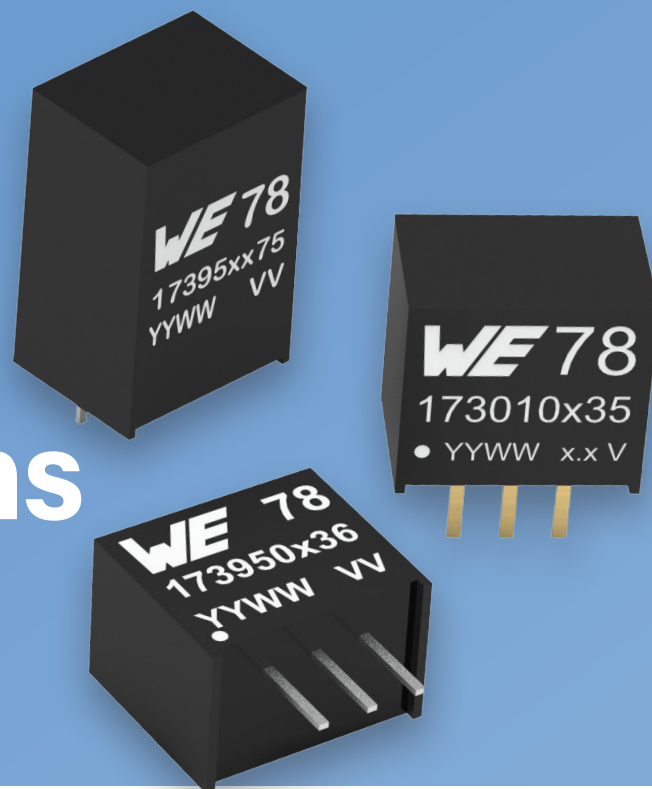


immunité contre les surtensions

protection pour modules
de puissance CC/CC non isolés



Timur Uludag (Würth Elektronik)

De par leur étendue, les infrastructures électriques des environnements industriels provoquent souvent des surtensions transitoires. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte lorsqu'on cherche à mettre au point un filtre efficace contre ces phénomènes.

De nos jours, un grand nombre d'applications industrielles reposent sur des niveaux logiques d'entrée de $5 V_{CC}$ ou moins (**figure 1**). Le système de distribution électrique alimentant ces applications est généralement composé d'un bus de $24 V_{CC}$ et d'un convertisseur CC/CC à découpage pour en abaisser la tension au niveau logique inférieur souhaité.

La **figure 1** schématise la structure électrique d'une usine. Les différentes parties sont alimentées par un bus CC. Chaque charge électrique séparée est connectée à un sous-circuit de distribution de $24 V$. Des modules de puissance non isolés sont implantés pour délivrer la tension de service des sous-systèmes.

Origine des transitoires

Dans le cas d'un système électrique, un transitoire est un bref écart de la tension nominale hors de la plage

de tolérance admissible. Les transitoires ont généralement un effet destructeur.

Sur un bus CC, les transitoires peuvent avoir plusieurs origines. Un pic de tension peut être causé par la foudre (**figure 1, partie A**) ou être produit par le système lui-même (**figure 1, partie B**). En environnement industriel, le bus CC de $24 V$ est typiquement spécifié pour opérer entre $19,2 V$ et $30 V$. Les transitoires peuvent alors prendre différentes formes. Si par exemple la ligne d'alimentation de $24 V$ est installée parallèlement à la ligne de commande d'un variateur de vitesse, les impulsions seront couplées de manière capacitive et la tension de $24 V$ reproduira les schémas d'impulsions du variateur et oscillera en conséquence.

Une protection inadéquate ou inexistante contre les transitoires entraîne en amont des dommages au niveau du convertisseur CC/CC, et en aval des dysfonctionnements. D'où des temps d'arrêt et des coûts de maintenance. Pour être réalistes, les calculs et les hypothèses de travail doivent s'appuyer sur un transitoire normalisé comme celui de la norme IEC 61000-4-5.

Filtre d'immunité

La **figure 2** représente le concept d'un filtre d'immunité (en vert) à deux étages de filtrage. Le premier limite la hauteur d'un transitoire au moyen de composants tels que des diodes d'écroûtage unidirectionnelles.

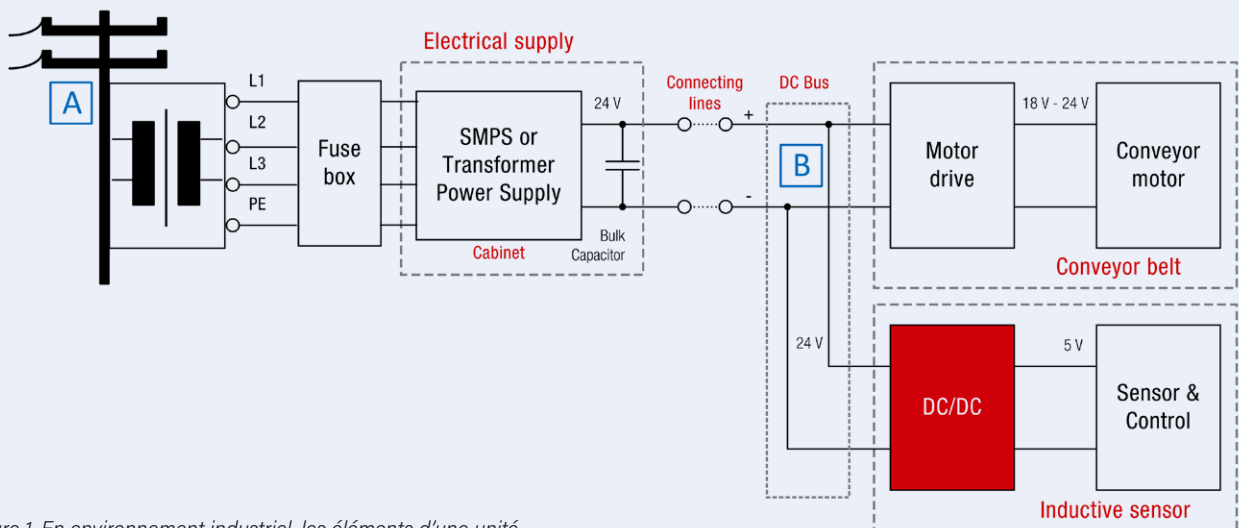


Figure 1. En environnement industriel, les éléments d'une unité de production sont typiquement alimentés par un bus CC.

Le second atténue les tensions excédant la tension de service maximale du convertisseur DC/DC à l'aide d'un filtre LC passif (recommandé).

La valeur critique

La tension d'entrée du régulateur à découpage est le paramètre le plus critique. La fiche technique d'un module de puissance indique en général deux valeurs : sa tension d'entrée maximale absolue, c.-à-d. à ne pas dépasser sous peine de dommages irréversibles, et sa tension de service maximale, c.-à-d. la valeur spécifiée par le fabricant pour l'utilisation du module. Un filtre efficace doit empêcher cette dernière d'être dépassée, même en cas de surtension transitoire. Les calculs qui suivent prennent comme exemple le module de puissance 173010535 Sip-3 dont la tension d'entrée maximale V_{in} vaut 44 V.

Conception d'un filtre d'immunité

Pour cet article, l'entrée du module de puissance est supposée être protégée par une diode d'écroûtage unidirectionnelle. Une telle diode a presque la même caractéristique V-I qu'une diode Zener, autrement dit s'utilise normalement en sens inverse, et devient conductrice lorsque la tension appliquée excède sa tension de claquage. La valeur de la tension limite d'écroûtage (notée ci-après $V_{Clamp\ max}$) est alors déterminée par l'intensité du courant traversant le composant. L'exemple numérique qui suit montre comment estimer les valeurs des composants d'un filtre. Cette modélisation simplifiée permet un cycle d'affinement rapide des valeurs trouvées par essais en conditions réelles.

Nous aurons besoin des paramètres suivants pour protéger efficacement le module de puissance à l'aide d'un filtre reposant sur une diode supprimeuse de transitoires (appelée ci-après diode TVS) :

- V_{DC} : tension d'alimentation du module de puissance
- V_{BR} : tension lorsque 1 mA traverse la diode TVS
- I_{Peak} : courant de pointe max. traversant la diode TVS @ $V_{Clamp\ max}$
- P_{Diss} : puissance dissipée max. autorisée pour la diode TVS
- $V_{Clamp\ max}$: tension lorsque la diode est traversée par le courant max. spécifié.

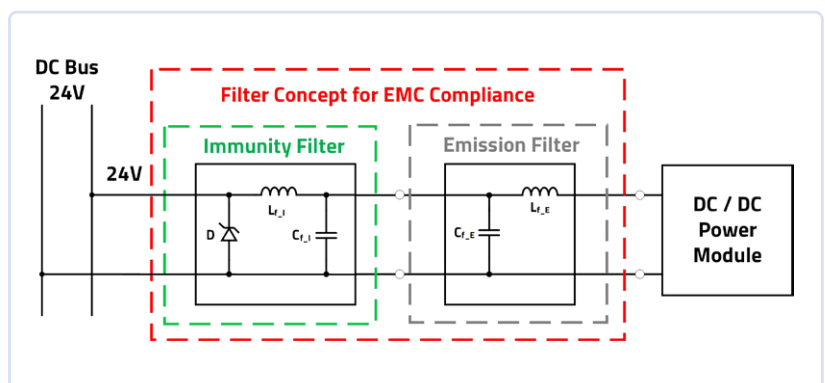
Premier étage du filtre

Détermination de V_{DC}

La valeur déterminant V_{DC} est la tension maximale possible sur le bus CC, pas sa valeur nominale (24 V pour un bus de 24 V). En environnement industriel, un bus de 24 V_{CC} est spécifié pour opérer entre 19,2 et 30 V. La valeur qui nous intéresse est donc $V_{DC} = 30$ V.

La suite des calculs nécessite une diode TVS adaptée à la situation. Le catalogue en ligne de Würth Elektronik [1] fournit deux candidates possibles : les références 824541301 et 824551301.

Figure 2. Concept de filtre (immunité + antiparasites) pour conformité CEM des modules de puissance Mag13C.





Détermination de V_{BR}

V_{BR} représente la tension aux bornes de la diode TVS traversée par un courant de 1 mA. Cette valeur, ici 35,05 V, n'est pas une constante puisque la transition est de type PN et a donc une tolérance – de $\pm 5\%$ d'après la fiche technique. V_{BR} est donc comprise entre 33,325 V et 36,8025 V, intervalle dans lequel la diode est conductrice lorsque le courant vaut 1 mA.

Nous devons ensuite déterminer $V_{Clamp\ max}$, la tension max. d'écrêtage d'un transitoire.

Détermination de $V_{Clamp\ max}$

Cette valeur est elle aussi fournie par la fiche technique. Elle vaut, pour la diode choisie, 48,4 V pour un courant de crête I_{Peak} de 31 A représentant une impulsion de 10/1000 μs .

Les valeurs utilisées sont celles obtenues dans un laboratoire idéal où règne une température constante de 25 °C. La réalité est bien sûr différente, puisqu'en pratique une diode TVS peut être exposée à une température de 55 °C. Les calculs doivent donc inclure un facteur de température.

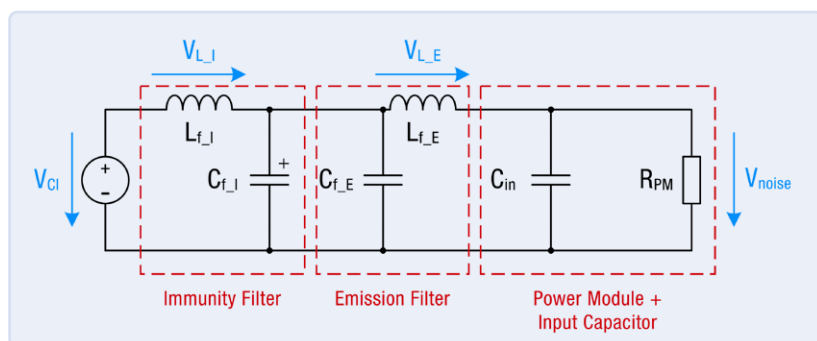
Ce sont $V_{Clamp\ max}$ et la puissance crête qui dépendent le plus fortement de la température.

L'équation 1 montre l'effet de la température sur $V_{Clamp\ max}$.

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

Pour « l'état de veille » durant lequel le seul courant traversant la diode TVS est le courant de fuite de 1 μA , la température de la jonction (T_j) est à peu près égale à la température ambiante. En prenant pour la TVS un coefficient de température αT de $9,9 \times 10^{-4} 1/^\circ C$, on trouve que $V_{Clamp\ max}$ vaut 49,84 V à 55 °C. Cette valeur servira de point de départ pour le dimensionnement du second étage du filtre d'immunité.

Figure 3. Circuit équivalent pour les calculs du second étage du filtre d'immunité.



Second étage du filtre

Il nous faut maintenant estimer l'atténuation du filtre et trouver les meilleures valeurs possibles pour les composants qui le constituent. Commençons par l'atténuation. Sa valeur minimale est donnée par l'équation 2.

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

Notez que nous n'utilisons pas la lettre A (atténuation) mais G (gain). Un gain négatif équivaut à une atténuation.

L'équation prend en compte la valeur d'écrêtage $V_{Clamp\ max}$ de la diode TVS durant un transitoire, ainsi que $V_{PM\ Max}$, la tension maximale de service du convertisseur choisi. L'objectif est de concevoir le circuit de la figure 3 en ajoutant un circuit de filtrage LC à la diode TVS. Tenant compte du calcul donnant la capacité d'un condensateur de filtrage adéquat, le concepteur peut sélectionner la valeur de l'inductance. Comme l'inductance du filtre est en série avec l'application et que sa résistance (R_{DC}) provoque des pertes indésirables, l'inductance sélectionnée doit avoir une valeur R_{DC} la plus faible possible au regard du courant de sortie maximal du convertisseur CC/CC. Pour cet exemple, nous avons choisi l'inductance WE PD2 (744776112) de 12 μH , à courant nominal de 2,72 A et R_{DC} de 336 m Ω . La résistance d'entrée du module de puissance peut être déterminée en combinant les tensions d'entrée et de sortie, le courant de sortie, ainsi que le rendement durant le fonctionnement. Le résultat est donné par l'équation 3.

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

La figure 3 montre le circuit équivalent. La diode TVS attaquée par des pics de tension y est représentée par une source de tension simplifiée. Viennent ensuite un filtre LC d'immunité (contre les transitoires), un filtre LC d'atténuation des parasites, le condensateur d'entrée du convertisseur CC/CC, et la résistance d'entrée du régulateur.

Comme il s'agit d'une application en intérieur et qu'il y a donc surtension par couplage indirect, les hypothèses et calculs suivants sont basés sur une impulsion de 8/20 μs . On peut simplifier encore plus le modèle en omettant C_{f_E} et L_{f_E} puisque ce filtre vise à supprimer les perturbations à la fréquence de

commutation du module de puissance (**figure 4**). Cette fréquence vaut typiquement 520 kHz, et on se base ici sur une valeur de 1 kHz pour la surtension.

Pour déterminer l'atténuation G du filtre, il faut comparer la tension de sortie à celle d'entrée du système (**équation 4**).

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

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

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

La résistance d'entrée du convertisseur calculée plus haut (R_{PM} , **équation 3**) permet de déterminer la capacité du condensateur nécessaire :

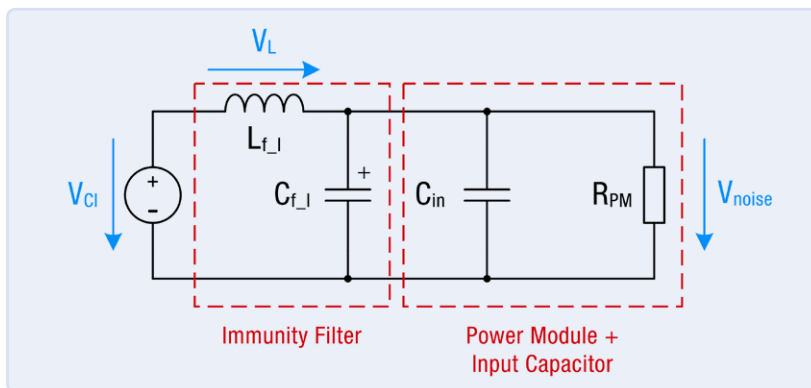
$$C_f = \frac{1 - \left(10^{\frac{G}{20}} - \left(\omega \frac{L_f}{R_{\text{PM}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\omega^2 \cdot L_f} - (C_{\text{in}} + C_{\text{f_emission}})$$

L_f représente l'inductance du filtre d'immunité, R_{PM} la résistance d'entrée CC du convertisseur, C_{in} la capacité du condensateur d'entrée, et $C_{\text{f_emission}}$ la capacité du condensateur d'entrée antiparasite d'un filtre d'entrée en Pi. Les valeurs sont fournies par la fiche technique du module 173010535. L'examen du spectre de fréquence d'une surtension montre que la valeur la plus élevée de la tension de bruit se produit à $f = 1$ kHz. Cette valeur est donc utilisée pour le calcul du pire scénario. Avec une inductance de 12 μH , le calcul pour le condensateur du filtre donne $C_{\text{f_i}} = 218 \mu\text{F}$. Le condensateur choisi serait donc un 220 μF (860010775018) puisqu'il s'agit du plus proche à être supérieur à 218 μF . Un condensateur de capacité plus basse n'offrirait pas assez d'atténuation. Au final, les composants du filtre seraient les suivants (références Würth Elektronik) :

Diode TVS = 824541301, $L_{\text{f_i}} = 744776112$, $C_{\text{f_i}} = 860010775018$

Le **tableau 1** indique l'influence de la température sur $V_{\text{Clamp max}}$, et donc sur la capacité du condensateur de filtrage.

Les capacités ont été obtenues par calcul, mais celle des condensateurs réels sont affectées d'une tolérance



pouvant aller jusqu'à ± 20 %. Si la dépendance en température de $V_{\text{Clamp max}}$ n'est pas prise en compte, le condensateur sélectionné peut avoir une capacité trop faible.

Transitoires et interférences

Plusieurs paramètres sont à prendre en considération lorsqu'on cherche à concevoir un filtre efficace contre les surtensions transitoires. Ces filtres jouent un rôle crucial dans les environnements industriels où l'infrastructure électrique provoque souvent des pics de tension. Ils protègent efficacement les convertisseurs CC/CC tout en amortissant les rayonnements de haute fréquence.

VF : Hervé Moreau — 230180-04

Figure 4. Circuit équivalent simplifié pour les calculs du second étage du filtre d'immunité.

Tableau 1.

Température ambiante	$V_{\text{Clamp max}}$	Condensateur de filtrage
25 °C	48,4 V	178 μF
55 °C	49,84 V	218 μF



À propos de l'auteur

Timur Uludag a obtenu son diplôme d'ingénieur en mécanique à l'université des sciences appliquées de Regensburg, Allemagne. Il a travaillé plusieurs années dans le domaine des alimentations à découpage et de la conception de circuits analogiques. Depuis 2015, Timur est responsable du marketing technique des modules de puissance Magl³C au sein de la division eiSos du groupe Würth Elektronik. Il a notamment en charge le calendrier du lancement commercial des nouveaux modules de puissance.

LIENS

[1] Fiches techniques des diodes TVS de Würth Elektronik : <https://we-online.com/en/components/products/WE-TVSP>