

Les fiches techniques

48

Les protections des semi-conducteurs Les protections des semi-conducteurs



48 Protections des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs de puissance possèdent une faible capacité thermique. Leur sensibilité lors de court-circuit important impose l'utilisation de système de coupure ultra-rapide. Les systèmes de protection sont généralement des éléments fusibles. L'augmentation rapide de la tension aux bornes de ceux-ci peut nuire à la durée de vie du composant, des circuits d'amortissement peuvent être utilisés de même que des diodes type Transil.

48.1 Protection par éléments fusibles

Les éléments fusibles, appelés couramment fusibles, doivent être choisis pour satisfaire à deux fonctionnements différents :

Fonctionnement en utilisation normale de l'élément ou du système à protéger :

Le fusible doit pouvoir supporter le courant nominal ainsi que les surcharges admissibles par le système.

Fonctionnement lors de l'apparition d'un défaut :

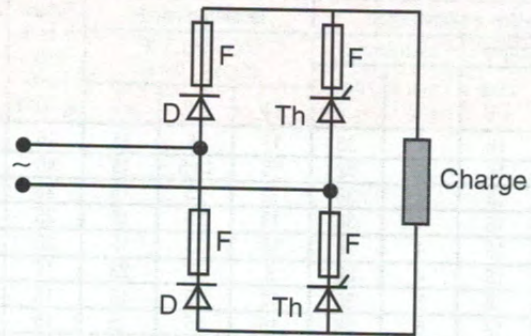
Le fusible doit, par son action, interrompre rapidement la circulation du courant de défaut sans que la contrainte thermique du ou des éléments semi-conducteurs à protéger ne soit atteinte. Cette contrainte thermique est couramment appelée le I^2t . D'autre part, le fusible doit pouvoir, après son fonctionnement, supporter à ses bornes la tension maximale imposée après le montage. Dans les montages possédant des transistors, le fusible inséré dans le circuit ne permet pas la protection du composant. Par contre, il permet d'éviter l'explosion du boîtier et la destruction des circuits annexes.

48.1.1 Protection totale

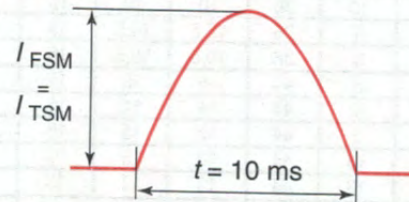
La protection dite totale s'adresse aux systèmes de faible et moyenne puissance. Le nombre de semi-conducteurs montés en parallèle est limité. Les fusibles protègent un seul élément quelle que soit l'origine du défaut.

Le fusible protège l'élément contre la montée en température de la jonction imposée par le courant de défaut. Les constructeurs fournissent l'indication soit du I^2t du composant pour une durée de 10 ms, soit la valeur du courant direct de pointe accidentel à l'état passant I_{FSM} pour une diode ou I_{TSM} pour un thyristor pour une durée de 10 ms.

PONT MONOPHASÉ AVEC PROTECTION TOTALE



DÉFINITION DU I_{FSM} OU I_{TSM}



Connaissant la valeur de I_{FSM} ou I_{TSM} , la contrainte thermique I^2t du composant est définie par :

$$I^2t_{(10\text{ ms})} = \frac{I_{FSM(10\text{ ms})}^2}{2} \times 1.10^{-2}$$

Le fusible doit posséder une contrainte thermique I^2t inférieure à celle de l'élément protégé pour une même durée.

$$I^2t_{\text{Fusible}} < I^2t_{\text{Semi-conducteur}}$$

EXEMPLE :

Un pont monophasé est composé de diodes 1N1196 et de thyristors BTW68600. Les fusibles pour une protection totale devront posséder des I^2t inférieurs à ceux des semi-conducteurs.

Le choix se fera en fonction de la tension maximale obtenue aux bornes du fusible lors du fonctionnement de celui-ci, de l'intensité du courant efficace maximal et avec un I^2t inférieur à celui du composant à protéger.

La diode 1N1196 possède un I_{FSM} de 400 A pour 10 ms ce qui donne un I^2t de 800 A².s.

Le thyristor BTW68600 possède un I^2t de 800 A².s en boîtier TOP3 et de 545 A².s en boîtier T048.

48 ■ 12 Protection interne

La protection dite interne s'adresse aux systèmes de forte puissance possédant des branches formées de trois semi-conducteurs ou plus, montés en parallèle. Cette protection exige la mise en place de dispositifs de coupure réenclenchables de type disjoncteur qui assureront la protection des éléments semi-conducteurs lors d'un défaut au niveau de la charge (court-circuit, surcharge).

Les fusibles insérés dans le système protègent contre les défauts provenant de la destruction d'un semi-conducteur (surtension, $dv/3dt$ trop grand, etc.) ou de la non-extinction d'un thyristor mais ils ne doivent pas fonctionner lors d'un défaut externe.

La fonction des fusibles est d'autoriser la continuité de fonctionnement du système et d'assurer la non-explosion du boîtier (claquage de la jonction) ou la sauvegarde (défaut d'extinction) du composant défaillant.

Pour assurer une bonne protection des semi-conducteurs, il faut obligatoirement que le fusible monté en série avec l'élément défaillant possède les caractéristiques suivantes :

$$I^2t_{\text{Fusible}} < I^2t_{\text{Semi-conducteur}}$$

$$I^2t_{\text{Fusible}} < n^2 \times I^2t_{\text{Semi-conducteur}}$$

avec n : nombre de semi-conducteurs montés en parallèle dans une branche du pont.

Le I^2t du semi-conducteur est donné par les constructeurs (voir chapitres 37.5 ; 39.4 ; 40.6).

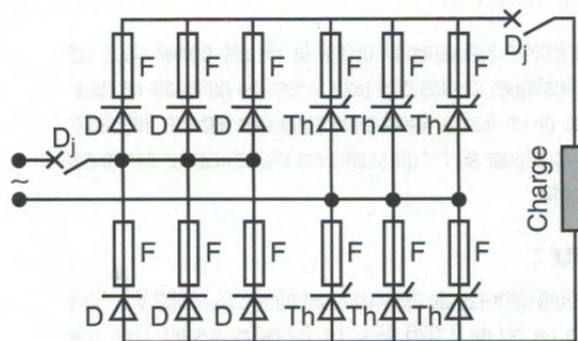
48 ■ 13 Association de fusibles

Dans certaines applications, il peut être possible de protéger un semi-conducteur par des fusibles montés en parallèle. Pour réaliser correctement la protection, il faut s'assurer que les fusibles possèdent la même résistance.

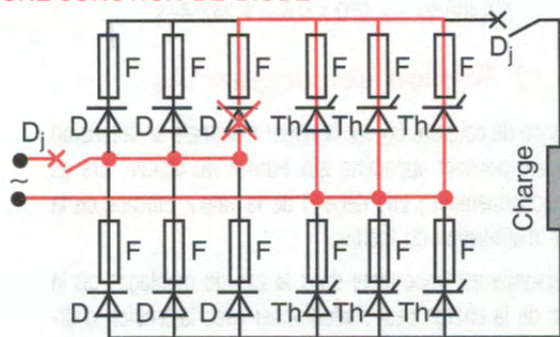
Dans ce cas précis, le I^2t résultant de la mise en parallèle de n fusibles est égal à :

$$I^2t_{\text{résultant}} = n^2 \times I^2t_{\text{Fusible}}$$

PONT MONOPHASÉ AVEC PROTECTION INTERNE



DÉFAUT LORS D'UN CLAQUAGE D'UNE JONCTION DE DIODE



EXEMPLE :

Le pont redresseur ci-dessus est composé de :

- 6 diodes 1N1190 (voir chapitre 37.5) : $I_{FAV} = 40 \text{ A}$, $V_{RRM} = 600 \text{ V}$, $I_{FSM} = 700 \text{ A}_{(t=10 \text{ ms})}$.

D'où :

$$I^2t = \frac{700^2}{2} \times 10^{-2} = 2450 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$$

- 6 thyristors BTW50600 : $I_{TAV} = 40 \text{ A}$, $V_{RRM} = 600 \text{ V}$, $I^2t = 4150 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$.

Le fusible devra donc posséder un I^2t inférieur à $2450 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ pour protéger la jonction de la diode. Ce I^2t du fusible devra aussi être inférieur à 9 fois le I^2t d'un thyristor afin de protéger ceux-ci dans le cas du claquage de la diode.

EXEMPLE :

Un fusible possède un I^2t de $400 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$. Lors de l'association de 3 fusibles en parallèle, le I^2t résultant est de $32 \times 400 = 3600 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$.

48 ■ 14 Évolution du I^2t en fonction de la tension

Le paramètre fondamental qu'est le I^2t est donné dans les caractéristiques des fusibles pour la tension nominale de ceux-ci. Dès qu'un fusible fonctionne sous une tension différente, il faut appliquer au I^2t un coefficient multiplicateur donné par un graphe.

EXEMPLE :

Un fusible ultra-rapide de tension nominale $U_N = 600$ V, calibre 50 A a un I^2t de 2 070 A².s. Le I^2t de ce fusible pour une tension de 400 V est de :

$$I^2t(400 \text{ V}) = I^2t(U_N) \times K(400 \text{ V})$$

Le nouveau I^2t est donc de :

$$I^2t(400 \text{ V}) = 2\,070 \times 0,6 = 1\,242 \text{ A}^2.\text{s.}$$

48 ■ 15 Tension de coupure U_m

La tension de coupure U_m est la valeur maximale de la tension crête d'arc pouvant apparaître aux bornes du fusible lors de son fonctionnement ; elle dépend de la valeur efficace de la tension d'utilisation du fusible.

Cette donnée est importante dans le cas de montages où la tension de la charge peut s'ajouter avec la tension d'alimentation.

48 ■ 16 Protection en courant continu

Pour beaucoup d'applications (alimentation de moteur à courant continu, hacheur, onduleur, batterie), il est possible d'insérer un fusible dans le circuit continu.

Le choix de celui-ci dépend de la constante de temps du circuit. La connaissance de cette valeur permettra le meilleur choix (I^2t , courant crête, tension de coupure, tension nominale) et donc la meilleure protection du système.

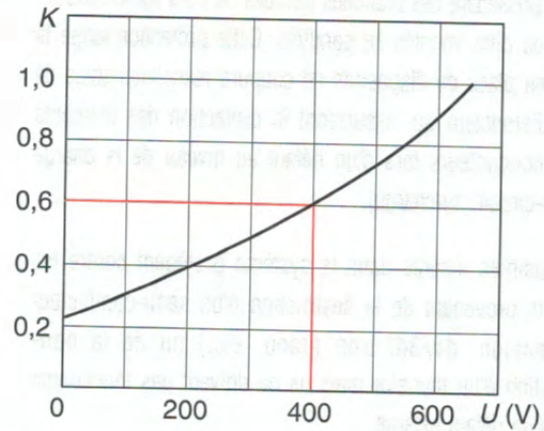
Les caractéristiques des fusibles sont données pour une certaine valeur de la constante de temps du circuit à protéger. Si celle du circuit diffère, un graphe permet de connaître la tension maximale d'utilisation du fusible en fonction de la constante de temps du circuit en défaut.

EXEMPLE :

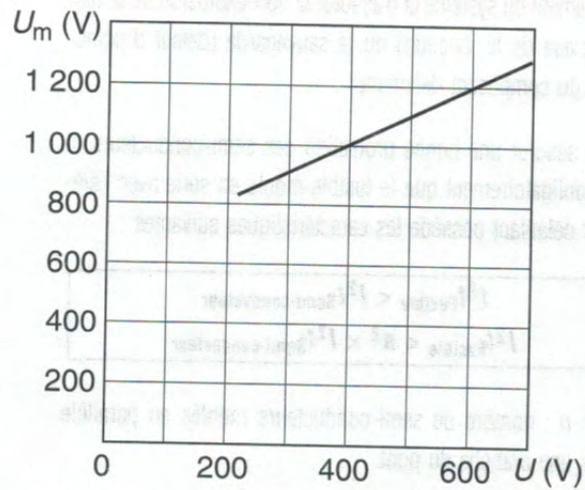
Un fusible de calibre 32 A a une tension nominale de 660 V pour une constante de temps de 15 ms.

Un circuit alimenté sous 600 V a une constante de temps de 50 ms, la tension maximale d'utilisation du fusible est d'environ 520 V, il faut donc utiliser un fusible ayant une tension nominale de 1 000 V.

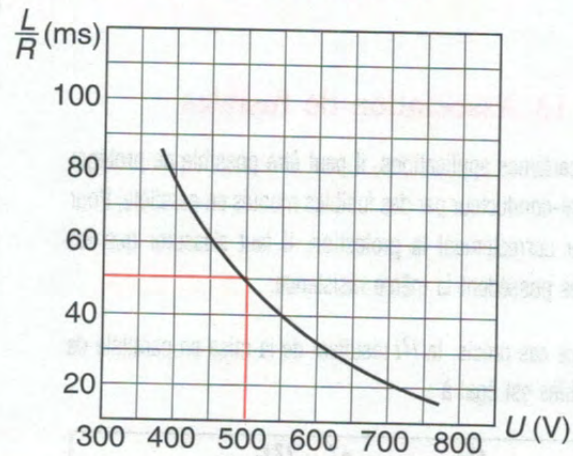
COEFFICIENT MULTIPLICATEUR K EN FONCTION DE LA TENSION D'ALIMENTATION U POUR UN FUSIBLE DE TENSION NOMINALE $U_N = 660$ V



TENSION DE COUPURE U_m EN FONCTION DE U



TENSION NOMINALE EN FONCTION DE LA CONSTANTE DE TEMPS DU CIRCUIT



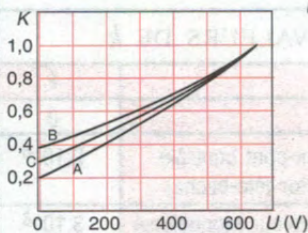
48 ■ 17

PRINCIPAUX FUSIBLES

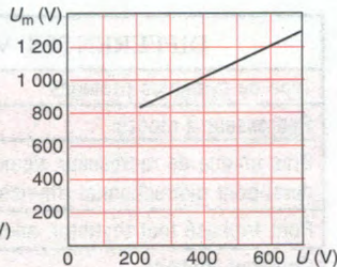
Le repérage d'un fusible dans les tableaux s'effectue suivant la taille de la cartouche ; celle-ci impose le pouvoir de coupure nominal (ce dernier devant être plus élevé que le courant présumé de court-circuit), la cartouche pourra être munie ou non d'un percuteur permettant d'actionner un micro-contact pour la signalisation d'un défaut dans le circuit de commande.

Fusible 660 V URGA, URGB avec ou sans percuteur Pouvoir de coupure 200 kA							Fusible pour circuit continu 660 V RB avec percuteur					
Taille D x L (mm)	Calibre (A)	I^2t à U_N (A ² .s)		Pertes (W)		Code	Taille D x L (mm)	Calibre (A)	Pouvoir de coupure	Pertes (W)		Code
		1	2	I_N	$0,8 I_N$					I_N	$0,8 I_N$	
14 x 51	8	20	17	2,7	1,45	URGB 14,51 8	14 x 51	8	50 kA L/R = 15 ms	2,0	1,2	RB 27.60 8
	10	37	30	3,4	1,85	URGB 14.51 10		2,3		1,3	RB 27.60 10	
	16	95	75	6,2	3,4	URGB 14.51 16		3,3		1,9	RB 27.60 16	
	20	175	145	7,4	4	URGB 14.51 20		4,1		2,4	RB 27.60 20	
	25	300	250	8,6	4,65	URGB 14.51 25		4,7		2,8	RB 27.60 25	
	32	550	460	10,6	5,7	URGB 14.51 32		6,0		3,5	RB 27.60 32	
	40	1 150	940	11,5	6,2	URGB 14.51 40						
	50	2 550	2 070	13	7	URGB 14.51 50						
22 x 58	25		210	8,5	4,7	URGA 22.58 25	Constante de temps L / R en fonction de U					
	32		400	10,3	5,7	URGA 22.58 32	Fusible RB pour $U_N = 660$ V			Fusible RB et RC pour $U_N = 1 000$ V		
	40		700	12,8	7,1	URGA 22.58 40	Calibres de 8 à 20 A courbe A			courbe C		
	50		1270	15,7	8,7	URGA 22.58 50	Calibres de 25 à 50 A courbe B					
	63		2770	17,7	9,8	URGA 22.58 63	Tension de coupure (U_m) en fonction de U					
Coefficient correcteur K du I^2t							Fusible RB pour $U_N = 660$ V			Fusible RB et RC pour $U_N = 1 000$ V		
Repère	14 x 51			22 x 58			L / R = 60 ms courbe A			L / R = 50 ms courbe C		
1	Courbe A pour $I_p \leq 30 I_N$			Courbe B pour $I_p \leq 50 I_N$			L / R = 30 ms courbe B			L / R = 25 ms courbe D		
2	Courbe A pour $I_p > 30 I_N$			Courbe C pour $I_p > 50 I_N$						L / R = 15 ms courbe E		

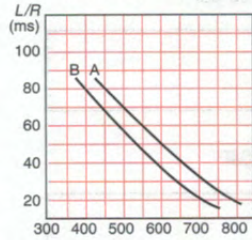
Graphes $K = f(U)$



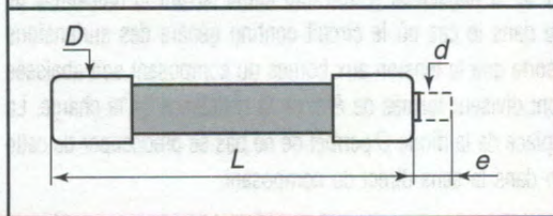
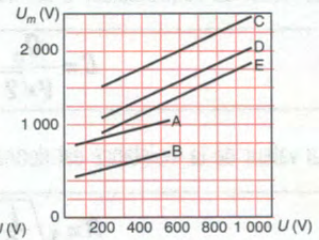
Graphes $U_m = f(U)$



Graphes L / R = f(U) pour $U_N = 660$ V



Graphes $U_m = f(U)$ pour $U_N = 660$ V



Dimensions de la cartouche (en mm)

Taille	D	L	d	e
14 x 51	14,3	51	5	7
22 x 58	22,2	58	5	7
27 x 60	27	60,3	5	7
20 x 127	20,6	127	5	7

D'après Ferraz.

48.2 Protection par circuits écrêteurs

La fonction des circuits écrêteurs est de limiter les surtensions et les dV/dt aux bornes d'une diode ou d'un thyristor. Les circuits couramment utilisés sont composés d'un condensateur C et d'une résistance R .

Les fonctions de ces circuits sont :

- l'amortissement des surtensions lors des commutations engendrées par les inductances du circuit alternatif lors du blocage ;
- l'amortissement des surtensions superposées à la tension du réseau (foudre, ouverture du circuit primaire d'un transformateur, etc.) ;
- la limitation des dV/dt (enclenchement d'un contacteur côté alternatif).

La résistance R a pour objet d'amortir le circuit formé par les inductances de fuites et les capacités. De plus, lorsque le thyristor devient conducteur, elle limite le courant de décharge du condensateur. Dans certains cas, une inductance de faible valeur est insérée dans ce circuit pour diminuer les dI/dt produits lors de la décharge de C . Afin d'améliorer le rôle du condensateur C , une diode rapide est insérée en parallèle sur la résistance R afin de permettre au condensateur de réaliser un court-circuit de courte durée lorsqu'un potentiel positif atteint l'anode du semi-conducteur permettant ainsi une diminution des dV/dt .

Calcul des éléments du circuit R.C

La valeur du condensateur C est donnée par :

$$C = \frac{Q_{rr}}{V\sqrt{2}}$$

La valeur de la résistance est donnée par :

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

La puissance de la résistance est donnée par :

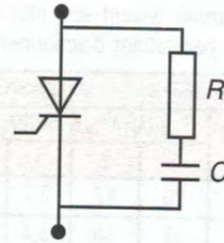
$$P_R = \sqrt{2} \cdot V \cdot Q_{rr} \cdot f + k \cdot C \cdot V^2 \cdot f$$

Des valeurs courantes de ces deux éléments sont données par les constructeurs :

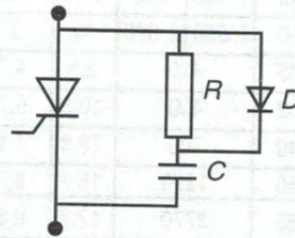
$$0,47 \mu F < C < 1 \mu F$$

$$10 \Omega < R < 30 \Omega$$

CIRCUIT DE PROTECTION RC ASSOCIÉ À UN THYRISTOR



CIRCUIT DE PROTECTION RCD ASSOCIÉ À UN THYRISTOR



Avec :

C : valeur trouvée en μF ,

Q_{rr} : charge recouvrée du composant protégé en μC ,

V : valeur efficace de la tension d'alimentation en V ,

R : valeur trouvée en Ω ,

L : valeur de l'inductance du circuit en μH ,

f : fréquence de fonctionnement.

DIFFÉRENTES VALEURS DE k

Type de systèmes protégés	k
Redresseur à diodes	0
Bras unique de redresseur, demi-pont contrôlé, demi-pont bidirectionnel (thyristor tête-bêche)	$2 \cdot 10^{-6}$
Pont triphasé tout thyristor, onduleur monophasé	$3 \cdot 10^{-6}$
Onduleur triphasé	$4 \cdot 10^{-6}$

La valeur de la résistance R doit être faible devant la résistance de la charge dans le cas où le circuit continu génère des surtensions de telle sorte que la tension aux bornes du composant soit abaissée par le pont diviseur formée de R et de la résistance de la charge. La mise en place de la diode D permet de ne pas se préoccuper de cette condition dans le sens direct du composant.

Valeur minimale du condensateur

Afin de protéger au mieux le composant, il est important d'éviter que celui-ci ne subisse des croissances de la tension trop importante par rapport au temps. Les calculs ci-contre permettent de trouver les valeurs minimales de C et R.

La protection des triacs s'effectue de la même manière que pour les diodes et thyristors en reprenant les calculs précédents.

48.3 Protection par diode Transil

La diode Transil est un semi-conducteur à avalanche permettant de limiter en amplitude les surtensions et prévu pour dissiper une énergie importante.

Caractéristique principale : I = F (V)

V_{RM} : tension de veille, c'est la valeur de la tension sous laquelle peut fonctionner en permanence la diode Transil.

I_{RM} : courant de fuite de la diode (quelques microampères).

V_{BR} : tension inverse d'avalanche.

I_R : courant lors du processus d'avalanche en (quelques milliampères).

V_{CLmax} : tension d'écrêtage qui est spécifiée suivant une impulsion normalisée de courant crête de valeur I_{pp} (voir graphe).

Les temps t₁ et t₂ sont représentatifs de deux ondes :

Type d'onde	t ₁ (µs)	t ₂ (µs)
8/20	8	20
10/1 000	10	1 000

Énergie dissipée par la Transil en régime non répétitif

La diode Transil peut dissiper la même énergie quelle que soit la durée du défaut, cette énergie s'exprime :

$$W = \int_0^t V_{CL} I dt$$

Puissance maximale dissipable pour une onde 10/1 000 µs :

$$P_p = V_{CL} \cdot I_{PP}$$

Calcul de C_{min} :

$$C_{min} = \frac{I \cdot (V + 500)}{5000 \cdot \left(\frac{dV}{dt}\right)^2}$$

Calcul de R :

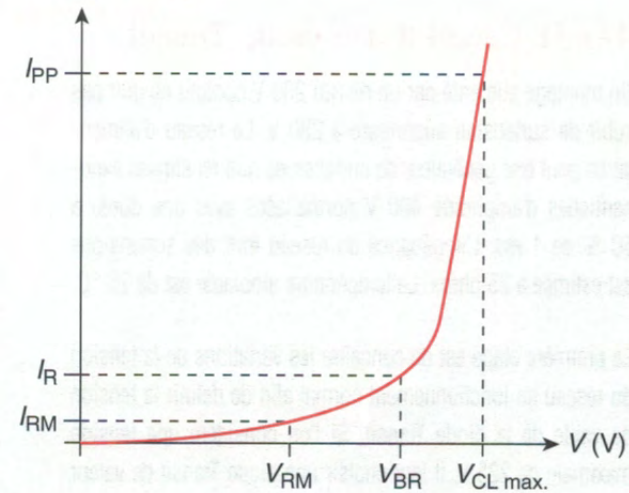
$$R = \frac{300}{C \cdot \frac{dV}{dt}}$$

Puissance dissipée par la résistance :

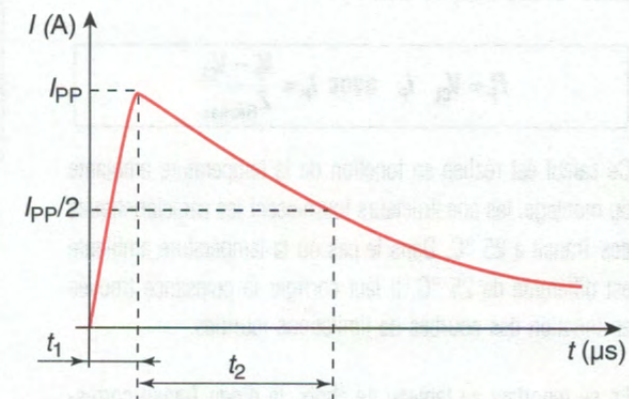
$$P_R = k \cdot C \cdot V^2 \cdot f$$

Pour les valeurs de k, voir tableau précédent.

COURBE I = f (V)



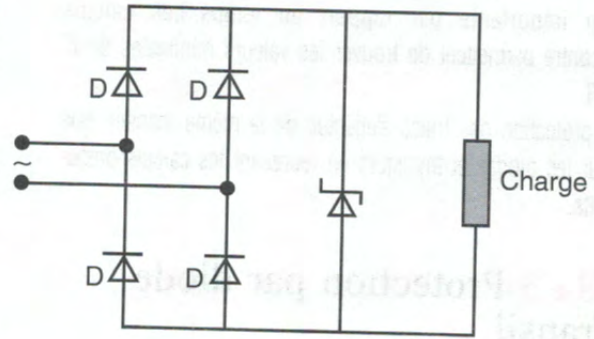
Impulsion normalisée (la valeur V_{CL} est donnée par les constructeurs pour la valeur de crête I_{pp}).



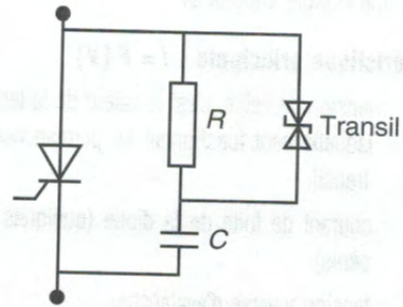
Dans un montage redresseur alimentant une charge, il est possible de protéger les semi-conducteurs en utilisant une diode Transil. De par sa place, celle-ci protège les diodes des surtensions générées soit par le réseau d'alimentation, soit par la charge.

Dans les alimentations incorporant des thyristors ou triacs, des diodes Transil peuvent être montées en parallèle sur chacun des semi-conducteurs. Dans ce cas, la diode interdit les amorçages intempestifs des composants causés par les surtensions. Un circuit $R.C$ devra néanmoins être utilisé pour limiter les dV/dt . Dans ce type de protection, des diodes Transil bidirectionnelles sont à utiliser.

PROTECTION DU PONT REDRESSEUR PAR UNE DIODE TRANSIL



PROTECTION DES THYRISTORS OU TRIACS



48 ■ 31 Calcul d'une diode Transil

Un montage alimenté par un réseau 200 V continu ne doit pas subir de surtension supérieure à 280 V. Le réseau d'alimentation peut être générateur de surtensions non répétitives exponentielles d'amplitude 400 V normalisées avec une durée à 50 % de 1 ms. L'impédance du réseau lors des surtensions est estimée à 25 ohms. La température ambiante est de 25 °C.

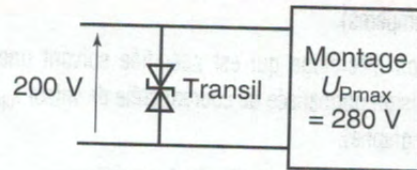
La première étape est de connaître les variations de la tension du réseau en fonctionnement normal afin de définir la tension de veille de la diode Transil. Si l'on considère une tension maximale de 225 V, il faut choisir une diode Transil de valeur supérieure à 225 V pour la tension de veille et inférieure à 280 V pour la tension d'écrêtage.

Calcul de la puissance crête P_p :

$$P_p = V_{CL} \cdot I_p \quad \text{avec} \quad I_p = \frac{V_p - V_{CL}}{Z_{\text{Réseau}}}$$

Ce calcul est réalisé en fonction de la température ambiante du montage, les constructeurs fournissent les caractéristiques des Transil à 25 °C. Dans le cas où la température ambiante est différente de 25 °C, il faut corriger la puissance trouvée en fonction des courbes de limitations fournies.

En se reportant au tableau de choix, la diode Transil correspondant aux contraintes a pour référence : 1.5KE200P.



$$I_p = \frac{400 - 280}{25} = 4,8 \text{ A}$$

et

$$P_p = 280 \times 4,8 = 1344 \text{ W}$$

La diode Transil à choisir doit donc posséder les caractéristiques suivantes :

$$V_{RM} \geq 225 \text{ V}, \quad V_{CL} \leq 280 \text{ V} \quad \text{avec} \quad I_p = 4,8 \text{ A} \quad \text{et} \quad P_p(25 \text{ °C}) = 1344 \text{ W.}$$

Transil 1.5KE200P :

$$P_p = 1500 \text{ W}, \quad V_{RM} = 171 \text{ V}, \quad V_{CLmax} = 247 \text{ V} \quad \text{à} \quad I_p = 5,5 \text{ A} \quad \text{et} \quad V_{BR} = 200 \text{ V.}$$

48 ■ 4

PRINCIPALES DIODES TRANSIL

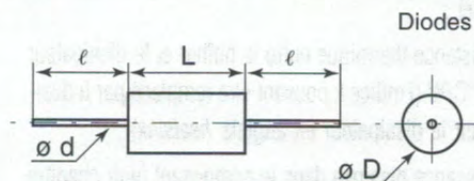
Diodes Transil

Type		V _{RM} (V)	V _{BR} (V)			I _r (mA)	V _{CL} à I _{PP}		Boîtier
Unidirectionnel	Bidirectionnel		min	nominal	max		(V)	(A)	
400 W/1 ms exponentiel I _{FSM} = 50 A 10 ms									
BZW04P10	BZW04P10B	10,2	11,4	12	13,2	1	16,7	24	F126
BZW04-64	BZW04-64B	64,1	71,3	75	78,8	1	103	3,9	
BZW04P145	BZW04P145B	145	161	170	187	1	234	1,7	
BZW04P239	BZW04P239B	239	266	280	308	1	384	1,5	
600 W/1 ms exponentiel I _{FSM} = 100 A 10 ms									
P6KE10P	P6KE10CP	8,55	9,5	10	11	1	14,5	41	CB117
P6KE15P	P6KE15CP	43,6	48,5	51	56,1	1	70,1	8,6	
P6KE100P	P6KE100CP	85,5	95	100	110	1	137	4,4	
1,5 kW / 1 ms exponentiel I _{FSM} = 250 A 10 ms									
1,5KE10A	1,5KE10CA	8,55	9,5	10	10,5	1	14,5	103	CB429
1,5KE51A	1,5KE51CA	43,6	48,5	51	53,6	1	70,1	21,4	
1,5KE100A	1,5KE100CA	85,5	95	100	110	1	137	11	
1,5KE200A	1,5KE200CA	171	190	200	220	1	274	5,5	
1,5KE350A	1,5KE350CA	299	332	350	385	1	482	4	
1,5KE440A	1,5KE440CA	376	418	440	484	1	603	3,5	
5 kW / 1 ms exponentiel I _{FSM} = 500 A 10 ms									
BZW50-10	BZW50-10B	10	11,1	12,4	13,6	1	18,8	266	AG
BZW500-56	BZW500-56B	56	62,2	69,1	76	1	99,6	50	
BZW50-100	BZW50-100B	100	111	123,5	136	1	179	28	
BZW50-180	BZW50-180B	180	200	222	244	1	322	16	
Réseaux de Transil pour bus de données 250 W/1 ms exponentiel									
TH6P04T6V5CL		6	6,5	—	—	1	12	40	DIP 20
TH6P04T25CL		24	25	—	—	1	38	40	

48 ■ 5

BOÎTIERS USUELS

Référence	ℓ mm	L mm	Ø d mm	Ø D mm
FI 26	26	6,3	0,8	3,0
CB 17	25,4	8,9	1,1	3,7
CB 429	26	9,8	1,0	5,0
AG	20	9,0	1,4	8,0
DIP 20	8,13	27,9	—	—



Les diodes Transil peuvent être utilisées comme diodes de redressement en conduction directe. Les données spécifiques I_{FSM} et les caractéristiques en direct permettent de choisir celles-ci en fonction de l'utilisation. De plus, cette solution permet de limiter le nombre de composants, les Transil protégeant directement le montage.

