

Inductances de commutation, à thyristors, compactes (*)

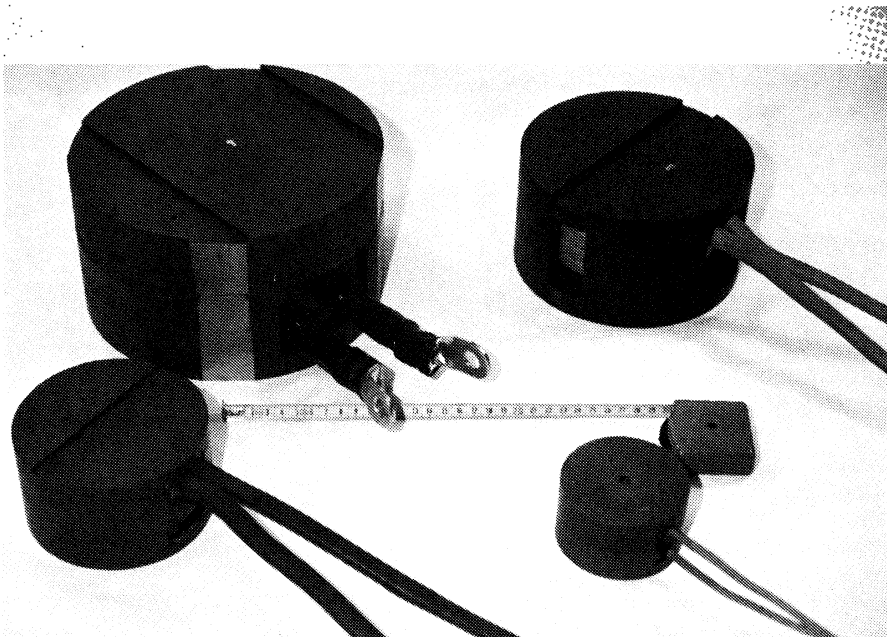
Les inductances de commutation sont un élément inductif dont la fonction est importante au sein des convertisseurs à commutation automatique à thyristors.

Elles sont caractérisées par un coefficient d'auto-inductance relativement faible (5 à 50 μ H par exemple) pour des amplitudes de courant importantes (environ 500 à 5 000 A) au cours d'une phase d'inversion de charge d'environ 100 μ s.

Dans ces conditions extrêmes on ne disposait principalement jusqu'à maintenant que de bobines sans fer obtenues pour la plupart par enroulement de feuillard.

Outre des pertes propres importantes pouvant atteindre le kilowatt, ces bobines créaient des champs de fuite considérables, donc des pertes et des bruits dans les éléments métalliques périphériques. Elles présentaient, de plus, dans certains cas (par exemple, en cas de court-circuit) une stabilité mécanique insuffisante.

Les récents progrès réalisés dans le domaine des matériaux magnétiques doux ont permis à la VAC de réaliser des inductances de commutation à noyaux magnétiques spéciaux. Les inconvénients précités des inductances à air ont pu ainsi être évités. Elles sont en outre caractérisées par une structure très compacte et permettent, grâce à leur faible champ de fuite, d'économiser de la place.



Modes de fonctionnement caractéristiques des inductances de commutation

Les figures 1 et 2 montrent deux principes de branchement de circuits de commutation typiques à extinction dans un redresseur à thyristors utilisant des inductances de commutation.

La figure 1 représente un circuit d'extinction en courant continu, composé du thyristor principal Th_H (qui doit être éteint), du condensateur de commutation C_K , de l'inductance de commutation L_K , du thyristor d'extinction Th_L et de la diode de commutation D .

Pour provoquer l'extinction, le condensateur C_K au préalable chargé en inverse, est déchargé au travers du thyristor d'extinction Th_L sur le thyristor principal. La recharge du condensateur C_K a lieu lors de l'allumage suivant du thyristor principal à travers la diode D et l'inductance L_K à la fréquence de résonance du circuit oscillant $L_K C_K$. Le courant de recharge traversant l'inductance de commutation forme donc une demi-onde sinusoïdale (1 b) d'amplitude i_L et de durée τ (demi-période), qui se répète à la fréquence de répétition de travail $f_P = 1/T$. Le fonctionnement de l'inductance est ici unipolaire, car elle est traversée par un courant de polarité constante.

La figure 2 représente une branche d'onduleur de Mc Murray. La structure symétrique de ce bloc permet le passage du courant dans les deux sens. L'inductance de commutation L_K fonctionne donc aussi dans les deux sens, les demi-ondes sinusoïdales de durée de base τ et d'amplitude i_L se suivant avec une période T avec des polarités opposées.

Dans ce montage, l'extinction d'un des thyristors principaux Th_H est provoquée par le thyristor d'extinction correspondant Th_L , l'inversion de charge du condensateur de commutation C_K par l'inductance L_K n'ayant pas lieu ici au moyen d'une branche spéciale d'extinction, mais à travers l'autre thyristor principal.

Instructions de montage et critères de sélection

La construction des circuits de commutation des figures 1 et 2 doit être basée d'une part sur les données d'exploitation existantes et, d'autre part, naturellement sur les valeurs limites permises des composants employés.

(*) Etude réalisée par la Vacuumschmelze GmbH.

Un processus possible, conduisant en particulier à la sélection d'une inductance de commutation précise, peut être esquissé à l'aide du circuit de la figure 1.

Les données d'exploitation allouées sont la tension de fonctionnement U_B , le courant de charge I_B et la fréquence de commutation f_p .

Les caractéristiques limites du thyristor principal Th_H dont il faut tenir compte outre la rigidité diélectrique sont le courant périodique de pointe permis I_{TRM} et le temps de recouvrement après commutation du circuit t_q . Le thyristor auxiliaire doit également être sélectionné conformément à la tension et l'intensité de fonctionnement en ce qui concerne sa rigidité diélectrique et sa capacité en intensité.

La taille du condensateur de commutation C_K peut être évaluée en se basant sur le fait qu'au cours du phénomène d'extinction le courant de décharge est constant et à peu près égal au courant de charge I_B , et qu'au début de chacune des phases d'extinction le condensateur C_K se trouve sous la tension de fonctionnement U_B . La tension d'extinction devant être appliquée sur le thyristor principal au minimum pendant le temps de recouvrement après commutation du circuit t_q , on a :

$$(1) C_K \geq I_B \cdot t_q / U_B$$

L'inductance de la bobine peut être choisie entre deux valeurs limites, fixées d'une part par le courant de pointe I_m autorisé du thyristor principal et, d'autre part, par la fréquence de répétition f_p .
On a donc :

$$(2) (10 \cdot f_p^2 \cdot C_K)^{-1} > L_K \geq U_B^2 \cdot C_K / (I_{TRM} - I_B)^2$$

Comme le montre l'exemple de calcul donné plus loin, ces deux valeurs limites sont généralement très éloignées l'une de l'autre. La sélection pratique doit donc être principalement basée sur les caractéristiques limites des inductances disponibles.

Pour les inductances de commutation à noyaux magnétiques, donc également pour les inductances compactes présentées ici, la saturation magnétique du matériau du noyau et l'échauffement dus aux pertes de l'enroulement et du noyau exigent la fixation de valeurs limites d'amplitude maximale du courant I_{Lmax} , de la fréquence de répétition, et du temps de commutation τ . Il faut également tenir compte de la température ambiante ϑ comparée à la température maximale ϑ_{max} permise pour les composants.

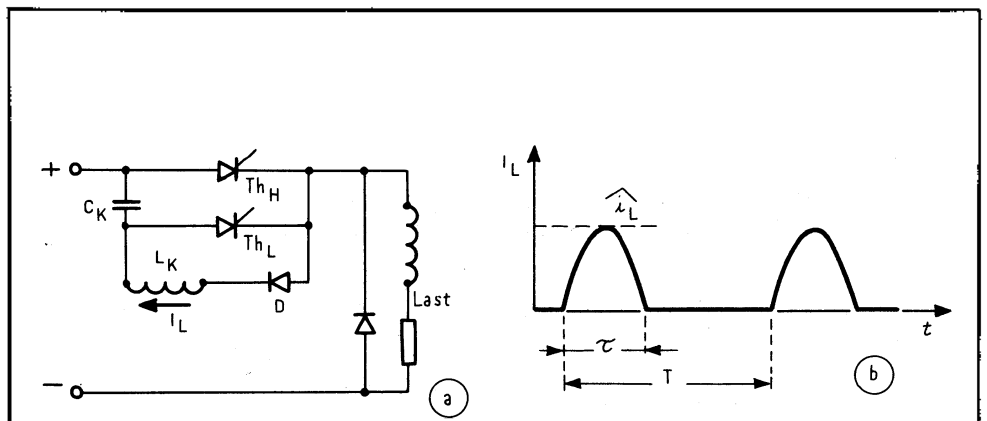


Fig. 1 : Principe de branchement d'un circuit d'extinction à thyristor (a) et courbe du courant traversant l'inductance de commutation (b).

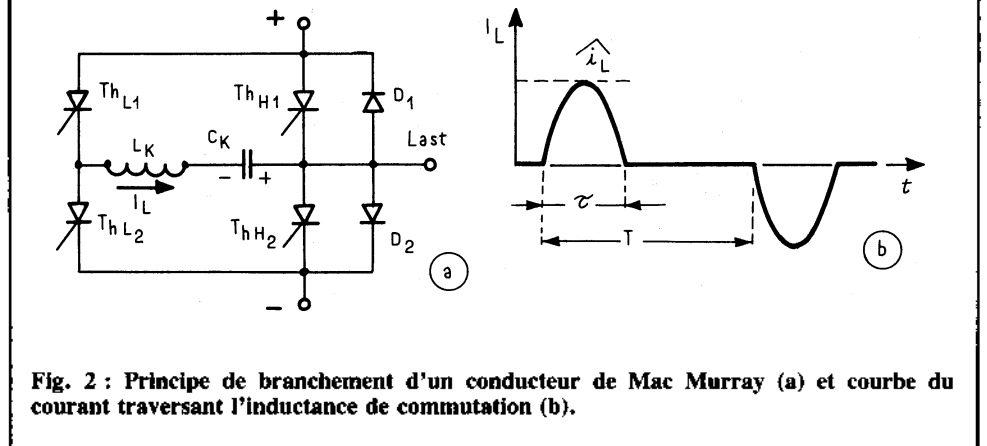


Fig. 2 : Principe de branchement d'un conducteur de Mac Murray (a) et courbe du courant traversant l'inductance de commutation (b).

Tandis que le courant de pointe I_{Lmax} autorisé pour des raisons magnétiques représente pour chaque type d'inductance une valeur qu'il est possible de donner directement, l'échauffement dépend de manière très complexe de plusieurs paramètres d'exploitation.

La température ambiante, et k_{BF} (A.cm/V.s) un facteur de pertes caractéristique correspondant à une taille et une conception précises. Les autres valeurs sont utilisées dans les unités suivantes : L_K (H) C_K (F), U_B (V) et f_p (Hz).

Le tableau I regroupe les données nécessaires à l'évaluation de (5) pour les types de construction des nouvelles inductances compactes.

Expliquons, à l'aide d'un exemple, le processus de sélection d'une inductance.

L'installation considérée fonctionne dans les conditions suivantes :
 $U_B = 500$ V, $I_B = 300$ A, $f_p = 400$ Hz, $\vartheta_u = 50^\circ$ C.

Le thyristor principal utilisé doit posséder les valeurs limites suivantes :
 $I_{TRM} = 1000$ A et $t_p = 30\mu s$.

Si l'on utilise les relations connues des circuits oscillants pour l'amplitude du courant d'inversion de charge \hat{I}_L et la durée de commutation τ .

$$(3) I_L = U_B \cdot \sqrt{C_K / L_K}$$

$$(4) \tau = \pi \cdot \sqrt{L_K \cdot C_K}$$

il est possible de donner une équation d'approximation du dimensionnement thermique.

$$(5) \Delta T = R_T \cdot f_p \cdot U_B^2 \cdot C_K (k_{BF} \cdot L_K + 2 \cdot R_{CuO} \sqrt{C_K / L_K} + 7 \cdot 10^{-5} \cdot R_{CuO} / L_K) \leq \vartheta_{max} - \vartheta_u$$

Outre les valeurs connues, nous trouvons dans cette équation ΔT (K) l'élévation de température, R_{CuO} (ohms) la résistance ohmique de l'enroulement à

Selon l'équation 1, on évalue la capacité minimale à $C_K = 18\mu F$; ϑ_u étant égal à 50° C et $\vartheta_{max} = 120^\circ$ C (tableau 1), on obtient pour ΔT la valeur de 70 K.

On recherche maintenant à l'aide de l'équation (5) les inductances minimales possibles permettant, avec les données existantes, de ne pas dépasser l'élévation de température ΔT de 70 F. On obtient, le plus petit encombrement selon le tableau I, pour l'inductance LKB 490/158 avec $L_K = 6,5 \mu\text{H}$, $k_{BF} = 500 \text{ A.cm/V.s}$ (fonctionnement unipolaire), $R_{\text{cuo}} = 0,8 \text{ m}\Omega$ et $R_T = 2,8 \text{ K/W}$ (sans refroidissement additionnel), une élévation de température de 73 K.

Le même calcul effectué pour les deux autres inductances d'encombrements identiques conduit à une valeur de $T = 64 \text{ K}$. Ces deux inductances conviendraient donc sur le plan thermique. En évaluant les points de courant d'inversion de charge à l'aide de l'équation (3), on confirme en outre que le courant de pointe autorisé $i_{M\text{max}}$ des deux inductances n'est pas dépassé. Elles conviennent donc également sur le plan électrique.

L'équation (2) permet finalement de montrer que les données limites des semi-conducteurs sont respectées, ce qui n'était pas le cas avec le premier type d'inductance T1. Pour cette autre raison, on ne pourrait donc pas l'utiliser.

Si, comme dans ce cas, on a le choix entre plusieurs types d'inductances, on choisit dans la pratique le type présentant l'inductance supérieure. On réduit ainsi les contraintes appliquées au semi-conducteur ou, en augmentant proportionnellement la capacité de commutation, on atteint une sécurité supérieure lors du phénomène d'extinction.

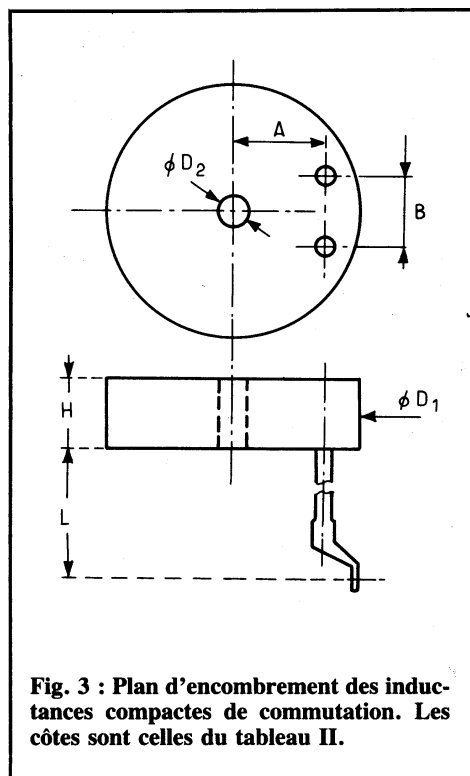


Fig. 3 : Plan d'encombrement des inductances compactes de commutation. Les côtes sont celles du tableau II.

Tableau I: Caractéristiques électriques

Modèles	L_K μH	$i_{L\text{max}}$ A	k_{BF} Acm/Vs		R_{cuo} m Ω	R_T K/W	
			a (*)	b		a (**)	b
T1 490/158...-WR 490/159...-WR 490/160...-WR	—	—	500	680	0,8	2,8	1,65
	6,5	1500	—	—	—	—	—
	10	1000	—	—	—	—	—
T2 490/161...-WR 490/162...-WR 490/163...-WR	—	—	350	470	0,75	1,3	0,85
	10	1800	—	—	—	—	—
	15	1200	—	—	—	—	—
T3 490/164...-WR 490/165...-WR 490/166...-WR	—	—	380	500	0,4	0,8	0,55
	8	3500	—	—	—	—	—
	14	2000	—	—	—	—	—
	20	1400	—	—	—	—	—

(*) a: exploitation unipolaire; b: exploitation bipolaire.

(**) a: inductance libre sans refroidissement complémentaire.

b: montage sur platine de refroidissement.

Tableau II: Caractéristiques mécaniques

Modèles	Encombrement (cf. fig. 3)					L	Cosse de câble	Poids (kg)
	D_1	D_2	H (mm)	A	B			
T1	120	16	55	40	40	100	10-70	ca. 3
T2	170	16	70	55	50	150	14-120	ca. 6
T3	220	20	95	80	60	200	14-185	ca. 15

Séries provisoires d'inductances compactes de commutation

Une série provisoire a été mise au point à partir des exigences rencontrées dans la pratique. La figure 3 donne la conception mécanique de ces inductances compactes.

Ces inductances sont des composants robustes intégralement blindés. Elles peuvent être suspendues par leurs fils, ou être fixées sur une plaque de refroidissement à l'aide d'une vis passant par l'alésage central. Avec un bon contact thermique entre le fond de l'élément et la plaque, la capacité de charge thermique augmente dans ce dernier cas de 50 à 70 %.

Des pertes supplémentaires locales peuvent se produire dans une certaine mesure si l'on utilise des plaques de refroidissement en matériau magnétique, ce en raison du champ de fuite résiduel. Ces pertes peuvent cependant être généralement dissipées sans problème.

La série provisoire comprend trois tailles différentes (T1... T3). A l'intérieur de chacune d'elles, on dispose de trois valeurs différentes d'inductance permettant de s'adapter au maximum aux conditions d'utilisation existantes.

Les caractéristiques électriques de la nouvelle série d'inductances sont regroupées dans le tableau I.

La température maximale des composants autorisée est $\vartheta_{\text{max}} = 120^\circ \text{C}$. En ce qui concerne la rigidité diélectrique, un essai a été effectué avec $U_p = 2,5 \text{ kV}_s$ entre l'enroulement et la surface de l'élément/la vis de fixation.

Les valeurs d'inductance L_K données dans le tableau q1 s'appliquent au fonctionnement à vide (mesure en pont; $f = 10 \text{ kHz}$) avec une tolérance de $\pm 10 \%$.

En raison de l'influence du matériau du noyau, la valeur descend à environ iL_{max} . L'écart maximal dans la place d'intensité nominale est de -20% . Les autres caractéristiques sont indicatives.

Le tableau II donne les caractéristiques mécaniques des inductances compactes de commutation.