



**Aansluiten van storende
belastingen in laagspanning**

Synthese

Dit rapport zal dienst doen als algemene gids voor het aansluiten van storende belastingen in laagspanning.

Het eerste deel behandelt de harmonischen die kunnen veroorzaakt worden door een storende belasting aangesloten op laagspanning. De oorzaak van deze harmonischen (harmonische stromen) worden besproken, evenals de voortplanting van de harmonische spanningen en de gevolgen die ze kunnen hebben voor andere belastingen die aangesloten zijn op dezelfde plaats. Vervolgens worden er oplossingen aangegeven die de situatie kunnen verbeteren.

Het tweede deel bespreekt de flicker en de spanningsvariaties veroorzaakt door belastingen aangesloten op laagspanning. Net zoals voor de harmonischen worden oorzaken, gevolgen en eventuele remedies besproken.

Tenslotte zijn er ook twee flowcharts voor de evaluatie van de harmonische niveaus, het flickerniveau of de spanningsvariaties opgenomen in dit document. Ze zijn in feite de "vertaling" van de normen van de Internationale elektrotechnische commissie (IEC) "IEC 61000-3-11" en "IEC 61000-3-12", en geven een indicatie van de te volgen weg om te evalueren of een storende belasting al dan niet mag aangesloten worden op een bepaald punt van het laagspanningsnet. Deze normen zijn ook overgenomen door CENELEC.

Als complement van dit document zijn er nog 6 bijkomende documenten beschikbaar:

- Een excel file voor de evaluatie van de harmonischen volgens de norm IEC 61000-3-12: [RCP091 – Harmonischen](#)
- De corresponderende handleiding: [RCP097 – Gids voor de evaluatie van harmonischen](#)
- Een excel file voor de evaluatie van de flicker en de spanningsvariaties volgens de norm IEC 61000-3-11: [RCP092 – Flicker en spanningsvariaties](#)
- De corresponderende handleiding: [RCP098 – Gids voor de evaluatie van flicker en van spanningsvariaties](#)
- Een excel file voor het bepalen van de vormfactor F: [RCP093 – Vormfactor](#)
- De corresponderende handleiding: [RCP100 – Gids voor het bepalen van de vormfactor](#)

Inhoudstafel

1. INLEIDING	4
2. HARMONISCHEN.....	4
2.1 DEFINITIE VAN HARMONISCHEN.....	4
2.2 OORSPRONG VAN DE HARMONISCHE STROMEN	5
2.3 HARMONISCHE SPANNINGEN	7
2.4 PROPAGATIE VAN HARMONISCHE SPANNINGEN.....	7
2.5 GEVOLGEN VAN HARMONISCHEN	7
2.6 COMPENSATIE VAN HARMONISCHEN	9
2.7 LOGIGRAM	14
3. FLICKER EN SPANNINGSVARIATIES	16
3.1 DEFINITIE VAN FLICKER EN SNELLE SPANNINGSVARIATIES	16
3.2 OORSPRONG VAN SPANNINGSVARIATIES EN FLICKER	17
3.3 GEVOLGEN VAN FLICKER	17
3.4 COMPENSATIE VAN FLICKER	18
3.5 FLOWCHART.....	20
BIJLAGE 1: HARMONISCHEN VOOR DRIEFASIGE CONVERTOREN	22
BIJLAGE 2: HARMONISCHEN VOOR DC REGULATOREN (DRIEFASIG EN ÉÉNFASIG)	23
BIJLAGE 3: AANWEZIGHEID VAN (BELANGRIJKE) CAPACITIEVE ELEMENTEN IN HET NET.....	24
BIJLAGE 4: GEVOELIGHEIDSCURVES.....	26

1. Inleiding

Dit rapport is een algemene gids voor het aansluiten van storende belastingen in laagspanning.

Het behandelt de twee storingen die het meest frequent zijn en die we terecht kunnen vrezen, namelijk spanningsharmonischen en flicker en spanningsvariaties die kunnen veroorzaakt worden door storende belastingen aangesloten in laagspanning. Het omvat een algemene beschrijving van de twee types storingen, de effecten die ze kunnen hebben op het net en de andere belastingen die op dit net zijn aangesloten, en de eventuele remedies die kunnen uitgevoerd worden om de toestand van het net te verbeteren.

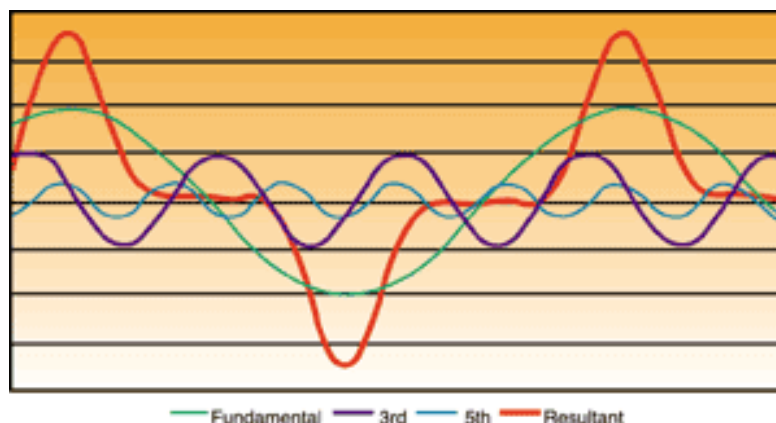
Bovendien zijn in dit document ook twee flowcharts opgenomen voor de evaluatie van het niveau van de harmonischen en de flicker. Ze zijn in feite de praktische toepassing van de normen 61000-3-11 en 61000-3-12, en geven een indicatie van de te volgen weg om te evalueren of een storende belastingen al dan niet mag worden aangesloten op een bepaald punt van het laagspanningsnet.

2. Harmonischen

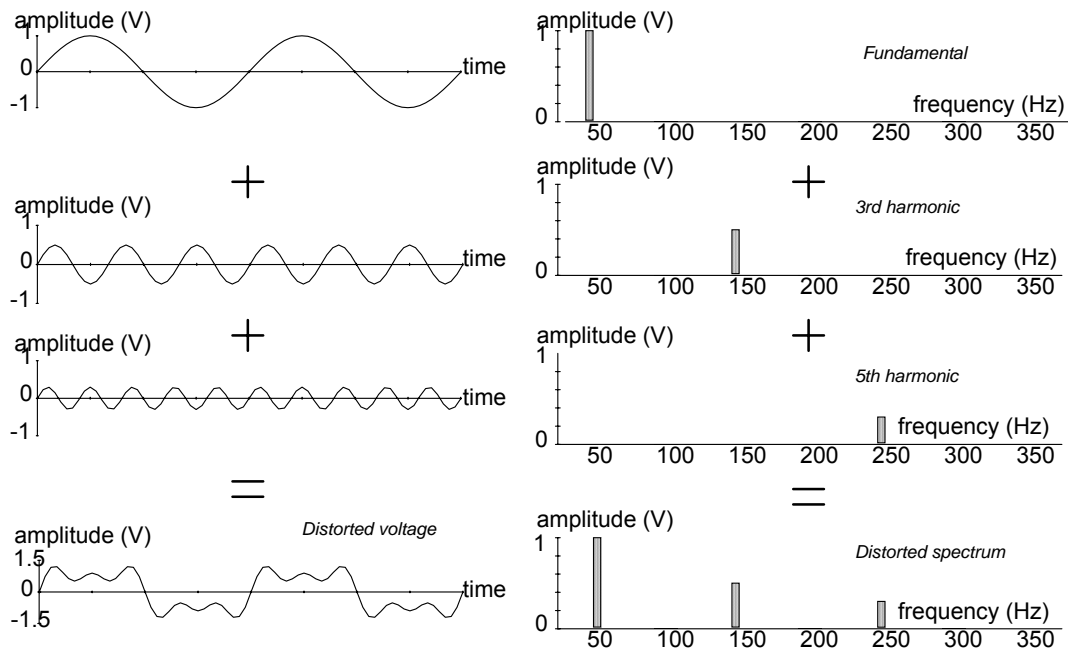
2.1 Definitie van harmonischen

We spreken van harmonischen – of een vervorming van de golfvorm – wanneer zich op de grondgolf van de spanning of de stroom andere componenten superponeren waarvan de frequentie een veelvoud is van 50 Hz. We noemen "harmonischen" de gehele veelvouden van de fundamentele frequentie (bijv. 100, 150 Hz, ...); de "interharmonischen" zijn de andere veelvouden of de niet-gehele veelvouden van de fundamentele frequentie (bijv. 132, 268 Hz, ...).

Ze zijn gekenmerkt door hun frequentie en hun amplitude. Deze laatste is vaak uitgedrukt in absolute waarde voor de stroomharmonischen en in percent van de fundamentele voor de spanningsharmonischen.



Figuur 1: voorbeeld van harmonischen gesuperponeerd op de fundamentele



Figuur 2 : voorbeeld van de superpositie van de 3^{de} en de 5^{de} harmonische op de fundamentele en het overeenkomstige spectrum

2.2 Oorsprong van de harmonische stromen

Harmonischen worden vooral veroorzaakt door niet-lineaire belastingen. Deze niet-lineariteit is soms intrinsiek (bijvoorbeeld, een magnetische kern die satureerbaar is of een toestel waarvan het werkingsprincipe gebaseerd is op elektrische bogen), maar kan ook resulteren uit herhaalde commutaties van elektronische vermogenscomponenten. Wanneer we een niet-lineaire belasting onderwerpen aan een sinusoidale spanning, zal deze belasting een vervormde stroom opnemen. De opgenomen harmonische componenten hangen enkel af van de karakteristieken van de belasting en niet van deze van het net. Deze belasting gedraagt zich dus, in eerste benadering, als een bron van *harmonische stromen*.

Enkele voorbeelden van harmonische bronnen:

- Vermogenelektronische voedingen of sturingen

- gelijkrichters

De stromen die getrokken worden door een klassieke gelijkrichter zijn weergegeven in de volgende tabel. We zien dat deze zich vooral onder rang 13 bevinden.

De harmonischen opgenomen door een PWM (Pulse Width Modulation) gelijkrichter daarentegen bevinden zich eerder in de hoger gelegen rangen, met andere woorden vanaf de 17^{de} harmonische.

Aansluiten van storende belastingen in laagspanning

	Harmonischen	5	7	11	13	17	19
6 pulsen zonder inductantie	Stroom (% I_1)	63.0	54.0	10.0	6.1	6.7	4.8
6 pulsen met inductantie	Stroom (% I_1)	30.0	12.0	8.9	5.6	4.4	4.1
12 pulsen met autotransformator	Stroom (% I_1)	11.0	5.8	6.2	4.7	1.7	1.4
12 pulsen + transformator met dubbele wikkeling	Stroom (% I_1)	3.6	2.6	7.5	5.2	1.2	1.3
24 pulsen met 2 transformatoren met 3 wikkelingen	Stroom (% I_1)	4.0	2.7	1.0	0.7	1.4	1.4
Actieve gelijkrichter met IGBT's	Stroom (% I_1)	2.6	3.4	3.0	0.1	2.1	2.2

Een meer gedetailleerd voorbeeld bevindt zich in **de bijlagen 2 en 3** van dit document.

televisies

Harmonischen	3	5	7	9	11	15
Stroom (% I_1)	82	66	34	14	9	4

Computers

Harmonischen	3	5	7	11
Stroom (% I_1)	90	83	78	60

Dimmers (éénfasig)

Harmonischen	3	5	7	9	11
Stroom (% I_1)	18	13	23	1.3	1

Elektrische bogen

Ontladingslampen

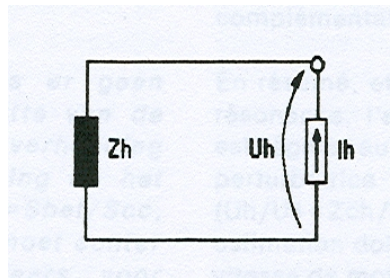
Harmonischen	3	5	7
Stroom (% I_1)	85 à 90	60 à 65	35 à 40

Lasposten

Harmonischen	5	7	11	13	17	19	23	25
Stroom (% I_1)								

2.3 Harmonische spanningen

Niet-lineaire belastingen gedragen zich – bij benadering – als bronnen van harmonische stromen. Voor elke harmonische frequentie heeft het net een bepaalde impedantie (Z_h). de injectie van de harmonische stromen (I_h) veroorzaakt dan harmonische spanningen (U_h) die op hun beurt andere bealstingen voeden.



Figuur 3: harmonische spanningen in het net ten gevolge van harmonische stromen

2.4 Propagatie van harmonische spanningen

Voor wat betreft de propagatie van de harmonische spanningen, kunnen we beschouwen dat er een gematigde verzwakking is naar netten met een zelfde spanning en een wterke afname naar netten met een hogere spanning.

2.5 Gevolgen van harmonischen

2.5.1 Onmiddellijke effecten

- Verstoring van "controllers" van elektronische systemen (verplaatsen van de nuldoorgangen)
- Veroorzaken van bijkomende fouten in elektriciteitsmeters met inductieve schijven. Bijvoorbeeld, de fout voor een teller van klasse 2 zal met 0,3% verhogen indien er 5% harmonische 5 aanwezig is (spanning en stroom).
- Ontvangers van CAB signalen kunnen verstoord worden, evenals relais gebruikt voor afstandsbediening, door spanningsharmonischen die zich in de omgeving van het controlesignaal bevinden.
- Harmonischen kunnen de goede werking van dimmers beïnvloeden.

2.5.2 Lange-termijn effecten

Opwarming van capaciteiten


De verliezen die de opwarming veroorzaken zijn te wijten aan 2 fenomenen: de geleiding en de diëlektrische hysteresis. In eerste benadering zijn ze proportioneel aan het kwadraat van de RMS-waarde van de stroom. De capaciteiten zijn dus gevoelig aan overbelastingen, ofwel veroorzaakt door een nogal hoge fundamentele stroom ofwel veroorzaakt door de aanwezigheid van harmonische spanningen.


trillingen en lawaai

De elektrodynamische krachten geproduceerd door de ogenblikkelijke stromen die geassocieerd zijn met de harmonische stromen kunnen trillingen en acoustisch geluid teweeg brengen, vooral in elektromagnetische toestellen. Pulserende mechanische koppels, veroorzaakt door roterende harmonische velden kunnen trillingen teweeg brengen in draaiende machines.

Condensatorbatterijen

Het gevaar voor condensatorbatterijen is dubbel :

 Enerzijds is er de harmonische stroom die door de batterij gaat die de opwarming van deze condensatorbatterij veroorzaakt.

 Anderzijds is de de harmonische spanning die over de condensatorbatterij staat die problemen kan geven wat betreft de isolatie van de batterij (veroudering, doorslag)

Interferentie met communicatie- en controlecircuits (telefoon, controle en monitoring)

deze storingen worden waargenomen wanneer de controle- of communicatiecircuits zich naast de energiedistributiecircuit die vervormde stromen voeren, bevinden. Er moet rekening gehouden worden met de afstand tussen de kabels, de lengte van het parallelisme en de harmonische frequenties.

Opwarming ten gevolge van bijkomende verliezen in de transformatoren en de machines

Transformatoren

er zijn bijkomende verliezen in de transformatoren ten gevolge van het skin-effect (verhoging van de weerstand van koper met de frequentie), de hysteresis en Foucault-stromen (in het magnetisch circuit).

Draaiende machines

Bijkomende verliezen in de stator (koper en ijzer) en vooral in de rotor (magnetische circuits, dempende wikkelingen) van machines veroorzaakt door het aanzienlijk verschil tussen de snelheid van de rotor en de snelheid van de magnetische velden die harmonischen introduceren (Nota : metingen op de rotor (temperatuur, geïnduceerde stromen) zijn zéér moeilijk of zelfs onmogelijk)

Opwarming van kabels en toestellen

De verliezen in kables die harmonische stromen voeren verhogen, hetgeen zich vertaalt in een verhoging van de temperatuur. De oorzaken van deze bijkomende verliezen zijn onder andere :

- ✚ Een verhoging van de RMS-waarde van de stroom voor éénzelfde verbruikt actief vermogen
- ✚ Een verhoging met de frequentie van de schijnbare weerstand van de kern van de kabel, ten gevolge van het skin-effekt
- ✚ een verhoging met de frequentie van de diëlektrische verliezen in de isolatie, indien de kabel onderworpen is aan een niet te verwaarlozen spanningsvervorming
- ✚ Fenomenen gerelateerd aan de nabijheid van geleiders met betrekking tot "metal cladding" en afschermingen die aan beide zijden van de kabel aan de aarde verbonden zijn, enz...

2.6 Compensatie van harmonischen

Het is belangrijk om de mogelijke bronnen van harmonischen van bij het begin op een geschikte manier te ontwerpen: een voldoende aantal fasen voor convertoren, goed bepaalde faseverschuivingen tussen de eenheden, een voeding op een voldoende hoog spanningsniveau.

Soms is het mogelijk om de storende belasting te voeden met een net dat gescheiden is van de datgene dat de toestellen voedt die gevoelig zijn aan harmonischen.

Grofweg zijn er twee aanpakken mogelijk om de problemen verbonden met harmonischen te beperken.

- Enerzijds is er de beperking van de emissie aan de bron, ofwel door gebruik te maken van de gepaste toestellen, ofwel door een rationeel concept van de installatie (om de sollicitatie van nabijgelegen belastingen die gevoelig zijn te beperken).
- anderzijds door de harmonischen te absorberen tijdens de propagatie door het installeren van filters (om de compatibiliteitsniveaus te respecteren in het aansluitingspunt).

2.6.1 Reductie van de harmonische stromen bij de emissie

2.6.1.1 INVLOED VAN DE KOPPELING VAN DE TRANSFORMATOREN

Indien twee driefasige gelijkrichterbruggen die gevoed worden door transformatoren die respectievelijk een ster-ster koppeling en een ster-driehoek koppeling hebben in parallel gezet worden zullen de harmonische componenten van de 5^{de} en de 7^{de} rang, alsook deze van de 17^{de} en de 19^{de} rang, enz... quasi geëlimineerd worden aangezien ze dezelfde amplitude hebben en bijna in tegenfase zijn. (We noemen dit dan een twaalfpulsige gelijkrichter).

Aansluiten van storende belastingen in laagspanning

2.6.1.2 INVLOED VAN DE PULSINDEX VAN DE GELIJKRICHTERBRUGGEN

Het resultaat beschreven in paragraaf 2.6.1.1 kan ook bekomen worden door middel van een transformator met twee secondaire wikkelingen die elk één van de 6-pulsige gelijkrichterbruggen voeden. Om het evenwicht van de belastingen te garanderen moet men deze twee gelijkrichterbruggen in serie zetten aan de gelijkstroomkant. Tabel 1 vat de harmonischen die aanwezig zijn in de stroom samen in functie van de pulsindex van de gelijkrichterbrug.

Tabel 1: harmonischen in functie van de pulsindex van de gelijkrichterbrug

Pulsindex	Harmonische rang							
	5	7	11	13	17	19	23	25
6	X	X	X	X	X	X	X	X
12			X	X			X	X
18					X	X		
24							X	X

In elk geval zijn verschillen in de transformatieverhouding, imperfectie in de defasering van de wikkelingen of de ongelijkheid van de kortsluitspanningen van deze wikkelingen de oorzaak van residuele harmonischen in de stroom. Dit kan ook voortkomen uit een imprecisie in de ontstekingshoek van de thyristoren, of uit een onevenwicht van de belastingen indien de gelijkrichters niet in serie uitgebaat worden aan de gelijkspanningskant.

2.6.1.3 GEBRUIK VAN MINDER VERVUILENDE TOESTELLEN (CIRCUITS MET GEFORCEERDE COMMUTATIE)

De gelijkrichterbruggen die hierboven besproken werden zijn gebaseerd op natuurlijke commutatie. Met GTO thyristoren of IGBT's kunnen de commutaties volledig gestuurd worden (geprovoceerde aansteking en doving). Deze elementen worden geëxploiteerd volgens het principe van pulsbreedtemodulatie (PBM).

In vergelijking met de gelijkrichters met natuurlijke commutatie kunnen we zeggen dat:

- Het gebruik van de PBM techniek toelaat om de harmonische stromen van lage orde aanzienlijk te verlagen
- door het feit van de steilheid van de bekomen pulsen, de harmonische stromen van hogere orde ($h \geq 17$) hoge(re) waarden bereiken. Ingangsfilters direct aangesloten op de klemmen van de toestellen laten toe om de amplitude van deze stromen te beperken tot aanvaardbare niveaus.

2.6.1.4 RATIONEEL ONTWERP VAN INSTALLATIES

Als alternatief, of als complement, kunnen de beperkingen voor de gevoelige belastingen verminderd of zelfs geëlimineerd worden door het ontwerp van de installatie te veranderen. Deze

Aansluiten van storende belastingen in laagspanning

methode bestaat erin om, bijvoorbeeld, de vervuilde en de gevoelige netten te scheiden. Dit wordt bereikt door een verhoging van de "elektrische afstand" tussen de storende belastingen en de gevoelige ontvangers in het aansluitingspunt.

Men kan bijvoorbeeld:

- Het gemeenschappelijk aansluitingspunt van de storende en de gevoelige belastingen verplaatsen naar de klemmen van de MS/LS-transformator.
- De gevoelige belastingen aansluiten op een lokaal distributienet (LS), en de vervuilende belastingen op het hoger gelegen net (MS) door middel van een andere transformator (verplaatsen van het gemeenschappelijke aansluitingspunt naar MS).
- De vervuilende belastingen op het lokale distributienet (LS) aansluiten maar op andere transformatoren of op gescheiden wikkelingen van deze die bestemd zijn om de gevoelige belastingen te voeden.

Indien men in een bestaande installatie over (minimum) twee transformatoren beschikt, kan men de storende en de gevoelige belastingen scheiden. Nochtans kan de installatie van bijkomende filters zich nog opdringen bovenop de vorige maatregelen.

2.6.2 Reductie van de harmonische stromen tijdens de propagatie

Een andere manier om de amplitude van de harmonische stromen te doen afnemen is deze totaal of gedeeltelijk te absorberen door afgestemde filters te installeren.

Dit kan zelfs noodzakelijk zijn wanneer:

- de beperking van de harmonische stromen aan de bron een excessieve kost met zich meebringt of niet voldoende is (in bepaalde uitbatingomstandigheden)
- condensatorbatterijen moeten geplaatst worden in de nabijheid van de storende belastingen om de $\cos\phi$ van de installatie of het net te verbeteren. Dit geval kan aanleiding geven tot het versterken van sommige harmonische stromen die dan de plaatsing van een filter verlangen.

De installatie van filters laat dan toe die harmonische stromen te absorberen waarvan de frequentie overeenkomt met de afstemfrequentie van de filter. In elk geval kan deze oplossing aanleiding geven tot een versterking van harmonische stromen van een lagere frequentie. We noemen dit het fenomeen van de anti-resonantie.

2.6.2.1 TYPES VAN FILTERS

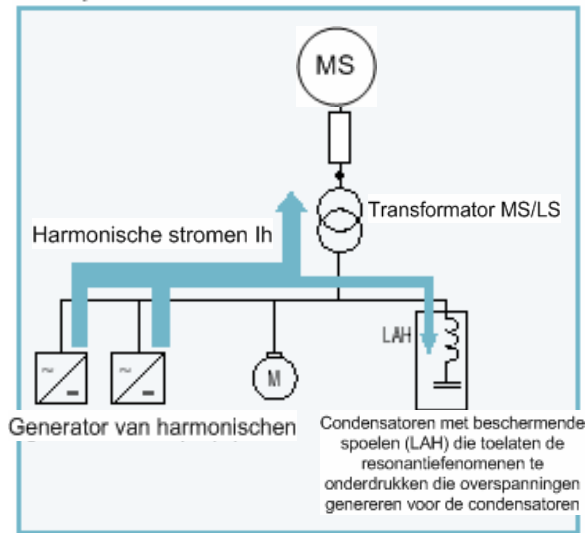
■ Anti-harmonische spoelen

In dit geval gaat het over afgestemde resonantiecircuiten die afgestemd zijn op een frequentie die lager is dan deze die overeenkomt met de eerste significatieve harmonische die in het net aanwezig is. Aangezien deze normalerwijze rang 5 is, zijn deze filters vaak afgestemd op frequenties van de orde 200 à 225 Hz, hetzij de harmonische rang 4 à 4,5. ze dienen om condensatorbatterijen te beschermen.

Aansluiten van storende belastingen in laagspanning

De "negatieve" kanten die men niet mag vergeten zijn:

- ✚ de verhoging van de anti-resonantiefrequentie van de netimpedantie van het hogerliggende net kan leiden tot het blokkeren van het CAB signaal van het type serie-injectie
- ✚ de verlaging van de equivalente netimpedantie tot hogere frequenties kan leiden tot een versterking van het CAB signaal van het type parallelle injectie

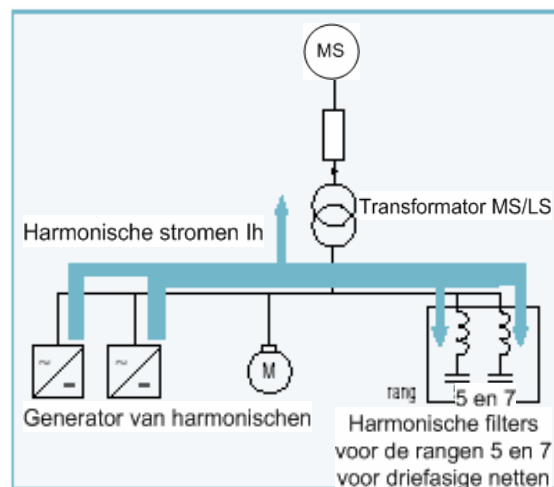


Figuur 4 : schema voor een anti-harmonische spoel

■ Afgestemde filters (passief)

Men spreekt hier van afgestemde filters die afgestemd zijn op één of meerdere frequenties die overeenstemmen met de significatieve harmonische rangen die aanwezig zijn in het net. Men bedoelt hier vooral de harmonischen 5, 7, 11 en 13. ze laten ook toe om de anti-resonanties te verplaatsen naar frequenties die niet karakteristiek zijn.

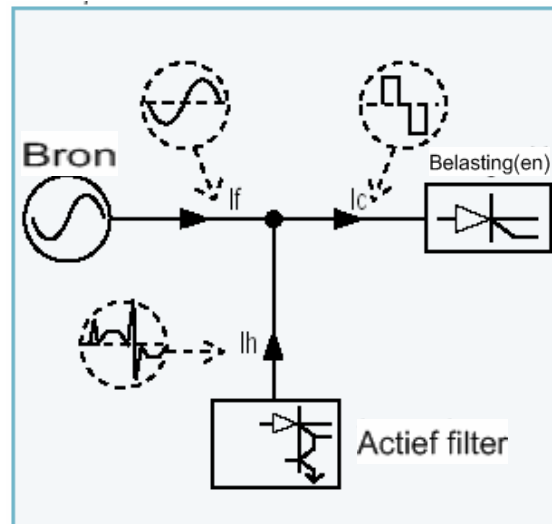
De opmerkingen betreffende het CAB signaal zijn ook hier geldig.



Figuur 5 : schema voor een afgestemde filter

Actieve filters

Een actief filter is een statische convertor die toelaat om in het net harmonischen te injecteren met een tegengestelde fase en amplitude opdat de resulterende golf sinusoidaal zou zijn. Hij past zich aan aan de waarde van de harmonische en niet aan de frequentie (de frequentie is voorgedefinieerd).



Figuur 6: actief filter

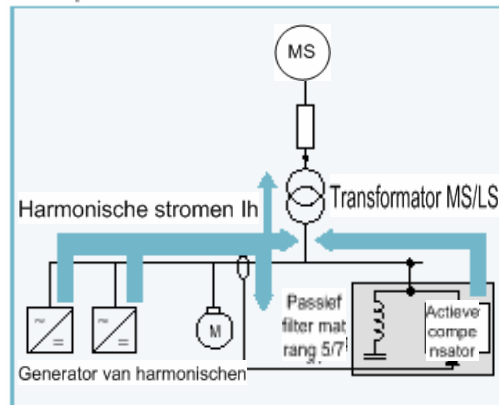
Gedempte filters

Dit type filter wordt ook wel een filter van tweede orde genoemd. Hij wordt ontworpen op basis van een resonante filter waar men een weerstand in parallel met de spoel toevoegt. Ze laten toe de spanningsharmonischen te verlagen over een groter frequentiebereik dan een zuivere afgestemde filter. Ze zijn ook afgestemd op hogere harmonische rangen.

Speciale filters

Meer gesofisticeerde filters kunnen ontworpen worden vertrekkende van drie basiselementen (weerstand, spoel, condensator). Deze types van filters worden gebruikt in specifieke gevallen, zeker omdat ze aanzienlijke bijkomende verliezen met zich meebrengen.

Een voorbeeld is de hybride filter. Dit is in feite een combinatie van passieve en actieve oplossingen die toelaat om de vervuiling over het hele spectrum aan te pakken. Bovendien is er compensatie van reactieve energie mogelijk. Het is een oplossing die zich uitstekend leent voor het filteren van het net. Bovendien laat deze oplossing een ideaal technico-economisch compromis toe aangezien hij toelaat om het ontwerpvermogen van de actieve filter te beperken.



Figuur 7 : schema van een hybride filter

2.7 Logigram

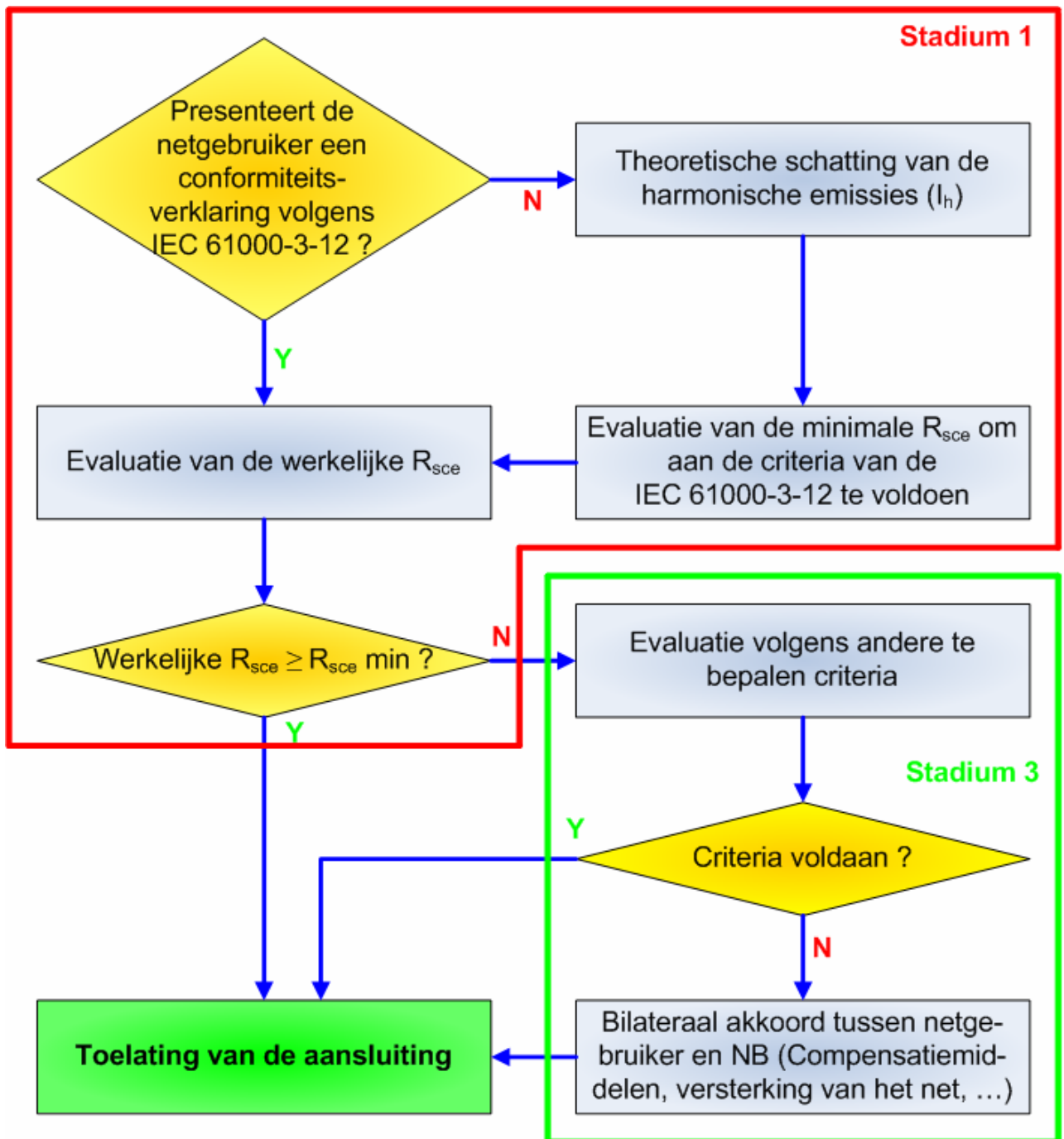
Om de evaluatie van de harmonischen te doorlopen, kan men zich baseren op het onderstaande logigram.

Wanneer een netgebruiker een mogelijk storende belasting wil installeren, moet men hem een conformiteitsverklaring met de norm IEC-61000-3-12 vragen. (Men bevindt zich dan in het logigram in de ruit links bovenaan).

- Indien het antwoord "neen" is (pijl met "N"), moet men verdergaan met een theoretische schatting van de harmonische emissies (I_h), om de minimale $R_{s_{ce}}$ te kunnen evalueren die nodig is om te voldoen aan de criteria van de IEC 61000-3-12. Vervolgens moet men de verhouding $R_{s_{ce}}$ tussen het kortsluitvermogen van het toestel en het kortsluitvermogen van het net in het aansluitingspunt evalueren.
- Indien het antwoord "ja" is (pijl met "Y"), volstaat het de reële $R_{s_{ce}}$ te evalueren (aangezien de minimale $R_{s_{ce}}$ dan gegeven is door de netgebruiker).

Vervolgens moet men de werkelijke $R_{s_{ce}}$ vergelijken met de minimale $R_{s_{ce}}$.

- Indien de werkelijke $R_{s_{ce}}$ groter is dan de minimale $R_{s_{ce}}$, mag men de belasting aansluiten.
- Indien de werkelijke $R_{s_{ce}}$ lager is dan de minimale $R_{s_{ce}}$, moet men verder gaan met een evaluatie volgens andere criteria. Deze criteria moeten bepaald worden door de netbeheerder en daarna geëvalueerd worden. Indien de situatie deze criteria respecteert, mag de belasting aangesloten worden; zoniet moet een bilateraal akkoord opgesteld worden tussen de netgebruiker en de netbeheerder opdat de belasting mag aangesloten worden.



3. Flicker en spanningsvariaties

3.1 Definitie van flicker en snelle spanningsvariaties

De spanningsvariaties van het net worden veroorzaakt door fluctuerende belastingen aangesloten op het net. Dit fenomeen onderscheidt zich van:

- Trage spanningsvariaties, door zijn relatief snel karakter van de variatie van de spanning
- Spanningsdips, door zijn amplitude en de oorsprong van het fenomeen

Wanneer de spanningsvariaties elkaar opvolgen in een relatief snel tempo kan dit zich vertalen in een storend knipperen van de verlichtingstoestellen – vooral voor gloeilampen – die aangesloten zijn op hetzelfde net. Dit fenomeen, dat tegelijk afhankelijk is van de belangrijkheid (amplitude) van de variaties als van hun repetitiefrequentie, wordt *flicker* genoemd.

We kunnen zeggen dat alle lampen gevoelig zijn aan spanningsvariaties, en, in dalende orde van gevoeligheid:

- lampen op basis van natriumdampen of kwikdampen (openbare verlichting, monumenten, enz. → weinig storend)
- gloeilampen
- fluorescentielampen

Hebben ook een zekere gevoeligheid voor flicker:

- televisieontvangers
- informaticaschermen

Om de gevoeligheid voor spanningsvariaties aan te duiden, gebruiken we vaak de "versterkingsfactor" (die in het Engels "Gain factor" of "GF" wordt genoemd).

Hij wordt als volgt berekend:

$$GF = \frac{\frac{\Delta RI}{RI}}{\frac{\Delta V}{V}}$$

met:

$$\Delta RI = R \cdot I_{\max} - R \cdot I_{\min}$$

$$\Delta V = VRMS_{\max} - VRMS_{\min}$$

Enkele voorbeelden van gevoeligheidscurves die de versterkingsfactor voorstellen zijn opgenomen in **bijlage 4** van dit document.

In feite zijn het repetitieve of willekeurige snelle spanningsvariaties van kleine amplitude (normalerwijze lager dan 10%) die veroorzaakt worden door plotse wijzigingen in de vraag naar vermogen van de belastingen (lasposten, vlamboogovens, motoren, enz...).

3.2 Oorsprong van spanningsvariaties en flicker

Ook al bestaat het fenomeen reeds geruime tijd, waarschijnlijk bevoordeelt de elektronica de mogelijkheden voor snelle en repetitieve inschakelingen van belastingen (stuursystemen met pulstreinen vooral gebruikt in kooktoepassingen en verwarming). Anderzijds zijn er regelingen (snelheidsregelingen, bijvoorbeeld in wasmachines) die zich vertalen naar snelle variaties van de uit het net verbruikte stroom en dus naar spanningsvariaties in functie van de impedantie van het net.

Maar, deze vermogenselektronica kan in sommige gevallen ook bijdragen tot het verminderen van de spanningsvariaties; bijvoorbeeld voor het starten van een motor (soft-start). Deze systemen beperken dan de startstromen van de motor.

Motoren met een groot vermogen (of groepen van motoren) die veelvuldig starten en stoppen, of die een variabele belasting hebben kunnen flicker produceren. Flicker kan ook veroorzaakt worden door machines met een alternatief resistief koppel (bijvoorbeeld compressoren).

Flicker vloeit dus vooral voort uit snelle spanningsvariaties met een kleine amplitude die veroorzaakt worden:

- ofwel door het variërende vraag van het vermogen van verschillende ontvangers (vlamboogovens, lasposten, motoren, enz...)
- ofwel door het onder en buiten spanning brengen van belangrijke belastingen (het starten van motoren, het schakelen van condensatorbatterijen met verschillende trappen, enz...)

3.3 Gevolgen van flicker

Rekening houdend met de geringe amplitude van de spanningsvariaties, hebben deze normalerwijze enkel een effect op lampen.

Nota: Belangrijke stromen – bijvoorbeeld bij het starten van een motor – kunnen het uitschakelen van beveiligingen veroorzaken.

In het geval van spanningsvariaties zijn de zichtbare effecten de oorzaak van de meeste klachten. Zelfs als de spanningsvariaties (nogal) ver uit elkaar liggen in de tijd, worden ze vaak als genant ervaren door de netgebruikers.

In laagspanningsnetwerken kan door het groot aantal storende belastingen aan het einde van de lijn leiden tot een verhoging van de resulterende flicker, en dit vooral in zwakke netten.

In het algemeen zijn de storende effecten het grootst en worden ze als het meest storend ervaren bij de netgebruiker zelf. Dit wil zeker niet zeggen dat andere netgebruikers niet gestoord zullen worden!

3.4 Compensatie van flicker

3.4.1 Aanpassing van de verstoorder

Om de flicker af te zwakken is het mogelijk om de werkingcyclus van de storende belasting te veranderen. Bijvoorbeeld, de vulsnelheid van een oven kan aangepast worden, het ritme waarop gelast wordt kan verbeterd worden.

Indien het veelvuldig en direct starten van een motor het probleem is bestaan er middelen om de overspanningen veroorzaakt door deze opstarten te verminderen.

3.4.2 Aanpassingen bij de netgebruiker

3.4.2.1 TOEVOEGEN VAN EEN INERTIE

Een bijzonder geval wordt gevormd door draaiende belastingen die spanningsvariaties veroorzaken. Het gaat hier bijvoorbeeld om volumetrische compressoren. Spanningsvariaties veroorzaakt door dit soort compressoren kunnen verminderd worden door een inertie toe te voegen op zijn aandrijfjas.

3.4.2.2 TOEVOEGEN VAN EEN DRAAIENDE CONVERTOR

Indien het actief vermogen van de storende belasting nogal stabiel is, kan men gebruik maken van een motor-generator die gereserveerd is voor deze belasting. De prijs van deze oplossing is echter nogal hoog.

3.4.2.3 VERANDEREN VAN DE MANIER VAN DE VERLICHTING

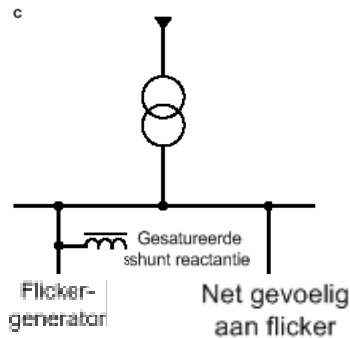
Fluorescentielampen hebben een lagere gevoeligheid dan gloeilampen (2 à 3 keer zwakker). Daarenboven bestaan er elektronische ballasten die het gedrag van lichtbronnen ten opzichte van flicker verbeteren. De negatieve kant van deze oplossing is dat de vermogenfactor van deze ballast ongeveer 0,5 is en dat de harmonische stromen die hij genereert nogal hoog zijn (de 3de harmonische bijvoorbeeld kan oplopen tot 30% van de fundamentele stroom!).

3.4.2.4 INSTALLATIE VAN EEN WISSELRICHTER

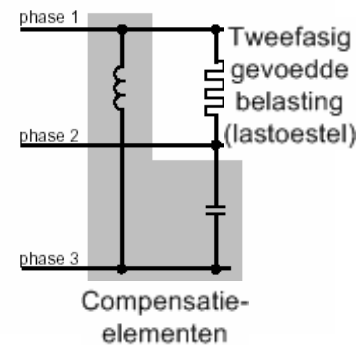
In het geval de verstoring door flicker beperkt is tot een goed geïdentificeerde groep gebruikers (vaak een vertrek met verlichting), is het mogelijk om dat deel van het net te "zuiveren" door de installatie van een wisselrichter of een spanningsregelaar. Deze oplossing vereist vaak een relatief beperkte investering, maar het blijft uiteraard een lokale oplossing.

3.4.2.5 PARALLELE INSTALLATIE VAN EEN GESATUREERDE SPOEL

Deze spoel moet zo dicht mogelijk bij de bron van flicker geïnstalleerd worden (Figuur 8). Het is mogelijk de spanningsvariaties stroomopwaarts te verminderen met een factor 10, maar ze heeft geen invloed op de spanningsvariaties stroomafwaarts omdat ze niet satureert. Bovendien is ze redelijk duur, verbruikt ze reactieve stroom en produceert ze harmonischen.



Figuur 8: parallelle gesatureerde spoel



Figuur 9: fasecompensator (Steinmetz)

3.4.2.6 PLAATSING VAN EEN FASECOMPENSATOR

De spanningsvallen veroorzaakt door éénfasige fluctuerende belastingen kunnen sterk verminderd worden door fasecompensatoren, draaiende groepen, transformatoren met een speciale koppeling of door een Steinmetz brug (Figuur 9). Deze laatste oplossing laat een heruitbalanceren toe van een éénfasige resistieve belasting. In dit geval wordt de Steinmetz-brug een "statische compensator".

3.4.3 Aanpassen van de nettopologie

- het verwijderen – of zelfs isoleren – van de storende belasting van de verlichtingscircuits
- verhogen van het kortsluitvermogen van het net in het gemeenschappelijk aansluitingspunt van de netgebruiker (P_{cc}) door de netimpedantie te verminderen

Deze oplossingen zijn aan te raden telkens wanneer het mogelijk is en ze zijn te verkiezen boven alle andere oplossingen (eenvoud van uitbating). Om dit te doen bestaan er verschillende mogelijkheden:

- de verlichting zo dicht mogelijk bij de voedingsbron aansluiten (d.w.z. de transformator)
- verhoging van het vermogen van de gemeenschappelijke transformator
- verlagen van de kortsluitspanning (u_{cc}) van de gemeenschappelijke transformator
- parallelschakeing van bijkomende transformatoren
- versterken van de doorsnede van de conductoren (vooral in laagspanning!!!)
- aansluiten van de storende belasting op een hoger spanningsniveau
- voeden van de storende belasting door een onafhankelijke transformator

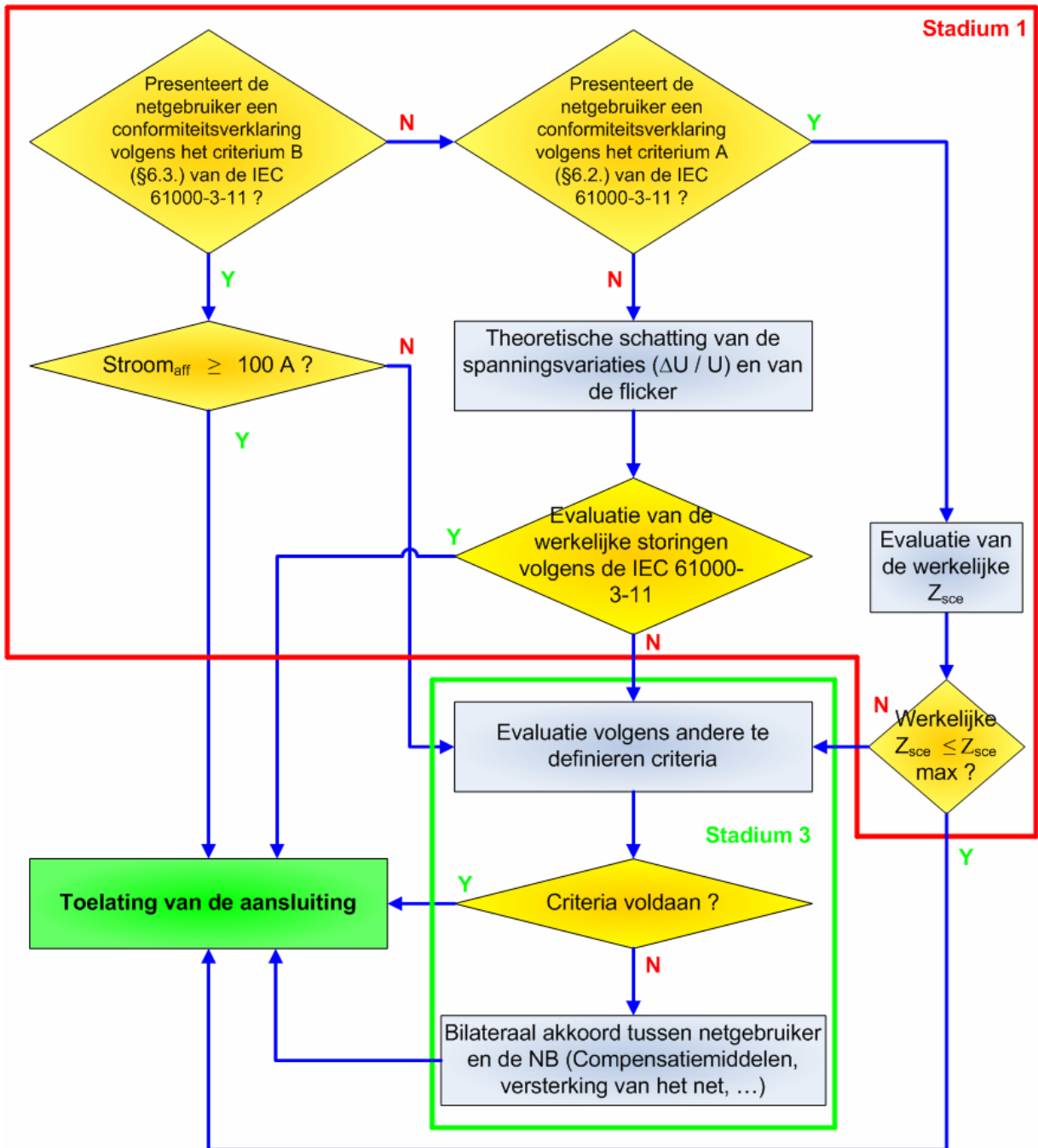
3.5 Flowchart

Om de evaluatie van de spanningsvariaties en flicker te doorlopen, kan men zich baseren op het onderstaande logigram.

Wanneer een netgebruiker een mogelijk storende belasting wil installeren, moet men hem vragen of hij een conformiteitsverklaring kan voorleggen volgens het criterium B van de norm IEC-61000-3-11 vragen. (Men bevindt zich dan in het logigram in de ruit links bovenaan).

- Indien het antwoord "neen" is (pijl met "N"), moet men vragen of er een conformiteitsverklaring volgens het criterium A van de norm IEC 61000-3-11 kan worden voorgelegd.
- Indien het antwoord "neen" is, moet men verdergaan met een theoretische schatting van de spanningsvariaties ($\Delta U/U$) en van de flicker, om de werkelijke storingen te kunnen evalueren volgens de IEC 61000-3-11.
 - Indien de criteria voldaan zijn, kan de belasting aangesloten worden.
 - Indien niet, moet men een evaluatie uitvoeren volgens andere criteria. Deze criteria moeten vastgelegd worden door de netbeheerder en daarna worden geëvalueerd. Indien de situatie de criteria respecteert, mag de belasting aangesloten worden; indien niet moet er een bilateraal akkoord tussen de netgebruiker en de netbeheerder worden opgesteld opdat de belasting mag aangesloten worden.
- Indien het antwoord "ja" is (pijl met "Y"), volstaat het de werkelijke Z_{sce} te evalueren (aangezien de maximale Z_{sce} in dit geval gegeven wordt door de netgebruiker).
 - indien deze werkelijke Z_{sce} kleiner of gelijk is dan de maximale Z_{sce} , mag de belasting aangesloten worden.
 - indien niet, moet men een evaluatie uitvoeren volgens andere criteria. Deze criteria moeten vastgelegd worden door de netbeheerder en daarna worden geëvalueerd. Indien de situatie de criteria respecteert, mag de belasting aangesloten worden; indien niet moet er een bilateraal akkoord tussen de netgebruiker en de netbeheerder worden opgesteld opdat de belasting mag aangesloten worden.
- Indien het antwoord "ja" is, volstaat het na te kijken of de toegekende stroom groter is of gelijk aan 100 A.
 - Indien dit het geval is, mag de belasting aangesloten worden.
 - Indien niet, moet men een evaluatie uitvoeren volgens andere criteria. Deze criteria moeten vastgelegd worden door de netbeheerder en daarna worden geëvalueerd. Indien de situatie de criteria respecteert, mag de belasting aangesloten worden; indien niet moet er een bilateraal akkoord tussen de netgebruiker en de netbeheerder worden opgesteld opdat de belasting mag aangesloten worden

Aansluiten van storende belastingen in laagspanning



Bijlage 1: Harmonischen voor driefasige convertoren

Harmonic	3 - pulse	6 – pulse			12 – pulse	
	Uncontrolled 3 - diode	Uncontrolled 6 - diode	Half controlled 3 - thyristor / 3 - diode	Controlled 6 - thyristor	Uncontrolled	Controlled
2	50	---	35	---	---	---
3	33.3	---	---	---	---	---
4	25	---	22	---	---	---
5	20	17.5	20	20	2.0	3.0
6	16.7	---	---	---	---	0.2
7	14.3	11	14	14.3	2.0	3.0
8	12.5	---	10	---	---	---
9	---	---	---	---	---	---
10	10	---	3.0	---	---	---
11	9.1	4.5	7.0	8.7	4.5	9.1
12	---	---	---	---	---	0.2
13	7.7	2.8	5.0	7.6	2.8	7.6
14	---	---	---	---	---	---
15	---	---	---	---	---	---
16	---	---	---	---	---	---
17	5.9	1.3	5.8	4.9	0.2	1.1
18	---	---	---	---	---	---
19	5.3	1.0	5.4	4.3	0.15	1.2

Bijlage 2: Harmonischen voor DC regulatoren (driefasig en éénfasig)

Harmonic	3 phases 6 thyristors	3 phases 3 thyristors + 3 diodes	1 phase 3 thyristors
2	---	39.5	---
3	---	---	32
4	---	16.5	---
5	21	10.5	10
6	---	---	---
7	10 ¹	8.5	10
8	---	7.6	---
9	---	---	5
10	---	6.8	---
11	6	5.4	---
12	---	---	---
13	5	5.7	---
14	---	4.8	---
15	---	---	---
16	---	4.9	---
17	4	4.2	---
18	---	---	---
19	4	4	---

¹ De hoogste niveaus van de 7de, 11de en 13de harmonischen kunnen voorkomen met lagere niveaus voor de 5de harmonische. Deze niveaus zijn dan 11, 8 en 6 %

Bijlage 3: Aanwezigheid van (belangrijke) capacitieve elementen in het net

Wanneer er capacitieve elementen aanwezig zijn in het net, kan er een resonantiefenomeen optreden. Deze capacitieve elementen kunnen bijvoorbeeld condensatorbatterijen zijn, maar ook de kabels die deel uitmaken van het net zelf vormen ook capaciteiten.

De condensatorbatterijen worden in het algemeen gebruikt om de $\cos\phi$ van een belasting te verbeteren. De industriële klanten worden vaak aangespoord om een condensatorbatterij te installeren om de factuur van hun (teveel) verbruikt reactief vermogen te compenseren. De elektriciteitsverdelers gebruiken ze om de spanning aan het uiteinde van een net te verhogen (en dus om de verliezen van het net te verlagen).

- Parallele resonantie

Gezien van de klemmen van het toestel dat aan de oorsprong ligt van de harmonische stromen staat de capaciteit C_1 in parallel met de inductantie L van het net. En resonantie ontstaat op de frequentie $f = h \times 50$ (met h de "harmonische rang") waarvoor geldt

$$h \omega L = \frac{1}{h \omega C_1} .$$

Een andere manier om de harmonische rang waarvoor de resonantie ontstaat te bepalen

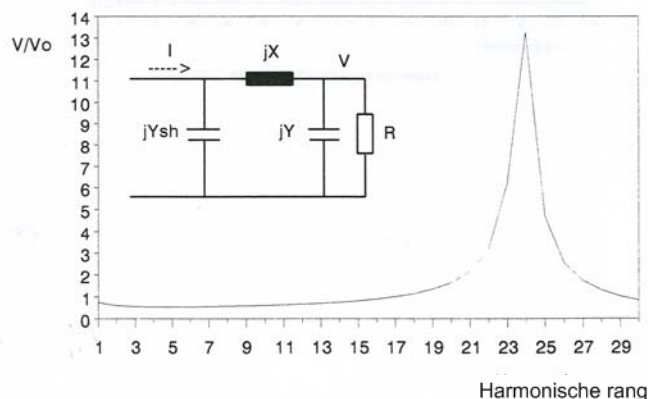
is de volgende: $h^2 = \frac{S_{cc}}{Q}$ met:

- S_{cc} = kortsluitspanning van het net
- Q = vermogen van de condensator

Bijvoorbeeld, indien het kortsluitvermogen van het net 10 MVA is en het vermogen van de condensator 50 kVar is, dan bekomt men het volgende resultaat :

$$h^2 = \frac{10 \text{ MVA}}{50 \text{ kVar}} = 200$$

Dus, $h \approx 14$. Er zal dus een resonantie optreden voor de harmonische rang 14.



Figuur 10: Parallele resonantie

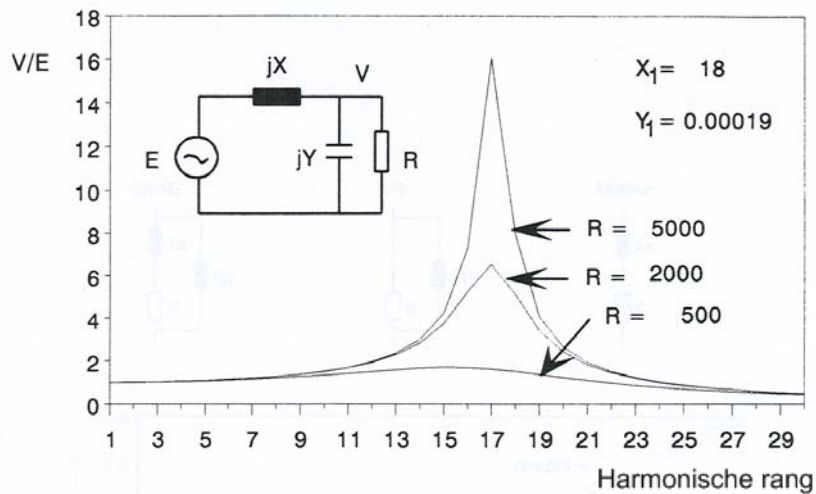
Aansluiten van storende belastingen in laagspanning

- Serieresonantie

In dit geval staat de capaciteit C_2 in serie met de inductantie L van de transformator en er

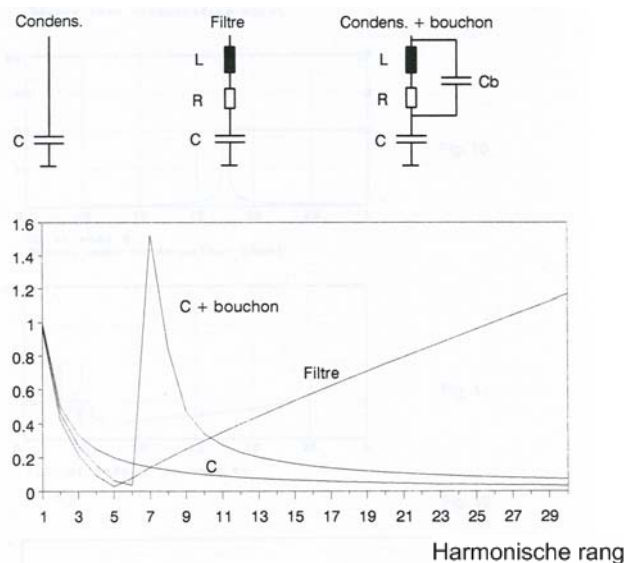
verschijnt een resonantie op de frequentie f waarvoor geldt:
$$h \omega L = \frac{1}{h \omega C_2}$$

Op de resonantiefrequentie wordt de impedantie LC klein en een harmonische spanning op het hoogspanningsnet – hoe klein ook – kan aanleiding geven tot een belangrijke harmonische stroom naar het middenspanningsnet.



Figuur 11: Serieresonantie

Soms worden deze condensatorbatterijen alleen in het net geplaatst, maar soms voegt men er een spoel in serie aan toe (om een bepaalde harmonische te elimineren (opdat deze zich niet meer zou voortplanten) of voegt men een spercircuit in serie toe (opdat een (inter)harmonische – zoals bijvoorbeeld een gecentraliseerd afstandsbedieningssignaal – er niet door zou kunnen).



Figuur 12: condensatorbatterijen

Bijlage 4: Gevoeligheidscurves

