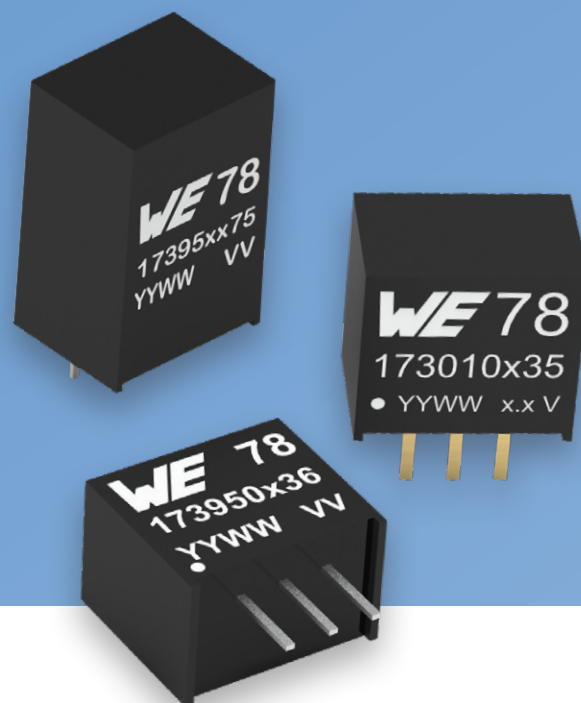


Overspanningsbeveiliging voor veilige werking

transiëntbescherming voor niet-geïsoleerde DC/DC-voedingsmodules



Timur Uludag (Würth Elektronik)

In industriële omgevingen komen veel overspanningspieken voor vanwege de uitgebreide elektrische infrastructuur. Bij het ontwikkelen van een efficiënt filter om die piekspanningen te begrenzen, moet met veel parameters rekening gehouden worden.

Veel industriële toepassingen werken tegenwoordig met logisch niveau-ingangsspanningen zoals 5 V_{DC} of lager (zie **figuur 1**). Zulke toepassingen worden vaak gevoed uit een distributiesysteem met een DC-busspanning van 24 V_{DC}. Vaak wordt gebruik gemaakt van schakelende DC/DC-converteren voor het omzetten van de hogere busspanning naar het lagere spanningsniveau.

In **figuur 1** ziet u de elektrische basisstructuur van een industriële installatie. De verschillende delen van de toepassingen worden gevoed via een gelijkspanningsbus. Ter plaatse wordt elke aparte elektrische belasting via een subnet verbonden met 24 V. Niet-geïsoleerde voedingsmodules leveren de voedingsspanning voor alle subsystemen.

De bron van transiënten

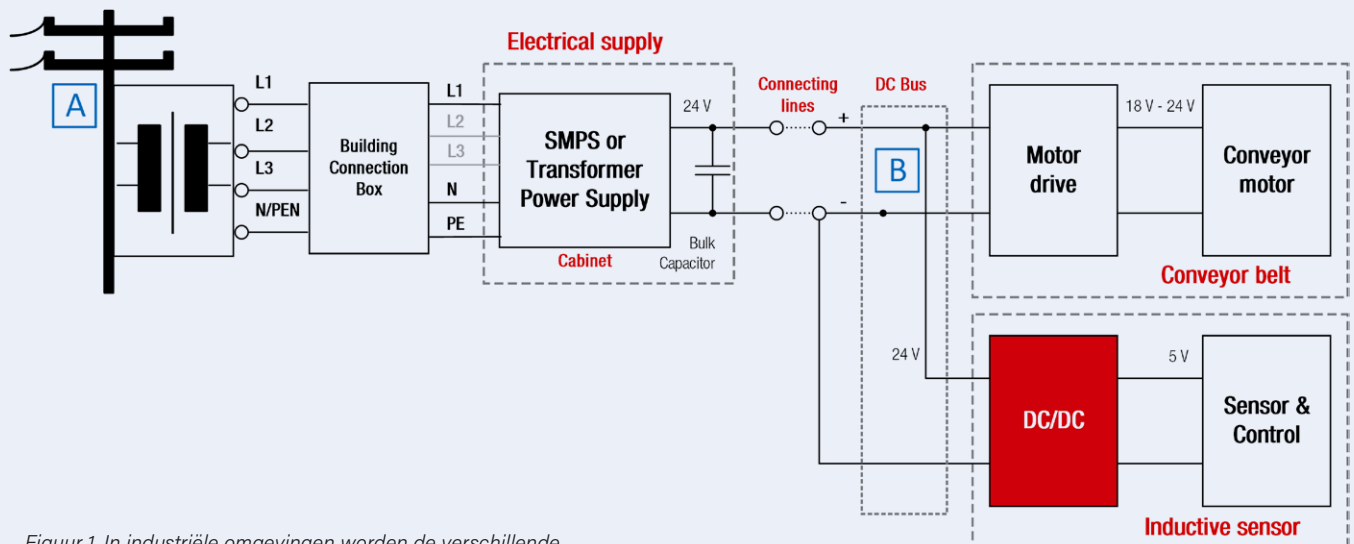
Spanningspieken (transiënten) zijn kortstondige afwijkingen van een nominale spanningswaarde, die het

toelaatbare tolerantiebereik van de nominale spanning in een elektrisch systeem overschrijden. Deze kunnen schade aan het systeem veroorzaken.

Voor een transiënt op een DC-bus kan niet één enkele oorzaak worden aangewezen. Er kan sprake zijn van een indirecte blikseminslag (**figuur 1, bij A**), of het systeem zelf kan de piek hebben veroorzaakt (**figuur 1, bij B**). Normaal gesproken loopt het toegestane spanningsbereik van de 24 V-bus in een industriële omgeving van 19,2 V tot 30 V. Bij transiënte overspanningen moeten we rekening houden met andere effecten. Als de 24V-voedingsslijn bijvoorbeeld parallel aan de besturingslijn van een frequentie-omvormer verloopt, worden de pulsen capacitief gekoppeld en oscilleert de 24 V in het pulspatroon van de omvormer. Onjuiste of ontbrekende bescherming tegen spanningspieken/transiënten leidt tot defecten door schade aan de DC/DC-converter, wat meer systeemstilstand en kosten met zich meebrengt. Voor de juiste berekening en aannames moeten we gebruik maken van een genormaliseerde transiënt, zoals beschreven in de standaard IEC 61000-4-5.

Filterconcept

In **figuur 2** ziet u het hele concept van het beschermingsfilter (groen), dat uit twee filtertrappen bestaat. Eén trap begrenst de hoge transiënte overspanning als die optreedt, dat kan met componenten zoals eenzijdige TVS-diodes (Transient Voltage Suppression).



Figuur 1. In industriële omgevingen worden de verschillende elementen van een installatie typisch gevoed via een DC-bus.

Als tweede trap wordt een passief LC-filter aanbevolen. Dit verzwakt de spanningen die hoger zijn dan de maximale werkspanning van de DC/DC-converter.

Ontwerpeisen

De belangrijkste parameter van een schakelende regelaar die we nodig hebben voor het ontwerp van een transiëntenfilter is de ingangsspanning. Vaak worden twee verschillende waarden gegeven in de datasheet. Eén daarvan is de absolute maximale ingangsspanning. Als die wordt overschreden, leidt dat tot onherstelbare schade aan de voedingsmodule. De andere is de maximale werkspanning, dat is de gespecificeerde maximale ingangsspanning waarvoor de fabrikant de voedingsmodule heeft ontworpen. Voor een transiëntenbeveiliging wordt aanbevolen het beschermingsfilter zó te ontwerpen dat zelfs wanneer een transiënt optreedt, de ingangsspanning van de module nooit de maximale werkspanning overschrijdt. Voor de verdere berekeningen gebruiken we als voorbeeld een voedingsmodule in een SIP-3 behuizing (Würth Elektronik 173010535). Deze heeft een absolute maximale ingangsspanning van $V_{in} = 44 \text{ V}$.

Ontwerp van een beschermingsfilter

In dit artikel gebruiken we een unidirectionele TVS-diode als beschermend element voor de ingang van de voedingsmodule. Het unidirectionele gedrag van deze diode betekent dat de V/I-karakteristiek bijna hetzelfde is als die van een zenerdiode. Daarom wordt de diode normaal gesproken in sperrichting gebruikt. Als de doorslagspanning van de TVS-diode wordt overschreden, gaat hij geleiden. Het spanningsniveau wordt dan bepaald door de stroom door de diode. Het volgende rekenvoorbeeld is een vereenvoudigde handreiking voor het dimensioneren van een filter. Met de verkregen schattingen kunnen we snel verbeteringen aanbrengen bij tests in de praktijk.

Voor een goed filterontwerp op basis van een TVS-diode hebben we de volgende parameters nodig:

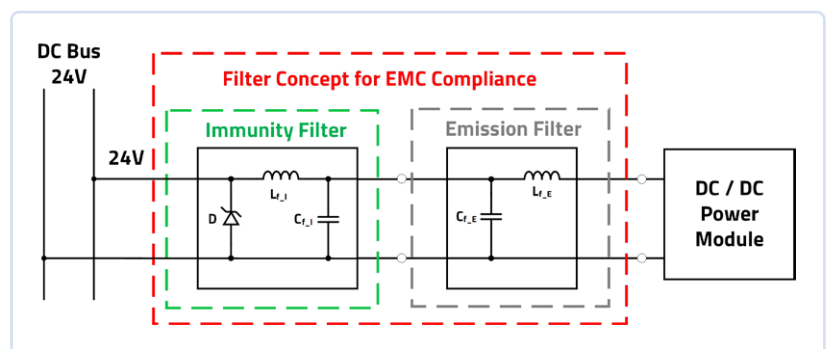
- V_{DC} : voedingsspanning van de voedingsmodule;
- V_{BR} : spanning waarbij 1 mA door de TVS-diode loopt;
- I_{Peak} : maximale piekstroom door de TVS-diode bij $V_{Clamp\ max}$;
- $P_{Diss\ max}$: maximaal toegestane dissipatie in de TVS-diode;
- $V_{Clamp\ max}$: spanning waarbij de diode de maximaal gespecificeerde stroom voert.

Eerste filtertrap

Bepaling van V_{DC}

Voor V_{DC} is de bepalende waarde de maximale DC-busspanning die aanwezig kan zijn, niet de nominale waarde van 24 V voor een 24V-bus. In een industriële omgeving is een 24VDC-bus gespecificeerd als 19,2...30 V. Het maximum is dus $V_{DC} = 30 \text{ V}$. De keuze van de TVS-diode voor de volgende stappen van de berekening is gebaseerd op de verkrijgbare componenten in het productportfolio van Würth Elektronik. In de online-catalogus zien we twee mogelijke kandidaten: de 824541301 en de 824551301 [1].

Figuur 2. Filterconcept voor de EMC-compliance van Mag³C-voedingsmodules met beschermings- en emissiefilter.





Bepaling van V_{BR}

V_{BR} is gedefinieerd als de spanning waarbij een stroom van 1 mA door de TVS-diode loopt. Deze waarde, in dit geval 35,05 V, is in werkelijkheid geen vaste waarde omdat de PN-overgang een tolerantie heeft. Volgens de datasheet bedraagt de tolerantie $\pm 5\%$. We hebben dus te maken met een V_{BR} -band van 33,325 V tot 36,8025 V. In dit gebied gaat de diode geleiden met een stroom van 1 mA.

Maar we moeten ook weten tot welke waarde de transient-spanning moet worden beperkt. Dat is de parameter $V_{Clamp\ max}$.

Bepaling van $V_{Clamp\ max}$

Op deze waarde is te vinden in de datasheet. Voor de gekozen diode bedraagt deze spanning 48,4 V bij een piekstroom I_{Peak} van 31 A, dat is bij een puls van 10/1000 μs .

Tot nu toe hebben we gerekend met een ideale laboratoriumomgeving met een stabiele omgevingstemperatuur van 25 °C. Maar de werkelijkheid ziet er anders uit. Omgevingstemperaturen tot wel 55 °C zijn gebruikelijk voor elektronische componenten zoals een TVS-diode. Daarom moet in de berekening ook een temperatuurfactor worden opgenomen.

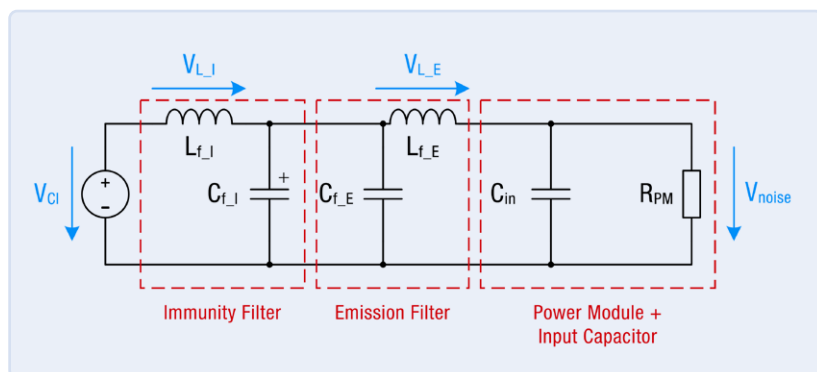
Vooral $V_{Clamp\ max}$ en het piek-pulsvermogen zijn sterk afhankelijk van de temperatuur.

In **vergelijking 1** ziet u welk effect de temperatuur op $V_{Clamp\ max}$ heeft.

$$V_{Clamp\ max}(T_j) = V_{Clamp\ max}(25^\circ C) * (1 + \alpha T * (T_j - 25^\circ C))$$

In de 'standby-situatie' loopt er vrijwel geen stroom door de TVS-diode, afgezien van de lekstroom van 1 μA als de junctietemperatuur (T_j) bijna gelijk is aan de omgevingstemperatuur. Uitgaande van een temperatuurcoëfficiënt αT voor dit type TVS van $9,9 \times 10^{-4}$ per °C, geeft dit een maximale V_{Clamp} van 49,84 V bij 55 °C. Deze waarde wordt nu het uitgangspunt voor de dimensionering van de tweede trap van het filter.

Figuur 3.
Vervangingsschema voor het berekenen van de tweede filtertrap.



Tweede filtertrap

De vraag is nu hoe we de juiste filterverzwakking moeten inschatten en hoe we de beste waarden voor de filtercomponenten kunnen bepalen. We beginnen met de verzwakking: de minimale filterverzwakking kan worden berekend met **vergelijking 2**.

$$G = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{PM_Max}}{V_{Clamp\ max}}\right) \quad G = 20 \cdot \log\left(\frac{44V}{49,84V}\right) = -1,08dB$$

(In plaats van het symbool A (attenuation) wordt in de formule G (gain) gebruikt. Een negatieve versterking (gain) betekent een verzwakking.)

Vergelijking 2 geeft de resulterende spanning $V_{Clamp\ max}$ van de TVS-diode tijdens een spanningspiek en bij de maximale werkspanning V_{PM_Max} van de gekozen converter. We willen een filter ontwerpen zoals in **figuur 3**, waar een LC-filter moet worden toegevoegd aan de TVS-diode. De ontwerper kan een spoel kiezen en de daarbij passende condensatorwaarde uitrekenen. De filterspoel staat namelijk in serie met de toepassing, dus zijn weerstand (R_{DC}) veroorzaakt ongewenste verliezen. We moeten dus kiezen voor een spoel met een zo klein mogelijke R_{DC} -waarde, die geschikt is voor de nominale maximale uitgangsstroom van de DC/DC-converter. Voor dit voorbeeld-filterontwerp is gekozen voor een WE - PD2 (744776112) met een zelfinductie van 12 μH , een R_{DC} van 336 m Ω en een nominale stroom van 2,72 A. De DC-ingangsweerstand van de voedingsmodule kan worden bepaald met de gegeven in- en uitgangsspanning, de uitgangsstroom en de efficiëntie tijdens gebruik. Met deze gegevens kan **vergelijking 3** voor de ingangsweerstand worden uitgewerkt.

$$R_{PM} = \frac{V_{in}^2}{\frac{V_{out} \cdot I_{out}}{\eta}} = \frac{V_{in}^2}{P_{in}} \quad R_{PM} = \frac{(24V)^2}{\frac{5V \cdot 1A}{0,88}} = 101\Omega$$

In figuur 3 ziet u het vervangingsschema, waarin de TVS-diode wordt vertegenwoordigd door een vereenvoudigde spanningsbron tijdens de spanningspieken. De rest van het schema voor het EMC-model bestaat uit twee LC-filters voor transientbescherming en tegen uitstraling (EMI-onderdrukking), de ingangscondensator van de DC/DC-converter en de ingangsweerstand van de regelaar.

Omdat dit een toepassing voor binnenshuis is, is er indirecte inslagkoppeling. De volgende aannames en berekeningen zijn gebaseerd op een 8/20 μs -puls. Voor verdere vereenvoudiging kunnen we C_{f_E} en L_{f_E} weglaten, want dit filter is ontworpen voor het onderdrukken van storingen bij de schakelfrequentie

van de voedingsmodule (**figuur 4**). De voedingsmodule schakelt typisch bij 520 kHz en de piek is hier gebaseerd op 1 kHz. Wanneer we het frequentiespectrum van de puls bekijken, kunnen we zien dat de hoogste waarde van de ruisspanning optreedt bij een frequentie $f = 1$ kHz.

Om de verzwakking G van het filter te bepalen, moeten we de uitgangsspanning vergelijken met de ingangsspanning van het systeem (**vergelijking 4**).

$$\frac{V_{\text{noise}}}{V_{\text{Cl}}} = \frac{1}{Z_{\text{Lf}} + \left(\frac{1}{Y_{\text{Cf}} + Y_{\text{Cin}} + Y_{\text{RPM}}} \right)}$$

$$G = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{V_{\text{noise}}}{V_{\text{Cl}}} \right| \right)$$

$$G_{\text{immunityfilter}} = 20 \cdot \log \left(\left| 1 - \omega^2 L_f (C_f + C_{\text{in}}) + j\omega \frac{L_f}{R_{\text{PM}}} \right| \right)$$

Met de eerder berekende DC-ingangsweerstand $R_{\text{PM in}}$ van de converter, kunnen we **vergelijking 5** gebruiken om de benodigde condensatorwaarde te berekenen:

$$C_f = \frac{1 - \left(10^{\frac{G}{20}} - \left(\omega \frac{L_f}{R_{\text{PM}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\omega^2 \cdot L_f} - (C_{\text{in}} + C_{\text{f_emission}})$$

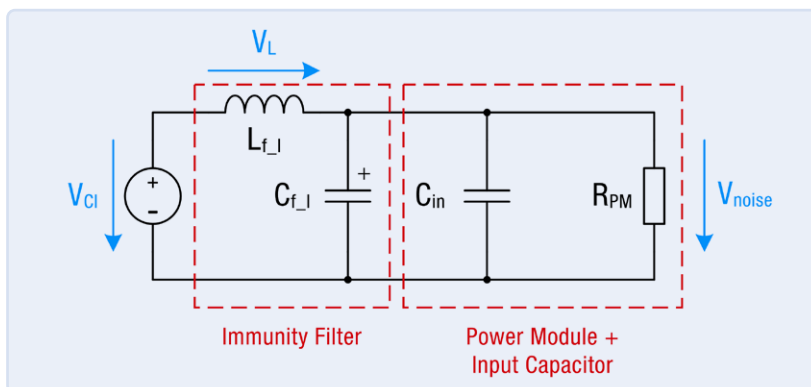
Hier is L_f de filterspoel, R_{PM} de DC-ingangsweerstand van de converter, C_{in} de ingangscondensator en $C_{\text{f_emission}}$ de EMI-filtercondensator van het PI-filter aan de ingang. De waarden zijn te vinden in de datasheet van de voedingsmodule 173010535. Aan het frequentiespectrum van de piek is te zien dat de hoogste waarde van de stoorspanning optreedt bij een frequentie van $f = 1$ kHz. Daarom wordt deze frequentie gebruikt voor de worst-case berekening. Als we uitgaan van een spoel van 12 μH , volgt uit de berekening een condensatorwaarde van $C_{\text{f_i}} = 218 \mu\text{F}$. We kijken naar de standaardwaarden voor condensatoren en komen dan uit op 220 μF (860010775018), omdat die groter is dan de berekende waarde. Een kleinere dan de berekende capaciteit zou niet voldoende verzwakking geven. Zo komen we uit op de volgende componenten (van Würth Elektronik):

TVS diode = 824541301

$L_{\text{f_i}} = 744776112$

$C_{\text{f_i}} = 860010775018$

De invloed van de temperatuur op $V_{\text{Clamp max}}$ en dus op de waarde van de filtercondensator is weergegeven in **tabel 1**.



De condensatorwaarden zijn berekend. Maar een echte condensator heeft last van tolerantie. De capaciteitswaarde kan $\pm 20\%$ variëren. Als de temperatuurafhankelijkheid van $V_{\text{Clamp max}}$ niet volledig wordt meegerekend, kan een condensator met een te lage capaciteitswaarde worden gekozen.

Transiëntbescherming en EMI

Bij het ontwikkelen van een efficiënt filter om spanningstransienten te begrenzen, moet met veel parameters rekening gehouden worden. Dat is vooral belangrijk in een industriële omgeving, omdat daar vaak transiënte overspanningen voorkomen ten gevolge van de uitgebreide elektrische infrastructuur. Het filter met transiëntbescherming maakt een efficiënte bescherming van de DC/DC-converter mogelijk en zorgt meteen voor onderdrukking van hoogfrequente stoorsignalen.

vertaling: Evelien Snel — 230180-03

Figuur 4. Vereenvoudigd vervangingsschema voor het berekenen van de tweede filtertrap.

Tabel 1.

Omgevings-temperatuur	$V_{\text{Clamp max}}$	Waarde filtercondensator
25 °C	48,4 V	178 μF
55 °C	49,84 V	218 μF



Over de auteur

Timur Uludag behaalde zijn Dipl.-Ing. (FH) graad in Mechatronica aan de University of Applied Sciences in Regensburg, Duitsland. Daarna werkte hij jarenlang als hardwareontwerper op het gebied van schakelende voedingen en analoge schakelingen. Sinds 2015 is Timur Senior Technical Marketing Manager bij de Würth Elektronik eiSos Group in de bedrijfseenheid Magl³C Power Modules. Hij is daar gespecialiseerd in de roadmap-planning en het naar de markt brengen van nieuwe voedingsmodules.

WEBLINK

[1] Würth Elektronik datasheets voor TVS-diodes:
<https://we-online.com/en/components/products/WE-TVSP>