S_{nom} - S)$ (maar > 2b)	6 12 24	10° 10° 10°	0,7 – –	3° 2° 2°	zie tabel 2: MS-niveau zie tabel 3: MS-niveau zie tabel 4: MS-niveau
3 HS-niveau	a) 5 MVA of $0,8 \cdot (S_{nom} - S)^*$ b) 25 MVA of $0,85 \cdot (S_{nom} - S)^*$ (maar > 3a) c) $0,9 \cdot (S_{nom} - S)$ (maar > 3b)	6 12 24	0° 0° 0°	0,7 – –	3° 2° 2°	zie tabel 2: HS-niveau zie tabel 3: HS-niveau zie tabel 4: HS-niveau

¹ De vermelde reductiefactoren gelden uitsluitend als de extra-koperverliezen van de distributietransformator 5 à 6 % van de kortsluitverliezen bedragen

² Maximale toelaatbare asymmetrie voor de overlappingshoeken u : 10 % van de gemiddelde waarde van $u + 1^\circ$ (gerekend ten opzichte van de gemiddelde waarde)

* De kleinste van de twee genoemde waarden moet worden aangehouden
 $S_{nom} - S$ = vrije vermogensruimte van de distributie- c.q. vermogenstransformator waarop de niet-lineaire belasting wordt aangesloten

u_0 = overlappingshoek van de gelijkrichter bij een ontsteekhoek $\alpha = 0^\circ$

M = rimpelfactor van de gelijkrichter

α = ontsteekhoek van de gelijkrichter

bedoelde, in de praktijk optredende stroom door de spoel kan worden gesteld dat deze (derde harmonische) stroom door de nulleider een maximale waarde heeft gelijk aan 80 % van de grondharmonische stroom in de fasen. Daarbij is er van uitgegaan, dat aan de eis is voldaan dat er slechts verlichtingsmiddelen mogen worden toegepast, die wat betreft de geproduceerde harmonische stromen voldoen aan de eisen gesteld in IEC 1000-3-2.

(Zie verder opmerking aan het eind van dit voorbeeld.)

Oplossing 3

De armaturen worden in driehoek geschakeld; dus op de gekoppelde spanning aangesloten. De nominale secundaire spanning van de distributietransformator dient daarbij 3 x 230/133 V te bedragen.

Resumerend kan dus worden gesteld, dat in dit voorbeeld aan de vierde eis kan worden voldaan door het toepassen van oplossing 2 of 3. Bij het toepassen van oplossing 3 dient er, als er eventuele andere belastingen worden aangesloten, rekening mee te worden gehouden, dat de nominale spanning 3 x 230/133 V bedraagt.

Opmerking

Of de toegepaste armaturen, sperspoelen, nulspoelen en blindstroomcondensatoren aan de vermelde eisen voldoen, kan worden vastgesteld aan de hand van:

- de resultaten van een type-onderzoek aan deze componenten uitgevoerd door een onafhankelijke instantie
- de resultaten van een type-onderzoek uitgevoerd door de fabrikant van de desbetreffende componenten zelf, mits het produktiesysteem (vanaf ontwerp, via het fabricageproces tot en met de eindcontrole/-beproeving) van deze fabrikant door een als zodanig erkende instantie is gecertificeerd aan de hand van de kwaliteitsnorm ISO 9001.

Meer informatie

Het onder [2] van de Toelichting genoemde rapport bevat de meest relevante informatie. In [7] wordt in gegaan op metingen die zijn verricht bij gebruikers van assimilatieverlichting.

Bovendien dient voor de dissipatiefactor D van de toegepaste condensatoren te gelden:

$$D \leq 10^{-4} \text{ per } \mu\text{F.}$$

(Zie verder opmerking aan het eind van dit voorbeeld.)

Vierde eis

Om te voorkomen dat de parallelresonantiefrequentie van de installatie te dicht in de buurt komt te liggen van de 3e harmonische frequentie, dient één van de volgende oplossingen te worden gehanteerd.

Oplossing 1

Per armatuur wordt minstens een vermogen van $0,0055 \cdot C_L$ kVA per % kortsluitspanning geïnstalleerd. Uitgaande van een kortsluitspanning van 4 % betekent dit, dat minstens 990 VA aan transformatorvermogen per armatuur zou moeten zijn geïnstalleerd. In werkelijkheid is dat: $630/846.1000 = 745$ VA. Aan de voornoemde voorwaarde wordt dus niet voldaan.

Zou er door het energiebedrijf een transformator met een nominaal vermogen van 1 MVA en een kortsluitspanning van 6 % zijn geïnstalleerd, dan zou, zoals eenvoudig is te verifiëren, nog steeds niet aan deze voorwaarde zijn voldaan. Dat is wel het geval als er een distributietransformator met een nominaal vermogen van 1,6 MVA, kortsluitspanning 6 % wordt geplaatst; een dure oplossing dus...

Oplossing 2

Ten minste per separaat te schakelen deel van de installatie worden spoelen in de nulleider geïnstalleerd. De installatie bestaat uit strengen van 3 x 6 separaat te schakelen armaturen. Dat betekent, dat er tenminste per streng een spoel met een zelfinductie:

$$L_{nul} \geq \frac{500}{\frac{N}{3} \cdot (C_1 + C_2)} \text{ mH} = \frac{500}{\frac{18}{3} \cdot 45} = 1,85 \text{ mH}$$

dient te worden geïnstalleerd.

Voor de wisselstroomweerstand van deze spoelen moet gelden:

$$R_{AC,nul} \leq 0,0945 \cdot L_{nul} \Omega.$$

De waarde van L_{nul} mag bij de in de praktijk optredende stroom niet lager zijn dan de aangegeven minimumwaarde bij omgevingstemperaturen van 15 tot 35 °C. Aan deze eis moet ook nog worden voldaan na een versnelde verouderingsproef overeenkomend met 10 jaar bedrijfstijd. Wat betreft

Tabel 2 (van toepassing op 6-pulsige gelijkrichters; zie tabel 1)

rangnummer harmonische	maximaal toegestane grootte van de harmonische stromen in % van de maxi- maal door de niet-lineaire belasting af te nemen grondharmonische in de stroom			
	verbruiker aangesloten op niveau →	HS	MS	LS
	beproeven met over- lappingshoek* → (bij $\alpha = 0^\circ$)	$u \leq 3^\circ$	$u = 10^\circ$	$u = 20^\circ$
5		27	26,5	25
7		14,5	14	12,5
11		11	10	7,5
13		8	7	4,5
17		6,5	5	3
19		5,5	4	2
23		5	3	1,5
25		4	2,5	1
29		3,5	2	1
31		3,5	1,5	1
35		3	1	0,5
37		3	1	0,5
41		2,5	1	0,5
43		2,5	0,5	0,5
47		2	0,5	0,5
49		2	0,5	0,5
subharmonischen ¹		1	1	1
interharmonischen ¹ ≤ 1500 Hz		1	1	1
interharmonischen > 1500 Hz		1	0,5	0,5

* Deze bepaling geldt uitsluitend bij typekeuringen van niet-lineaire belastingen. In andere gevallen geldt het volgende:

- bij beproeving van de niet-lineaire belasting bij de verbruiker na installatie: beproeven in de praktijksituatie, dus bij de in de praktijk aanwezige commutatiereductie. Daarbij dienen de overlappingshoeken wel te voldoen aan de in tabel 1 gestelde eis
- bij beproeving bij de fabrikant of elders in een testopstelling: beproeven met een commutatiereductie zoals die ook na installatie bij de verbruiker aanwezig is (bijbehorende overlappingshoeken moeten voldoen aan de in tabel 1 gestelde eis). Als deze reactantie (nog) niet bekend is, dan vindt de beproeving plaats bij de in de tabel 2 voorgescreven overlappingshoek.

¹ zie ook *harmonischen*

Tabel 3 (van toepassing op 12-pulsige gelijkrichters; zie tabel 1)

rangnummer harmonische	maximaal toegestane grootte van de harmonische stromen in % van de maxi- maal door de niet-lineaire belasting af te nemen grondharmonische in de stroom		
verbruiker aange- sloten op niveau →	HS	MS	LS
beproeven met over- lappingshoek* → (bij $\alpha = 0^\circ$)	$u \leq 3^\circ$	$u = 10^\circ$	$u = 20^\circ$
11	11	10	7,5
13	8	7	4,5
23	5	3	1,5
25	4	2,5	1
35	3	1	0,5
37	3	1	0,5
47	2	0,5	0,5
49	2	0,5	0,5
subharmonischen ¹	1	1	1
interharmonischen ¹ ≤ 1500 Hz	1	1	1
interharmonischen > 1500 Hz	1	0,5	0,5

* zie noot bij tabel 2

¹ zie ook *harmonischen*

S : het vermogen waarmee de distributietransformator reeds is belast (naast de belasting door de installatie voor assimilatie-verlichting). In dit voorbeeld geldt dus: $S=0$.

Voor eis (1) kan dus worden geschreven:

$$S_{\text{nom}} \geq 475 \text{ kVA} / 0,9 = 528 \text{ kVA}.$$

Door een distributietransformator met een nominaal vermogen van 630 kVA te installeren wordt aan deze eis voldaan.

Tweede eis

De tweede eis waaraan moet worden voldaan, is, dat er slechts verlichtingsmiddelen mogen worden toegepast die voor wat betreft de geproduceerde harmonische stromen voldoen aan de eisen gesteld in IEC 1000-3-2 (zie tabel 2 in deze norm).
(Zie verder opmerking aan het eind van dit voorbeeld.)

Derde eis

De TF-frequentie van het lokale energiebedrijf is groter dan 250 Hz (nl. 492 Hz). Dat betekent, dat als derde eis geldt, dat er sperspoelen dienen te zijn geïnstalleerd in de armaturen of in ieder geval per separaat te schakelen groep van armaturen. Er van uitgaande, dat er per armatuur sperspoelen worden aangebracht, betekent dit dat in serie met de capaciteit van 45 μF een spoel met een zelfinductie van:

$$L_{\text{sper}} = \frac{500}{C_L} = \frac{500}{45} = 11,11 \text{ mH}$$

dient te worden geschakeld (of in serie met de condensator van 25 μF een spoel van 20 mH en in serie met de condensator van 20 μF een spoel van 25 mH).

Verder dient voor de wisselstroomweerstand van de sperspoel te gelden:

$$R_{\text{AC,sper}} \leq 0,0945 \cdot L_{\text{sper}} \Omega \text{ (met } L_{\text{sper}} \text{ in mH)}$$

dus:

$$R_{\text{AC,sper}} \leq 0,0945 \cdot 11,11 = 1,05 \Omega$$

(of bij het toepassen van een sperspoel per condensator:

$$R_{\text{AC,sper1}} \leq 0,0945 \cdot 20 = 1,89 \Omega \text{ en } R_{\text{AC,sper2}} \leq 0,0945 \cdot 25 = 2,36 \Omega).$$

Een aanvullende eis die aan de sperspoel wordt gesteld, is dat de waarde van L_{sper} bij de in de praktijk optredende stroom niet meer dan 5 % mag afwijken van de hiervoor berekende waarde bij omgevingstemperaturen van 15 tot 35 °C. Aan deze eis moet nog worden voldaan na een versnelde verouderingsproef overeenkomend met 10 jaar bedrijfstijd.

leerde blindstroomcondensatoren worden stringente eisen gesteld. Deze zijn in hoofdstuk 6 (paragrafen 6.4 en 6.5) en hoofdstuk 7 geformuleerd. Daarbij is onderscheid gemaakt naar de wijze waarop parallelresonantie bij de 3e harmonische frequentie wordt voorkomen en naar de wijze waarop de sperspoelen zijn toegepast: per armatuur of per groep armaturen. Een groep bestaat daarbij hoogstens uit de armaturen per separaat te schakelen deel van de installatie; dat wil zeggen per streng of per verdeler.

Bij TF-frequenties kleiner dan 250 Hz moet er voor een andere methode worden gekozen als de harmonische stromen in installaties voor assimilatieverlichting dienen te worden beperkt. Als er zich in dat geval problemen voordoen, dan kan de oplossing daarvoor bestaan uit het verleggen van de resonantiefrequentie tot ruim onder de 3e harmonische frequentie (zie paragraaf 5.3.3). Eventueel kan ook het fixeren van de resonantiefrequentie ruim boven 250 Hz als oplossing worden gehanteerd (paragraaf 5.3.1).

6.4 Voorbeeld

Een tuinder wil een installatie voor assimilatieverlichting installeren bestaande uit 846 armaturen met een vermogen per armatuur van 450 W/ 550 VA. De blindstroomcapaciteit per armatuur bedraagt 45 μF , verdeeld over 2 parallelgeschakelde condensatoren van 20 μF respectievelijk 25 μF . De door het lokale energiebedrijf toegepaste TF-frequentie bedraagt 498 Hz. De armaturen zijn separaat in strengen van 3 x 6 stuks te schakelen.

Ten behoeve van deze installatie wil het energiebedrijf een aparte distributietransformator installeren. Dat betekent, dat er van kan worden uitgegaan, dat naast de belasting door de geplande installatie voor assimilatieverlichting er geen of nagenoeg geen andere belasting op de betreffende transformator zal zijn aangesloten.

Eerste eis

De eerste eis waaraan moet worden voldaan is:

$$S_{\text{NL,max}} \leq \gamma \cdot (S_{\text{nom}} - S) \dots \dots \dots (1)$$

met:

- $S_{\text{NL,max}}$: het maximale schijnbare vermogen opgenomen door de installatie; in dit geval dus 846 x 550 VA = 475 kVA
- γ : een reductiefactor voor het maximale vermogen waarmee de transformator mag worden belast door een installatie voor assimilatieverlichting. Deze reductiefactor bedraagt 0,9 als de extra-koperverliezen van de distributietransformator 5 à 6 % bedragen van de kortsluitverliezen, waarvan in dit voorbeeld wordt uitgegaan
- S_{nom} : het nominale vermogen van de distributietransformator

Tabel 4 (van toepassing op 24-pulsige gelijkrichters; (zie tabel 1)

rangnummer harmonische	maximaal toegestane grootte van de harmonische stromen in % van de maxi- maal door de niet-lineaire belasting af te nemen grondharmonische in de stroom	
	verbruiker aange- sloten op niveau →	HS MS
	beproeven met over- lappingshoek* → (bij $\alpha = 0^\circ$)	$u \leq 3^\circ$ $u = 10^\circ$
23		5 3
25		4 2,5
47		2 0,5
49		2 0,5
subharmonischen ¹		1 1
interharmonischen ¹ ≤ 1500 Hz		1 1
interharmonischen > 1500 Hz		1 0,5

* zie noot bij tabel 2

¹ zie ook *harmonischen*

3.2 Toelichting

Gebruik tabel 1

Uitgaande van een bepaald spanningsniveau (kolom 1) wordt eerst onderzocht of het vermogen van de te installeren niet-lineaire belasting voldoet aan de voorwaarde vermeld onder punt a (2e kolom). Is dat het geval, dan gelden de daarachter in de kolommen 3 tot en met 7 vermelde eisen. Is dat daarentegen niet het geval, dan wordt onderzocht of aan de voorwaarde vermeld onder punt b (2e kolom) wel kan worden voldaan, etc.

Daarbij geldt voor de eerste twee kolommen de volgende toelichting.

Verbruiker aangesloten op

In deze kolom staat het spanningsniveau vermeld waarop de verbruiker die de betreffende niet-lineaire belasting wil installeren, is aangesloten. Er wordt onderscheid gemaakt tussen laagspannings- (LS-), middenspannings- (MS-) en hoogspanningsniveau (HS-niveau). Deze niveaus zijn als volgt in te delen [8]:

- laagspanningsniveau: lager dan 1 kV
- middenspanningsniveau: 3 kV tot en met 20 kV
- hoogspanningsniveau: 110 kV en hoger.

Naast deze spanningsniveaus wordt er nog een tussenspanningsniveau onderscheiden. Deze loopt van middenspannings- tot hoogspanningsniveau. In het kader van deze richtlijnen gelden voor dit niveau dezelfde eisen als voor het hoogspanningsniveau.

Maximaal niet-lineair vermogen

Voor het maximale vermogen per te installeren niet-lineaire belasting kan om twee redenen een bovengrens gelden:

- een absolute bovengrens i.v.m. de overige in de tabel 1 geformuleerde eisen,
- de vrije vermogensruimte van de distributietransformator waarop de niet-lineaire belasting wordt aangesloten ($=S_{\text{nom}}-S$) zal voldoende groot moeten zijn; als deze - vermenigvuldigd met een reductiefactor - kleiner is dan de absolute bovengrens, geldt deze als absolute bovengrens.

Onder 1a, 2a, 2b, 3a en 3b in de tabel worden dan ook telkens twee waarden genoemd voor het maximaal toegestane vermogen. In de eerste plaats is dat de absolute grens (bijvoorbeeld bij 2a: 1 MVA); in de tweede plaats is vermeld de vrije vermogensruimte van de distributie- c.q. vermogens-transformator vermenigvuldigd met een bepaalde reductiefactor (bijvoorbeeld in 2a: 0,85).

Als maximaal niet-lineair vermogen $P_{\text{NL, max}}$ van een gelijkrichter- of wisselrichter-schakeling dient te worden gehanteerd het vermogen $P_{10 \text{ min, max}}$ dat, vanwege de thermische belastbaarheid bij een omgevingstemperatuur van 20 °C, gedurende tenminste 10 minuten continu door de schakeling kan worden geleverd. Daarbij geldt als voorwaarde, dat $P_{\text{NL, max}}$ tenminste de helft moet bedragen van het vermogen $P_{0, \text{ max}}$ dat de schakeling gedurende enige (kortere) tijdsduur kan leveren. Wordt niet aan deze voorwaarde voldaan, dan dient als maximaal niet-lineair vermogen te worden gehanteerd de helft van het vermogen P_{max} .

Met andere woorden:

- Als $P_{0, \text{ max}} \leq 2 \cdot P_{10 \text{ min, max}}$ dan geldt: $P_{\text{NL, max}} = P_{10 \text{ min, max}}$
- Als $P_{0, \text{ max}} > 2 \cdot P_{10 \text{ min, max}}$ dan geldt: $P_{\text{NL, max}} = 0,5 \cdot P_{0, \text{ max}}$

Met:

- $P_{\text{NL, max}}$: het voor de niet-lineaire belasting te hanteren maximale niet-lineaire vermogen,
- $P_{10 \text{ min, max}}$: het vermogen waarmee de niet-lineaire belasting, vanwege de thermische belastbaarheid ervan, gedurende tenminste 10 minuten continu kan worden belast, bij een omgevingstemperatuur van 20 °C,
- $P_{0, \text{ max}}$: het vermogen waarmee de niet-lineaire belasting gedurende enige (korte) tijdsduur kan worden belast.

Vaststelling van $S_{\text{nom}}-S$

S_{nom} is het nominale vermogen van de distributie- c.q. vermogenstransformator via welke het desbetreffende distributienet is aangesloten.

In paragraaf 6.6 van voornoemd rapport wordt uitgebreid ingegaan op deze oplossingen. De volgende paragraaf bevat een wegwijzer voor dit rapport.

6.3 Toelichting bij KEMA-rapport over assimilatieverlichting

In het KEMA-rapport "Beperking van harmonische stromen in installaties voor assimilatieverlichting" [2] worden richtlijnen gegeven om de grootte van harmonische stromen in dergelijke installaties te reduceren tot aanvaardbare waarden. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen 3 mogelijkheden:

- de resonantiefrequentie ligt ruim boven de 5e harmonische frequentie (de 5e harmonische component in de netspanning is veelal veruit de grootste harmonische in de MS- en HS-netten). Om dit te bereiken dient aan de volgende 2 voorwaarden te worden voldaan: geen sperspoelen installeren in de armaturen en een minimaal transformatorvermogen per geïnstalleerd armatuur hanteren
- de resonantiefrequentie ligt tussen de 3e en 5e harmonische frequentie en op voldoende afstand daarvan. Dit kan worden bereikt door sperspoelen te installeren. Dit in combinatie met één van de volgende mogelijkheden:
 - een minimaal transformatorvermogen per armatuur hanteren
 - spoelen in de nulleider van elk separaat te schakelen deel van de installatie installeren
 - de armaturen in driehoek aansluiten, dus op de gekoppelde spanning
- de resonantiefrequentie ligt ruim onder de 3e harmonische frequentie. Dit kan worden bereikt door sperspoelen te installeren die 4 keer zo groot zijn dan normaal (dat wil zeggen 4 keer zo groot als bij de voorgaande mogelijkheid).

In hoofdstuk 6 wordt (onder meer voortbordurend op hoofdstuk 5) uitgebreid ingegaan op de te stellen eisen aan installaties voor assimilatieverlichting. Daarbij wordt voor installaties aangesloten op elektriciteitsnetten van een energiebedrijf dat een **TF-installatie bezit met een frequentie groter dan 250 Hz**, de voorkeur uitgesproken voor de methode waarbij de harmonische stromen worden beperkt door de resonantiefrequentie tussen de 3e en 5e harmonische frequentie te leggen en op voldoende afstand daarvan. Zoals hiervoor is aangegeven, kan dit worden bereikt door het toepassen van sperspoelen, uiteraard in combinatie met één van de hiervoor genoemde 3 oplossingen om de parallelresonantiefrequentie ruim boven de 3e harmonische frequentie te fixeren. Meestal zullen de sperspoelen per armatuur zijn geïnstalleerd; in ieder geval dienen ze per separaat te schakelen deel van de installatie te zijn aangebracht.

Aan de zelfinductie van de sperspoelen en de wisselstroomweerstand ervan, alsmede aan de dissipatiefactor van de in de armaturen geïnstal-

6 Richtlijnen voor assimilatieverlichting

6.1 Inleiding

Assimilatieverlichting wordt in de glastuinbouw in toenemende mate toegepast. Bovendien worden er per aansluiting steeds grotere vermogens aangewend. Bij dit soort belastingen dient rekening te worden gehouden met twee soorten resonantieverschijnselen:

- parallelresonantie voor harmonischen opgewekt door de desbetreffende gebruiker zelf
- serieresonantie voor harmonischen afkomstig van andere gebruikers.

Met name door dit laatste verschijnsel moet bij assimilatieverlichting met een geheel andere probleem rekening worden gehouden dan bij andere niet-lineaire belastingen; namelijk met overbelasting van de installatie door harmonischen die niet door de desbetreffende belasting zelf worden geproduceerd, maar afkomstig zijn van andere gebruikers.

6.2 Eisen te stellen aan installaties voor assimilatieverlichting

Voor de eisen te stellen aan installaties voor assimilatieverlichting wordt verwezen naar het KEMA-rapport "Beperking van harmonische stromen in installaties voor assimilatieverlichting" [2]. Deze eisen kunnen puntsgewijs als volgt worden samengevat:

- de geïnstalleerde distributietransformator mag tot hoogstens 90 % van zijn nominale schijnbare vermogen worden belast met assimilatieverlichting
- er mogen slechts verlichtingsmiddelen worden toegepast die wat betreft de geproduceerde harmonischen voldoen aan de eisen gesteld in IEC 1000-3-2
- er moeten sperspoelen worden aangebracht minstens per separaat in te schakelen deel van de installatie (uitzonderingen daargelaten, zie paragraaf 6.3)
- aan de zelfinductie van die sperspoelen en de wisselstroomweerstand ervan, alsmede aan de dissipatiefactor van de in de armaturen geïnstalleerde blindstroomcondensatoren worden stringente eisen gesteld. Hiervoor wordt verwezen naar voornoemd KEMA-rapport (paragrafen 6.4 en 6.5 en hoofdstuk 7)
- in het geval ervoor is gekozen de resonantiefrequentie tussen de 5e en 3e harmonische frequentie te leggen (zie 6.3), dan dient parallelresonantie bij de 3e harmonische frequentie te worden voorkomen door één van de volgende oplossingen:
 - het hanteren van een minimaal transformatorvermogen per armatuur en per % kortsluitspanning
 - het installeren van spoelen in de nulleiders van de installatie
 - het op de gekoppelde spanningen aansluiten van de armaturen.

S is het reeds aangesloten vermogen met inachtneming van een gelijktijdigheidsfactor, waarbij, afgezien van die gelijktijdigheidsfactor, het vermogen van eventueel reeds aanwezige niet-lineaire belastingen voorzien van een gelijkrichterschakeling voor de in het volgende overzicht gegeven percentages meetelt.

verbruiker aangesloten op	pulsgetal van gelijkrichter	reeds aanwezig NL-vermogen telt mee voor
LS-niveau	6	110 %
	12	105 %
MS-niveau	6	120 %
	12	110 %
	24	105 %
HS-niveau	6	125 %
	12	115 %
	24	110 %

De in tabel 1, kolom 2 vermelde reductiefactoren (0,95; 0,9; 0,85 respectievelijk 0,8) gelden uitsluitend als de extra-koperverliezen van de distributietransformator 5 à 6 % van de kortsluitverliezen bedragen.

Indien dat niet het geval is, dan dienen er andere reductiefactoren te worden toegepast, welke kunnen worden berekend met de formule:

$$\beta = \sqrt{\frac{P_{k,nom}}{P_{cu,nom} + F \cdot P_{extra,nom}}}$$

met

- $P_{k,nom}$: de kortsluitverliezen van de transformator bij de nominale, onvervormde stroom
- $P_{cu,nom}$: koperverliezen van de transformator bij de nominale, onvervormde stroom
- $P_{extra,nom}$: extra-koperverliezen van de transformator bij de nominale, onvervormde stroom
- F : zie volgende tabel

verbruiker aangesloten op:	pulsgetal van gelijkrichter	F
LS-niveau	6	4,3
	12	2,2
MS-niveau	6	6,5
	12	3,9
	24	1,9
HS-niveau	6	9,8
	12	5,8
	24	3,3

In dat geval tellen, in tegenstelling tot wat boven is vermeld, eventuele reeds aanwezige niet-lineaire belastingen voor 100/β % mee voor wat betreft de bepaling van het maximaal toegestane niet-lineaire vermogen. Voor de mate waarin de vermogens van eventuele triac- of thyristorgeregelde belastingen meetellen, wordt verwezen naar hoofdstuk 4.

Uit het bovenstaande blijkt, dat het aanbeveling verdient een administratie van de aangesloten niet-lineaire belastingen per distributietransformator bij te houden. Als deze administratie ontbreekt, dient door metingen over wat langere tijd te worden vastgesteld in welke mate de transformator reeds is belast.

3.3 Voorbeeld

Een tractiebedrijf doet een aanvraag voor een aansluiting van een gelijkrichterstation. Daartoe zijn de volgende gegevens relevant: 2 gelijkrichter-groepen, elk 3 MW, overbelastbaar tot 150 % gedurende 10 minuten, piekvermogen 6 MW, Aansluitniveau: 10 kV.

Vraag : welke eisen moeten worden gesteld aan de installatie dan wel aan de toelaatbare harmonische stromen?

Analyse : wat is het te hanteren maximaal niet-lineair vermogen?
wat is het pulsgetal van de (ongestuurde) gelijkrichterinstallatie?
wat is het werkelijke te hanteren spanningsniveau?

Invulling van deze uitgangspunten levert de bewegwijzering voor de route door de tabel.

Vermogen

Overeenkomstig 3.2 bedraagt het maximale niet-lineaire vermogen:
 $2 \times 3 \times 1.5 = 9 \text{ MW}$.

5 Richtlijnen voor softstarters voor asynchrone motoren

Softstarters worden gebruikt bij het aanlopen van asynchrone motoren. Dat wil zeggen, dat de tijd dat ze in werking zijn, erg beperkt is, zodat er geen aanvullende eisen met betrekking tot de belastbaarheid van de betreffende distributietransformatoren hoeven te worden gesteld.

Er geldt als eis, dat de ontsteekhoeken van de triacs of thyristors in de drie fasen van een softstarter een maximale asymmetrie van 3° mogen hebben, gerekend ten opzichte van de gemiddelde waarde van die hoeken. Daarbij gaat het in totaal om 6 ontsteekhoeken: in elk van de drie fasen zowel voor het positieve deel van de spanningen, als voor het negatieve gedeelte.

Daarnaast geldt als eis, dat de *starttijd* niet korter mag zijn dan $0,12 \cdot P_{\text{motor}}$ seconden. Daarin is P_{motor} het nominale motorvermogen uitgedrukt in % van het nominale vermogen van de distributie- c.q. vermogenstransformator. Aan de starttijd wordt een minimum gesteld om de grootte van de interharmonische componenten in de stroom opgenomen bij het in werking zijn van een softstarter, te beperken.

- S_{nom} : het nominale vermogen van de distributie- c.q. vermogenstransformator via welke het desbetreffende distributienet is aangesloten
- S : het reeds aangesloten vermogen met inachtneming van een gelijktijdigheidsfactor, waarbij, afgezien van de gelijktijdigheidsfactor, het vermogen van eventueel reeds aangesloten andere triac of thyristorgeregelde ohmse belastingen voor $100/\gamma$ meetelt. Voor de mate waarin het vermogen van eventuele niet-lineaire belastingen voorzien van een gelijkrichterschakeling meetelt, wordt verwezen naar 3.2.

Uit het bovenstaande blijkt, dat het aanbeveling verdient een administratie van de aangesloten niet-lineaire belastingen per distributietransformator bij te houden. Als deze administratie ontbreekt, dient door metingen over wat langere tijd te worden vastgesteld in welke mate de transformator reeds is belast.

Meer informatie

Voor de berekening van het maximaal toelaatbare vermogen waarmee een nettransformator mag worden belast als een triac- of thyristorgeregelde ohmse belasting is aangesloten, wordt verwezen naar de Toelichting [1.4].

Spanningsniveau

Het aansluitniveau voor het station bedraagt MS-niveau (10 kV). Echter, het aansluitniveau voor het bedrijf blijkt HS-niveau (50 kV) te zijn, daar de 50/10 kV-transformator meerdere gelijkrichterstations van het bedrijf blijkt te voeden. Verder zijn er geen andere afnemers (denk aan PCC).

Tabel 1 (routing)

Met behulp van bovenstaande gegevens wordt in tabel 1 bepaald dat:

- aansluiting plaatsvindt op HS-niveau (→ categorie 3)
 - het niet-lineair vermogen kleiner is dan 25 MVA en er voldoende vermogensruimte op de 50/10 kV-transformator beschikbaar is (→ categorie 3)
 - het minimaal vereiste pulsgetal daarbij 12 moet bedragen.
- Dan volgt verder dat:
- $u \geq 0$ graden (overlappingshoek)
 - aan M worden geen eisen gesteld (rimpelfactor)
 - $\Delta\alpha \leq 2$ graden (asymmetrie)
 - harmonische stromen volgens tabel 3.

Indien het aansluitniveau MS was geweest, dan was de routing geworden:

- aansluiting op MS-niveau (categorie 2)
- afweging voor categorie 2b of 2c: er geldt als eis dat het niet-lineair vermogen ≤ 5 MVA of $0,9 \cdot (S_{nom} - S)$, waarbij het laagste vermogen moet worden aangehouden. Daarom volgt hieruit dat moet worden doorgestapt naar categorie 2c
- voor categorie 2c geldt: niet-lineair vermogen $\leq 0,95 \cdot (S_{nom} - S)$
Voor de gegeven situatie geldt: $S_{nom} = 20$ MVA. Indien nu $S < 10,5$ MVA, dan kan de gelijkrichterinstallatie worden aangesloten onder de volgende voorwaarden:
 - pulsgetal ≥ 24
 - $u \geq 10$ graden
 - M: geen eisen
 - $\Delta\alpha \leq 2$ graden
 - harmonische stromen: tabel 4.

Meer informatie

Voor een toelichting op de keuze van de grenzen van de gelijkrichter vermogens wordt verwezen naar [1.1], [1.2] en [1.5].

Voor een nadere toelichting op het in de tabellen 2, 3 en 4 genoemde begrip: overlappingshoek u , alsmede op de berekening van de maximaal toegestane grootte van de harmonische stromen wordt verwezen naar [1.1] en [1.3].

3.4 Wisselrichterschakelingen

In het voorgaande wordt uitsluitend gesproken over gelijkrichters. De richtlijnen gelden echter ook voor wisselrichters, met de aantekening dat in dat geval in plaats van "ontsteekhoek $\alpha \approx 0^\circ$ " moet worden gelezen "ontsteekhoek $\alpha = 180^\circ$ ". Een ontsteekhoek $\alpha = 180^\circ$ in wisselrichterbedrijf heeft echter alleen theoretische betekenis. Vanwege het gevaar van "kippen" van een wisselrichter wordt in de praktijk echter een maximale ontsteekhoek van 150° aangehouden. Daarvan dient ook bij de beproeving van wisselrichters aan de hand van de voorliggende richtlijnen te worden uitgegaan. Dat betekent, dat in plaats van de in tabel 1 aangegeven minimale overlappingshoeken u_0 , voor wisselrichters bij een ontsteekhoek $\alpha = 150^\circ$ wordt geëist:

- overlappingshoek $u \geq 0^\circ$ als de betreffende wisselrichter zal worden gebruikt in een installatie die met het openbare elektriciteitsnet is gekoppeld op HS-niveau,
- overlappingshoek $u \geq 1,8^\circ$ bij koppeling met het openbare net op MS-niveau,
- overlappingshoek $u \geq 7,9^\circ$ bij koppeling met het openbare net op LS-niveau.

Beproevingen om te controleren of aan de eisen vermeld in de tabel 2, 3 c.q. 4 wordt voldaan, dienen te worden uitgevoerd bij $\alpha = 150^\circ$ en met:

- overlappingshoek $u = 0^\circ$ als de betreffende wisselrichter zal worden gebruikt in een installatie die met het openbare elektriciteitsnet is gekoppeld op HS-niveau,
- overlappingshoek $u = 1,8^\circ$ bij koppeling met het openbare net op MS-niveau,
- overlappingshoek $u = 7,9^\circ$ bij koppeling met het openbare net op LS-niveau.

4 Richtlijnen voor triac- en thyristorgeregelde ohmse belastingen

Van triac- en thyristorgeregelde ohmse belastingen is onder meer sprake bij de regeling van verlichtingsinstallaties in theaters en van heaters.

Hiervoor gelden de volgende eisen:

- de *asymmetrie van de ontsteekhoeken* van de drie fasen van de triac- of thyristorregeling mag maximaal 3° bedragen, gerekend ten opzichte van de gemiddelde waarde van die hoeken. Het gaat daarbij in totaal om 6 *ontsteekhoeken*: in elke van de drie fasen zowel voor het positieve deel van de spanningen, als voor het negatieve gedeelte
- bij volledige uitsturing (ontsteekhoeken = 0°) mogen de belastingen in de drie fasen een maximale asymmetrie hebben van 5 % gerekend ten opzichte van de gemiddelde waarde van die belastingen
- de regelsnelheid van de ontsteekhoeken mag niet meer bedragen dan $1500/P_{\Omega, \text{nom}}$ %/s. Hierin is $P_{\Omega, \text{nom}}$ het nominale vermogen opgenomen door de ohmse belasting bij volledige uitsturing van de triacs c.q. thyristors (ontsteekhoeken = 0°) uitgedrukt in % van het nominale vermogen van de distributie- c.q. vermogenstransformator. Met andere woorden er geldt:

$$P_{\Omega, \text{nom}} = \frac{P_{\text{thyr}}}{S_{\text{nom}}} \cdot 100\%$$

met P_{thyr} het nominale vermogen van de ohmse belasting bij volledige uitsturing.

Aan de regelsnelheid wordt een maximum gesteld om de grootte van interharmonische componenten in de stroom opgenomen door de geregelde belasting te beperken.

- het maximaal toegestane vermogen bedraagt:
 $\gamma \cdot (S_{\text{nom}} - S)$

Hierin is:

$$\gamma = 1 - 2 \cdot \frac{P_{\text{extra, nom}}}{P_{k, \text{nom}}}$$

$P_{k, \text{nom}}$: de kortsluitverliezen van de transformator bij de nominale, onvervormde stroom

$P_{\text{extra, nom}}$: extra-koperverliezen van de transformator bij de nominale, onvervormde stroom

**Vereniging van Energie-
distributiebedrijven
in Nederland**

Utrechtseweg 310
6812 AR Arnhem
Postbus 9042
6800 GD Arnhem
Telefoon 026 - 356 9444
Fax 026 - 446 0146

energieNed



Groep Marketing
Te Telefoon 026 - 356 2446
Fa Telefax 026 - 445 6781