

Les fiches techniques

51

La modulation d'énergie Les gradateurs à découpage de phase



51 Gradateurs à découpage de phase

51.1 Généralités

51.11 Rôle du gradateur

C'est un convertisseur qui produit un système de tension et courant alternatifs à partir d'une source de tension alternative, sans en modifier la fréquence.

- L'intensité i du courant débité par la source est la même que celle absorbée par le récepteur.

- f : fréquence des grandeurs alternatives.

On se limitera, dans notre étude, au cas où la source fournit une tension alternative sinusoïdale monophasée puis triphasée.

51.12 Principe de fonctionnement

- Le gradateur se comporte comme un interrupteur.

- Il permet d'établir ou d'interrompre la liaison entre la source de tension et le récepteur.

- La tension aux bornes du récepteur évolue en fonction de la séquence de commande de l'interrupteur.

- Le réglage de l'intensité du courant débité par la source permet de moduler l'énergie absorbée par le récepteur.

51.13 Constitution

- Généralement, « l'interrupteur » est bidirectionnel en courant et statique. Il est constitué de 2 thyristors montés « tête-bêche » ou d'un triac.

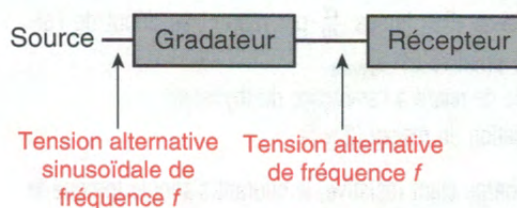
Cet étage de puissance est associé à une « électronique » de commande.

- Contrairement à un interrupteur électromécanique (contacteur par exemple), l'interrupteur statique permet d'obtenir des cycles de fonctionnement « ouverture et fermeture » rapides, sans phénomène de rebondissement et son ouverture se fait sans rupture de courant donc sans surtension.

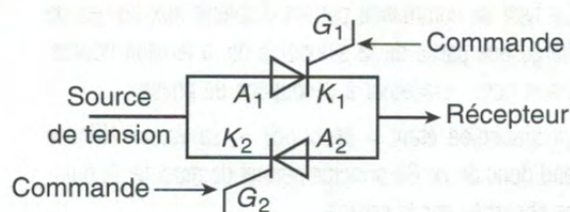
51.14 Domaine d'emploi

La séquence de commande d'un gradateur est tributaire de la nature et du domaine d'emploi du récepteur qu'il alimente.

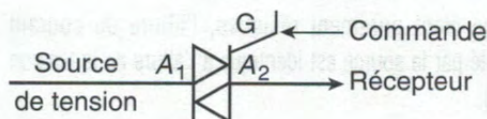
GRANDEURS D'ENTRÉE ET DE SORTIE



MONTAGE À DEUX THYRISTORS « TÊTE-BÊCHE »



MONTAGE À TRIAC



EXEMPLES D'UTILISATION :

Réglage d'une intensité lumineuse, moteur à vitesse modulée, compensateur d'énergie réactive, chauffage électrique industriel.

Suivant le domaine d'emploi, il conviendra de distinguer :

- le gradateur à découpage de phase ;
- le gradateur à train d'ondes (voir chapitre 52).

51 ■ 2 Gradateur monophasé sur charge purement résistive

51 ■ 21 Principe de fonctionnement

■ Le signal de commande est envoyé sur la gâchette de TH1, retardé d'un temps $\frac{\alpha}{\omega}$ par rapport au début de l'alternance positive de u_{source} .

α : angle de retard à l'amorçage du thyristor.

ω : pulsation du réseau ($2\pi.f$).

■ La charge étant résistive, le courant s'annule lorsque la tension devient nulle.

Il suffit d'envoyer un nouveau signal de commande sur la gâchette de TH'1 retardé de $\frac{\alpha}{\omega}$ par rapport au début de l'alternance négative de u_{source} pour obtenir le même phénomène durant l'alternance négative.

■ Ce type de commande permet d'obtenir aux bornes de la charge une partie de la sinusoïde de la tension source, d'où son nom : gradateur à découpage de phase.

■ La sinusoïde étant « découpée », sa valeur efficace dépend donc de α . Ce principe permet de moduler la puissance absorbée par la charge.

51 ■ 22 Allure des oscillogrammes

En négligeant la chute de tension,

■ lorsque TH1 ou TH'1 est passant :

$$u_{charge}(t) = u_{source}(t) ;$$

■ lorsque TH1 et TH'1 sont bloqués : $u_{charge} = 0$ et

$$u_{thyristor}(t) = u_{source}(t).$$

La charge étant purement résistive, l'allure du courant $i(t)$ débité par la source est identique à l'allure de la tension $u_{charge}(t)$.

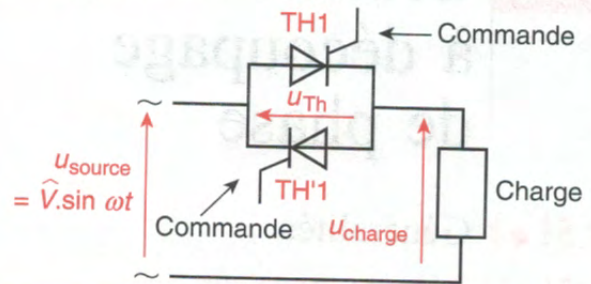
51 ■ 23 Choix et protections des thyristors

Chaque thyristor doit pouvoir supporter la valeur maximale de la tension du réseau, soit $\hat{U} = U_{eff \text{ Réseau}} \times \sqrt{2}$.

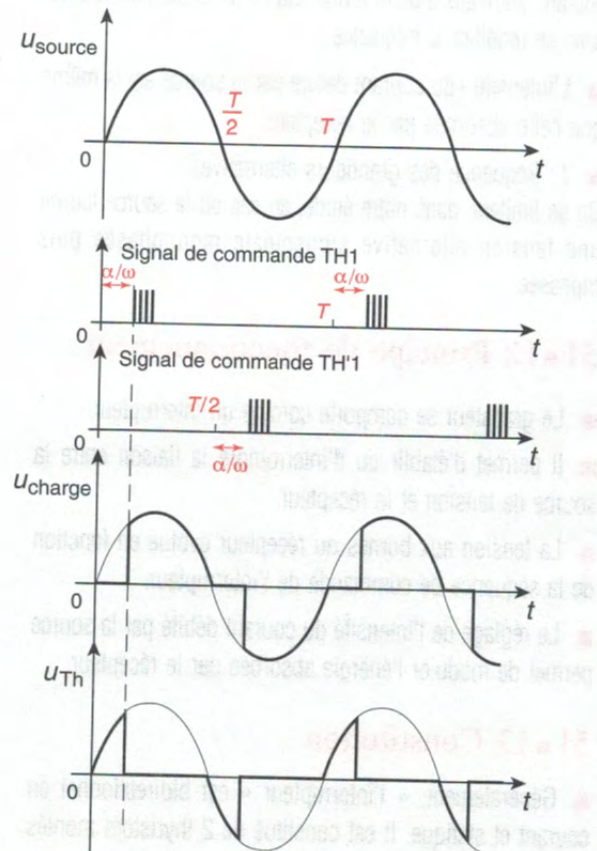
La valeur de l'intensité efficace à l'état passant (pour $\alpha = 0$) dans le thyristor est : $I = \frac{P}{U}$ en monophasé sur charge résistive.

La contrainte thermique du fusible associé à la protection de l'interrupteur statique doit être inférieure à la contrainte thermique du semi-conducteur.

SCHÉMA DE PRINCIPE



OSCILLOGRAMMES



Calcul de U charge efficace

À partir de la formule :

$$U_{ceff}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max}^2 \times \sin^2 \theta \times d\theta,$$

on démontre que : $U_{ceff} = V_{eff} \times \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$.

V_{eff} : valeur de la tension efficace de la tension source.

α : angle de retard à l'amorçage (exprimé en radian).

51 ■ 24 Étude des grandeurs électriques

Tension source

Seule l'allure de la tension source est sinusoïdale.

Pour mesurer sa valeur efficace, on peut utiliser un appareil ferromagnétique ou magnétoélectrique (en position \approx).

Tension et intensité dans la charge

Les allures du courant débité par la source et de la tension aux bornes de la charge sont alternatives mais non sinusoïdales.

Dans ce cas, pour mesurer leurs valeurs efficaces, il faut utiliser des appareils de mesure appelés « efficace vrai » ou RMS (voir chapitre « Mesures électriques »).

La puissance active consommée par la charge peut être mesurée par un wattmètre.

APPLICATION NUMÉRIQUE :

$$U_{\text{eff réseau}} = 244 \text{ V.}$$

Charge purement résistive $R = 290 \Omega$.

Calculer, pour différentes valeurs de l'angle α de retard à l'amorçage ($\alpha = 0 ; \pi/5 ; 2\pi/5 ; 3\pi/5$ et π), les valeurs des grandeurs : U_{ceff} , I_{eff} , P_{charge} , $S_{\text{réseau}}$.

$$\text{Rappel : } P_{\text{ch}} = RI_{\text{eff}}^2 = \frac{U_{\text{ceff}}^2}{R}$$

$$S_{\text{réseau}} = U_{\text{eff réseau}} \times I_{\text{eff}}$$

CONSTATATIONS :

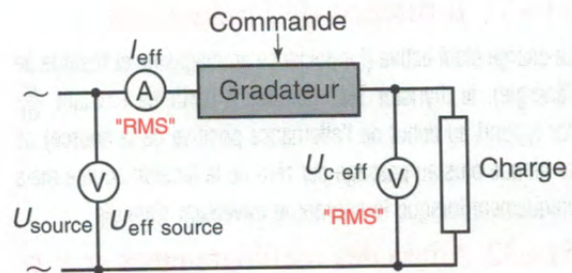
(voir caractéristiques $P = f(\alpha)$; $S = f(\alpha)$).

- Pour $\alpha = 0$, on est en régime purement sinusoïdal et pour une charge purement résistive : $P = S$.
- Dans le cas d'un gradateur à découpage de phase, $S_{\text{réseau}} \neq P_{\text{charge}}$. Ce type de gradateur entraîne une consommation de puissance réactive.

Conséquences :

Pour les installations de forte puissance, il faut en tenir compte pour le dimensionnement de la ligne.

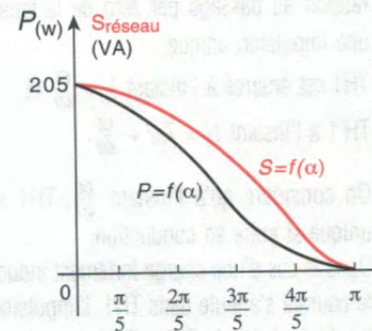
SCHÉMA DE MONTAGE



APPLICATION NUMÉRIQUE : RÉSULTATS

α (rad)	U_{ceff} (V)	I_{eff} (mA)	P_{ch} (W)	$S_{\text{réseau}}$ (VA)
0	244	841	205	205
$\pi/5$	237	817	193	200
$2\pi/5$	203	696	140	169
$3\pi/5$	134	458	61	111
$4\pi/5$	53	179	9	44
π	0	0	0	0

CARACTÉRISTIQUES $P = f(\alpha)$; $S_{\text{réseau}} = f(\alpha)$



Interprétation des résultats

L'allure de l'intensité $i = f(t)$ débitée par la source est alternative mais non sinusoïdale.

Elle peut donc être décomposée en un terme fondamental (de même fréquence que celle du réseau) auquel sont superposées des composantes harmoniques de fréquences multiples produisant une puissance appelée déformante.

On démontre que : $S_{\text{réseau}}^2 = P^2 + Q^2_{\text{réactif}} + D^2$.

D est appelée puissance déformante, elle est due aux harmoniques de courant.

Q réactive est due au fondamental du courant. Il est à noter que cette puissance Q peut être mesurée à l'aide d'un wattmètre branché en varmètre (voir chapitre « Mesures électriques »).

Le rapport P/S est toujours appelé facteur de puissance mais correspond plus au $\cos \varphi$ du récepteur comme dans le cas de grandeurs purement sinusoïdales (φ : argument du récepteur).

51 ■ 3 Gradateur monophasé sur charge résistive et inductive

51 ■ 31 Influence de l'inductance L

La charge étant active (l'inductance emmagasine et restitue de l'énergie), le thyristor TH1 (amorçé à partir de l'instant $\frac{\alpha}{\omega}$ par rapport au début de l'alternance positive de la source) ne se bloque plus au passage par zéro de la tension source mais uniquement lorsque le courant le traversant s'annule.

51 ■ 32 Allure des oscillogrammes $\alpha > \varphi$

- À l'instant $\frac{\alpha}{\omega}$ (une impulsion de commande est présente sur la gâchette de TH1), TH1 devient passant, le courant s'établit dans le circuit.
- Le courant s'annule durant l'alternance négative avant que TH'1 soit amorcé car $\alpha > \varphi$.
- À l'instant $\frac{T}{2} + \frac{\alpha}{\omega}$, TH'1 ayant à ses bornes une tension VAK positive peut être amorcé.
- Lorsqu'un thyristor est passant, $i \neq 0$, $U_{\text{charge}} = U_{\text{source}}$.
Remarque : Si $\alpha < \varphi$, le courant a uniquement une allure purement sinusoïdale en régime établi ou forcé.

51 ■ 33 Influence de la durée des impulsions de commande

Les deux thyristors sont amorcés avec un retard $\frac{\alpha}{\omega}$ par rapport au passage par zéro de la tension du réseau et par une impulsion unique.

TH1 est amorcé à l'instant $t_1 = \frac{\alpha}{\omega}$ et

TH'1 à l'instant $t_1 = T/2 + \frac{\alpha}{\omega}$.

On considère qu'à l'instant $\frac{\alpha}{\omega}$, TH1 reçoit une impulsion unique et entre en conduction.

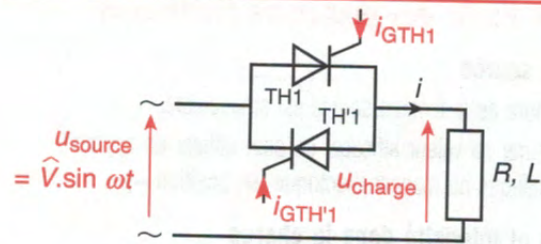
Dans le cas d'une charge fortement inductive ($\varphi > \alpha$), lorsque le courant s'annule dans TH1, l'impulsion n'est plus présente sur la gâchette de TH'1. TH'1 ne peut donc pas s'amorcer à l'instant $T/2 + \alpha/\omega$.

Le courant est unidirectionnel. On perd le contrôle du gradateur. Il est donc nécessaire de commander les thyristors par un large train d'impulsions.

51 ■ 4 Gradateur triphasé

51 ■ 41 Constitution

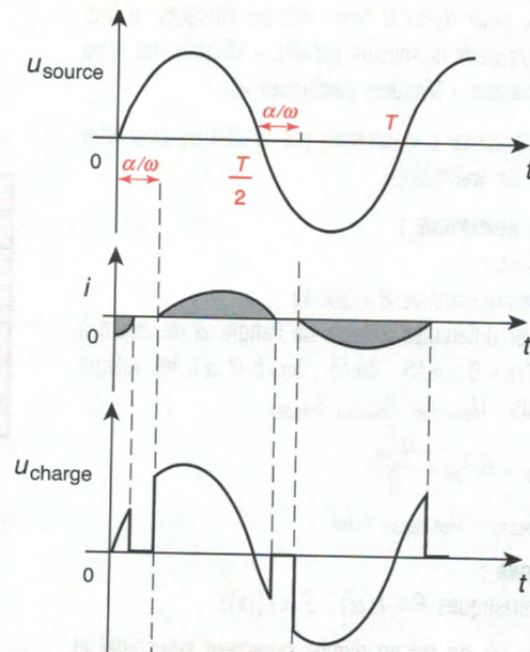
- Ce type de gradateur comporte 6 thyristors montés « tête-bêche » par groupe de 2. Chaque groupe est en série dans une phase d'alimentation.



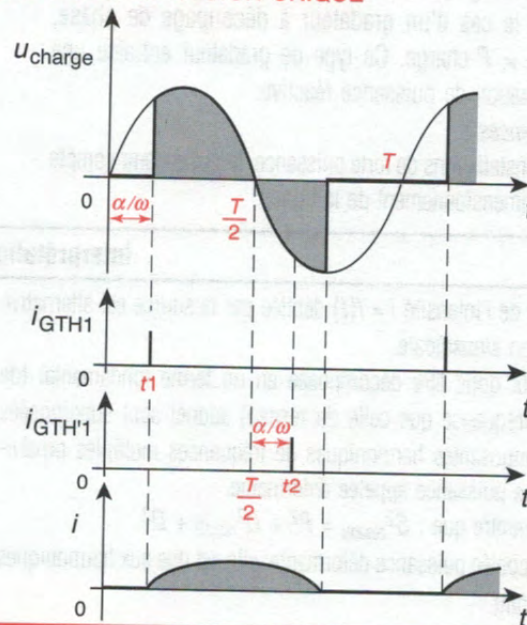
φ : argument du récepteur.

α : angle de retard à l'amorçage.

Z : impédance du récepteur.



CAS D'UNE IMPULSION UNIQUE



- On considère le réseau d'alimentation parfaitement équilibré.
- Il ne peut y avoir courant dans la charge que si 2 ou 3 thyristors (chacun sur différentes phases) sont simultanément passants.

51 ■ 42 Fonctionnement (charge couplée en étoile)

En fonction de l'angle α de retard à l'amorçage des thyristors par rapport à leurs commutations naturelles, il est possible d'obtenir les modes de fonctionnement suivants :

- Aucun thyristor passant : charge non alimentée.
- Un thyristor par phase est conducteur (voir schéma équivalent 1).

$$\vec{V}_{AN} = \vec{V}_1 \quad \vec{V}_{BN} = \vec{V}_2 \quad \vec{V}_{CN} = \vec{V}_3$$

La tension aux bornes de chaque groupe de thyristors est nulle. On retrouve le cas d'un montage étoile équilibré.

- Deux thyristors (sur 2 phases différentes) sont conducteurs : Th1 et Th'2 par exemple (voir schéma équivalent 2).

Dans ce cas, $\vec{V}_{CN} = \vec{0}$
 et $\vec{V}_1 + \vec{V}_{BN} = \vec{V}_2 + \vec{V}_{AN} \Rightarrow \vec{V}_1 - \vec{V}_2 = \vec{V}_{AN} - \vec{V}_{BN}$.

Les résistances étant identiques : $|\vec{V}_{AN}| = |\vec{V}_{BN}| \Rightarrow$

$$\vec{V}_{AN} = \frac{\vec{V}_1 - \vec{V}_2}{2} \text{ et } \vec{V}_{BN} = -\vec{V}_{AN} \text{ . On démontre que :}$$

$$\vec{V}_{Th3} = \frac{3 \cdot \vec{V}_3}{2}$$

51 ■ 43 Conclusions

- Pour une séquence de commande des 6 thyristors, les tensions produites aux bornes de la charge sont alternatives et périodiques.
- La forme de ces tensions dépend de la valeur de l'angle α de retard à l'amorçage et de la nature de la charge. On démontre que les harmoniques de rang 3 et multiples de 3 disparaissent.

Remarque :

À l'amorçage d'un thyristor, il faut qu'un autre thyristor (sur une phase différente) soit déjà passant pour obtenir le fonctionnement normal du gradateur.

On montre que, lorsque α devient supérieur à $\pi/2$, cette condition n'est plus respectée, d'où la nécessité de commander les thyristors par un large signal ou de générer des impulsions de confirmation.

CHARGE COUPLÉE EN ÉTOILE

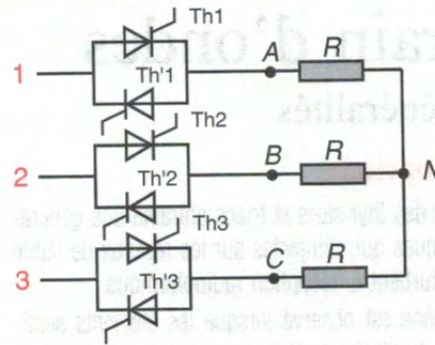
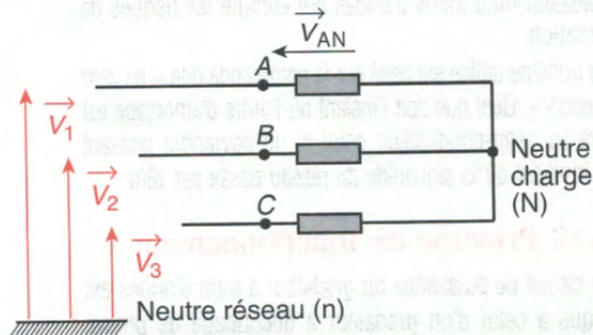
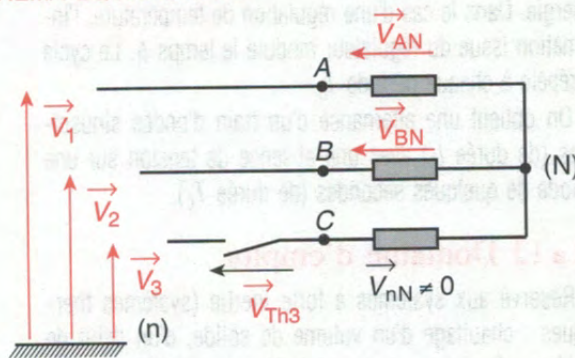


SCHÉMA ÉQUIVALENT 1



Les potentiels des points n et N sont identiques.

SCHÉMA ÉQUIVALENT 2



(Cas du montage étoile déséquilibré)

MONTAGE GRADATEUR TRIPHASÉ

