

Sommaire

1. - Introduction

2. - Mode de commande et Applications

Généralités

Modes de conduction

Mode "tout ou rien"

Cycle proportionnel

Variation d'angle d'ouverture

Train d'ondes avec démarrage progressif

Retard à l'amorçage

Définition des montages à thyristors

Applications

Monophasées

Triphasées

Différents aspects des unités à thyristors

Protection

Fusible

Surtensions

Surchauffe

Isolation

3. - Nécessité de l'élimination de la composante continue

1

Introduction

La gamme d'unités à thyristors présentées dans cette brochure inclue les deux types d'entrée logique ou analogique – des séries 425, 451-454, 455-458 et 461-464. Cette gamme fait partie de la vaste étendue des équipements de contrôle, fabriqués mondialement par Eurotherm. Eurotherm propose aussi d'autres appareils avec un grand choix d'options, destinés aux différentes applications industrielles dans le domaine de la métallurgie, de la chimie, du plastique, du verre, etc.



2

Mode de conduction et Applications

Généralités

Un thyristor est un semi-conducteur qui agit comme un interrupteur unidirectionnel. Il est aussi possible de le commuter pour redresser la tension alternative qui lui est appliquée. Il passera de l'état passant (ON) à l'état bloqué (OFF) quand le courant deviendra inférieur à son courant de maintien et restera dans cet état tant que la gachette ne recevra pas d'impulsions de commande. Le thyristor pourra à nouveau s'amorcer quand il aura reçu une impulsion de commande et que la tension à ses bornes sera positive. Par conséquent afin de pouvoir contrôler les deux alternances aux bornes d'une charge, on utilise normalement deux thyristors montés en parallèle et inversés. On appelle communément ce montage, montage "tête-bêche".

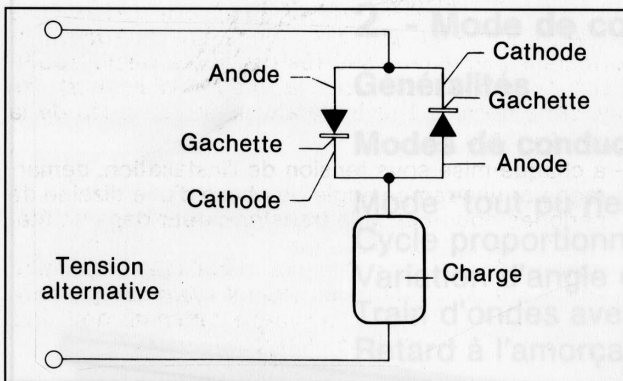


Figure 1 : Montage "tête bêche" de 2 thyristors (unité à thyristors) pour contrôler une tension alternative.

Une autre représentation des thyristors : le Triac qui est capable de conduire dans les deux sens. Le Triac est normalement utilisé pour contrôler de faibles valeurs de courant, alors que les thyristors peuvent contrôler plusieurs milliers d'Ampères.

Il est donc possible de contrôler la puissance appliquée sur une charge avec des thyristors. Les semi-conducteurs permettront de contrôler cette puissance de plusieurs manières, en fonction du mode de commande qui leur sera appliqué. La demande de puissance est généralement fournie par un régulateur (de température par exemple).

Modes de conduction

Les thyristors permettent de contrôler facilement la puissance délivrée à une charge (une résistance en général) suivant trois principaux modes de conduction :

- Mode "Tout ou rien" : contacteur statique avec mise en conduction au zéro de tension. Contrôle par signal de commande logique.
- Mode "Train d'ondes" : gradateur avec mise en conduction et hors conduction au zéro de tension. La puissance transmise à la charge est modulée proportionnellement en fonction du signal de commande analogique (0 - 10 V ; 4 - 20 mA, etc).
- Mode "Angle de phase" : gradateur avec découpage de la tension d'alimentation sur chaque demi-période en fonction du signal d'entrée analogique.

- D'autres modes de conduction sont disponibles, combinaison de train d'ondes et d'angle de phase suivant le type d'application :

- train d'ondes avec rampe démarrage en angle de phase à chaque train d'ondes pour charge résistive à fort coefficient de température ;
- train d'ondes avec 1^{er} amorçage retardé pour contrôle de primaire de transformateur.

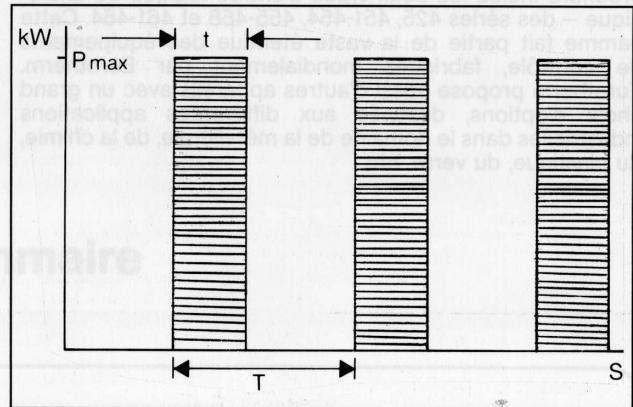


Figure 2 : Puissance transmise à la charge en modulation du temps de conduction.

Le mode de conduction choisi dépendra de la taille et du type de la charge, de ses caractéristiques thermiques et des impératifs d'utilisation.

a - Mode "tout ou rien"

Ce mode s'applique aux systèmes de contrôle de température. Dans de tels systèmes la puissance de chauffe est appliquée sur la charge tant que la température ne dépasse pas le point de consigne demandé. Lorsqu'on maintient une température nécessitant une puissance de chauffe inférieure à la puissance maximale fournie par les thyristors, le circuit de charge est alternativement coupé puis alimenté, provoquant ainsi des oscillations de température autour de la consigne. Le cycle "tout ou rien" est fixé par le régulateur.

En pratique, la masse thermique de la charge introduit un temps de retard. Bien que la puissance électrique soit coupée quand la température a atteint le point de consigne, la chaleur fournie précédemment continue d'affluer vers le capteur pendant un certain temps ; de même lorsque la température aura suffisamment baissé pour que la puissance soit de nouveau appliquée à la charge, il n'y aura pas de changement immédiat. Ainsi, pour des charges importantes et des capteurs éloignés de la source de chaleur, on obtient d'importantes et lentes variations de température. Quand le thyristor est amorcé au cours d'une demi-alternance, une variation soudaine de courant et de tension se produit dans la charge. Il y a alors création de parasites, parasites électriques directement injectés sur le réseau d'alimentation, parasites électromagnétiques par rayonnement. Pour pallier à ce phénomène, Eurotherm a développé un circuit électronique qui assure la commutation des thyristors seulement au passage à zéro de la tension d'alimentation. Le mode de contrôle "tout ou rien" est le plus simple. Il est le plus rationnel dans les applications où de légères fluctuations de température peuvent être relevées. La précision et l'amplitude des oscillations de la température dépendent du régulateur et de la réponse thermique du système.

b - Cycle proportionnel (Train d'ondes rapide ou lent, Mode syncope).

Cycle proportionnel, consiste à délivrer une série de périodes complètes sur la charge. Suivant les caractéristiques du cycle, on définit trois modes de conduction qui répondent chacun aux exigences d'applications bien précises (voir tableau).

Mode de conduction	à 50 % de la puissance	Applications
Cycle rapide	200 ms (typique) passant 200 ms (typique) bloqué	Recommandé pour de simples charges résistives. Peut causer des fluctuations sur le réseau si l'installation se trouve en bout de ligne.
Cycle lent	20s (typique) passant 20 s (typique) bloqué	Recommandé pour les systèmes ayant une forte inertie thermique et pour les installations en bout de ligne afin d'éviter une fréquence de fluctuations trop élevée.
Mode syncopé	Un cycle passant un cycle bloqué ●	Adapté seulement aux charges résistives de faible inertie thermique.

- <50 % = 1 cycle passant (ON) et N cycles bloqués (OFF)
 - >50 % = 1 cycle bloqué (OFF) et N cycles passant (ON)
- N variable

Les cycles de puissance sont automatiquement contrôlés par le régulateur grâce aux actions intégrale et proportionnelle. Le temps de non conduction augmente quand la température monte dans la bande proportionnelle. Ceci a pour effet de diminuer la puissance moyenne dans la charge. Les commentaires (voir paragraphe a) sur la suppression des parasites générés sur le secteur lors du déclenchement des thyristors, sont valables aussi pour ce mode de conduction.

Note : on peut utiliser ce mode de conduction que pour des charges sensiblement constantes (ne variant pas avec la température).

c – Variation d'angle d'ouverture (Angle de phase)

Comme précédemment l'amorçage des thyristors est contrôlé par un circuit électronique situé dans le régulateur ou dans l'unité à thyristors. On contrôle la puissance en faisant conduire des thyristors sur une partie de l'alternance de la tension secteur seulement (voir figure 3). L'angle de conduction (θ) varie dans le même sens que la demande de puissance.

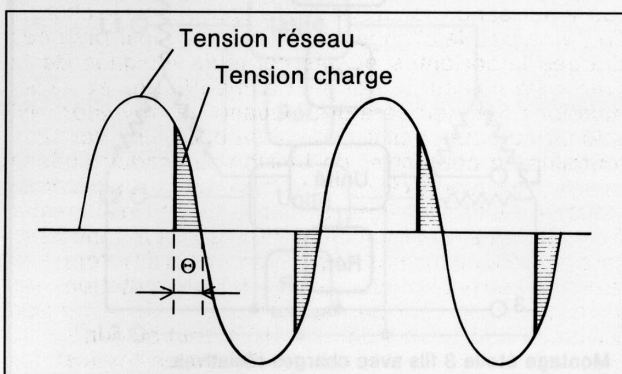


Figure 3 : Mode de conduction en variation d'angle d'ouverture (angle de phase).

La puissance délivrée n'est pas une fonction linéaire de l'angle de conduction.

Une importante caractéristique qui peut être appliquée au mode en l'angle de phase est la limitation de courant. Sur le primaire des transformateurs ou des faibles résistances à froid, l'application du cycle complet de la sinusoïde peut créer une pointe de courant et provoquer

ainsi la rupture du fusible de protection. Le mode l'angle de phase permet de démarrer à zéro et d'augmenter progressivement l'angle de conduction sous le contrôle de la limitation de courant.

Le désavantage de ce mode de commande est la création de parasites sur le secteur.

d – Train d'ondes avec démarrage progressif

Pour réduire les parasites sur le réseau on associe au train d'ondes un démarrage en variation d'angle d'ouverture. C'est un démarrage progressif.

Ce mode de commande démarre au zéro de tension en l'angle de phase, puis après quelques alternances, continue en train d'ondes. L'avantage est, qu'avec ce mode de commande, on peut appliquer graduellement la puissance sur des faibles résistances à froid ou des charges inductives qui ont des courants d'appel important. La limitation de courant peut être appliquée durant la conduction en variation d'angle d'ouverture et maintiendra ce mode de commande.

e – Réglage du temps de retard à l'armorçage

Train d'ondes avec premier amorçage décalé.

Lorsque l'on contrôle le primaire d'une charge inductive saturable en train d'ondes (exemple, primaire de transformateur alimentant des résistances à faible coefficient de température pour la chauffe d'un four), les thyristors doivent être impérativement amorcés de la façon suivante :

- à chaque mise sous tension de l'installation, démarrage par une rampe angle de phase d'une dizaine de périodes pour mettre le transformateur dans un état magnétique précis et connu ;
- puis à chaque train d'ondes, décalage du premier amorçage de thyristor conduisant systématiquement le premier. L'angle de décalage optimum doit être ajusté en fonction de la charge.

Définition des montages à thyristors

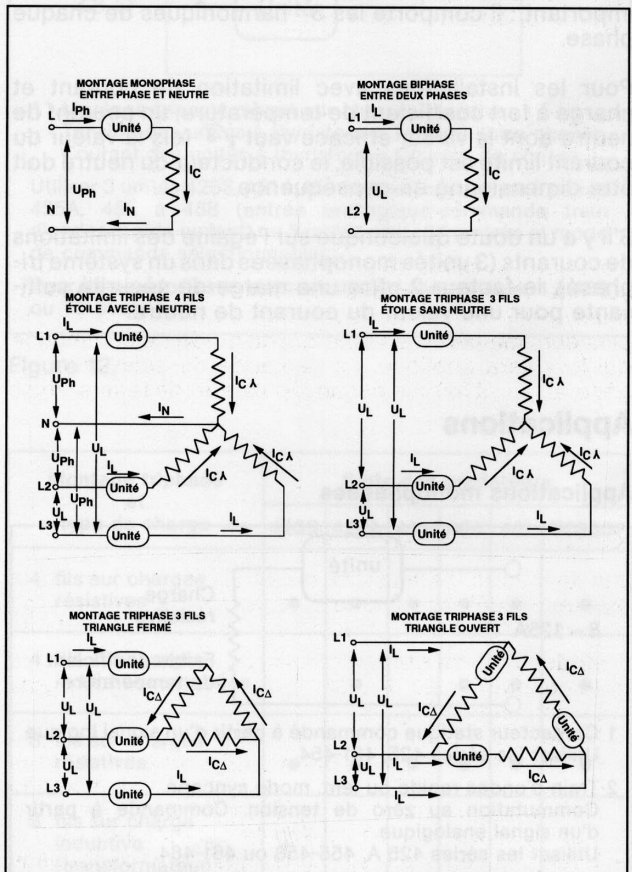


Figure 4 : Montages à thyristors.

Définition des termes utilisés sur la figure 4 dans les montages de puissance.

- Tension de phase (U_{Ph}) : tension entre une phase et le neutre.
- Tension de ligne (U_L) : tension entre deux phases du réseau triphasé.
- Courant de phase (I_{Ph}) : courant entre une phase du réseau triphasé et le neutre.
- Courant de ligne (I_L) : courant dans une ligne de liaison entre le réseau et l'installation.

● Montage en étoile (symbole λ)

Courant de chaque branche de la charge triphasée équilibrée :

$$I_{C\lambda} = I_{Ph} = I_L$$

Tension de chaque branche de la charge :

$$U_{C\lambda} = U_{Ph} = U_L : \sqrt{3}$$

● Montage en triangle (symbole Δ)

Courant de chaque branche de la charge triphasée équilibrée :

$$I_{C\Delta} = I_L : \sqrt{3}$$

Tension de chaque branche de la charge :

$$U_{C\Delta} = U_L$$

● Puissance totale (P) pour tous les montages de charge triphasée équilibrée (l'indice C signifie la charge) :

$$P = 3 U_C I_C \cos \phi$$

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \phi$$

où $\cos \phi$ est le facteur de la puissance de la charge.

En mode de commande en variation d'angle d'ouverture, le courant de neutre dans les systèmes triphasés est important : il comporte les 3^{es} harmoniques de chaque phase.

Pour les installations avec limitation de courant et charge à fort coefficient de température, un courant de neutre dont la valeur efficace vaut $\sqrt{3}$ fois la valeur du courant limité est possible, le conducteur du neutre doit être dimensionné en conséquence.

S'il y a un doute quelconque sur l'égalité des limitations de courants (3 unités monophasées dans un système triphasé), le facteur 2 offre une marge de sécurité suffisante pour une valeur du courant de neutre.

Applications

Applications monophasées

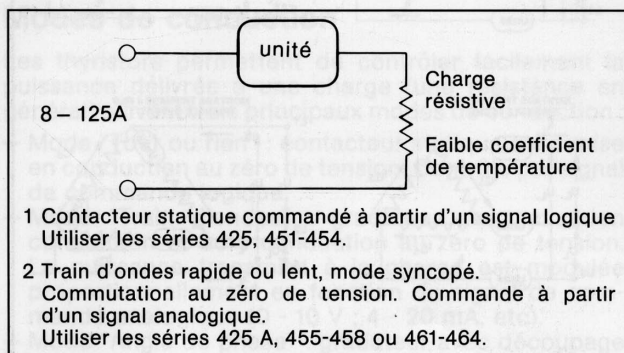


Figure 5.

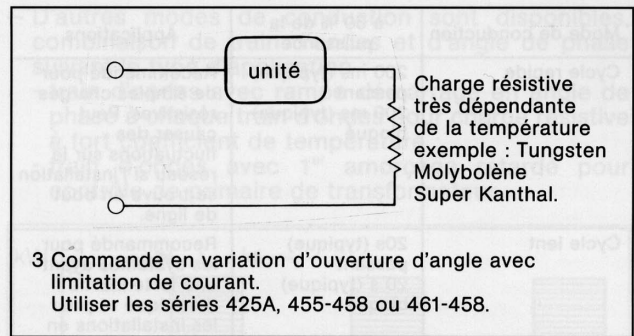


Figure 6.

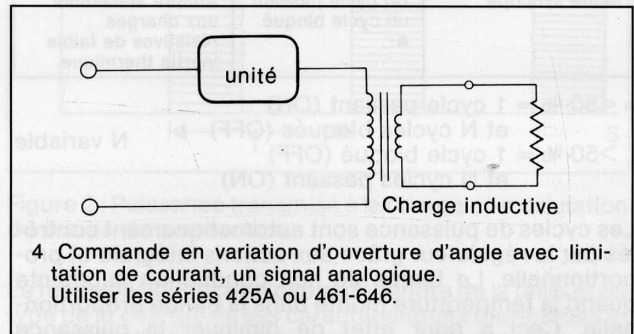


Figure 7.

Pour les modes de commande 2, 3 et 4, on peut utiliser les unités 461 à 464, qui permettant de sélectionner le signal d'entrée et le mode de commande, offrent une grande souplesse d'utilisation.

Applications triphasées

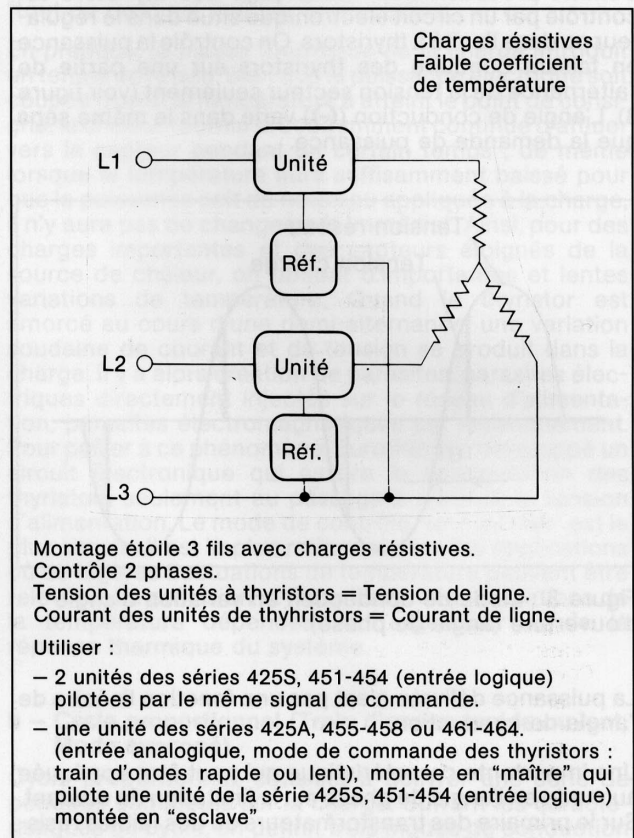


Figure 8.

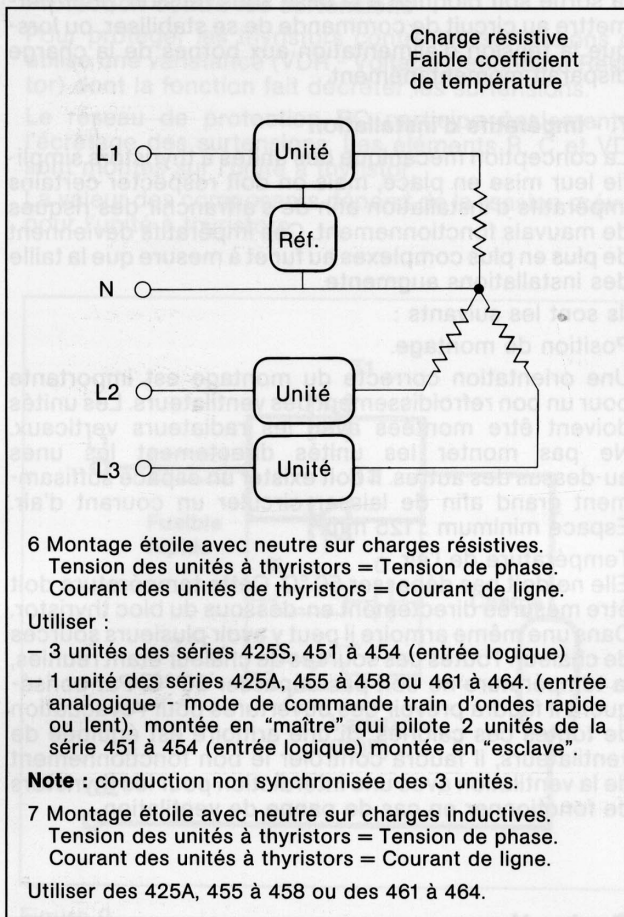


Figure 9.

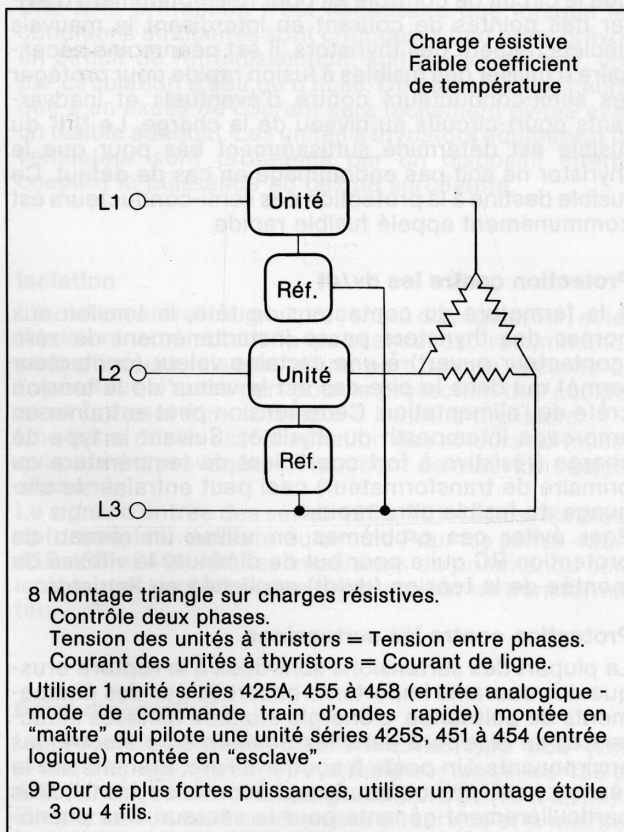


Figure 10.

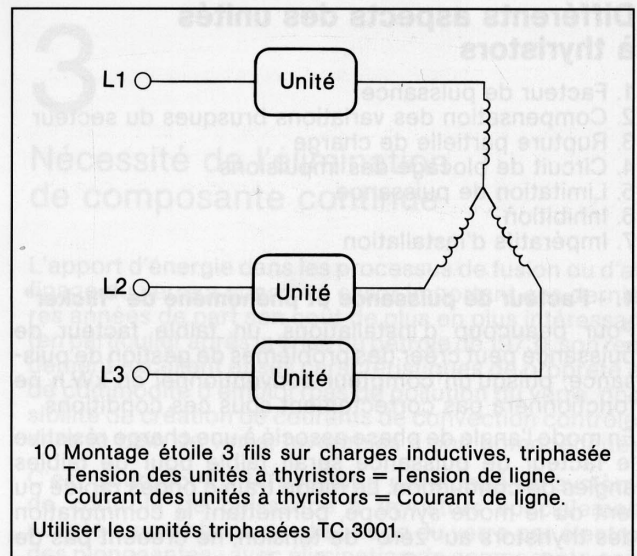


Figure 11.

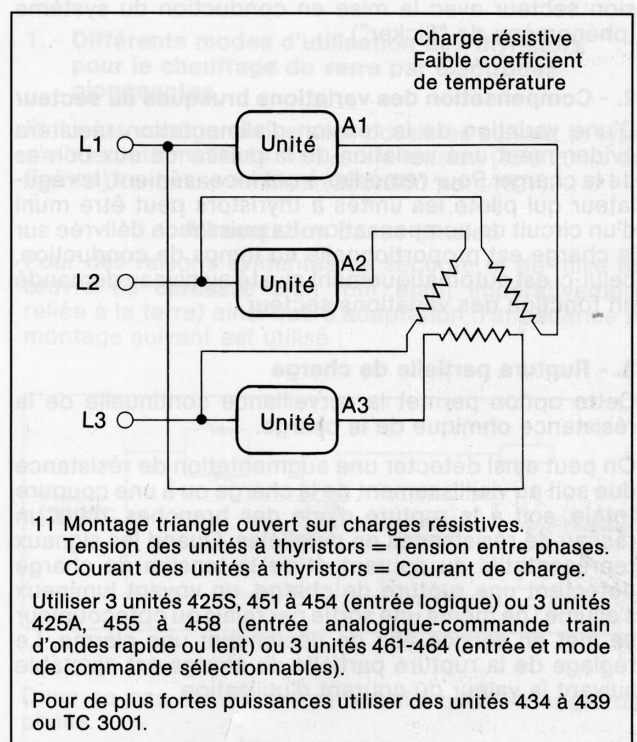


Figure 12.

Montage triphasé et type de charge	Série des gradateurs					
	425S	425A	451	455	461	TC3001
4 fils sur charges résistives	•	•	•	•	•	•
4 fils sur charges inductives séparées		•		•	•	•
3 fils sur charges résistives	•	•	•	•	•	•
3 fils sur charge inductive (transformateur triphasé)						•

Différents aspects des unités à thyristors

1. Facteur de puissance
2. Compensation des variations brusques du secteur
3. Rupture partielle de charge
4. Circuit de blocage des impulsions
5. Limitation de puissance
6. Inhibition
7. Impératifs d'installation

1. - Facteur de puissance et phénomène de "flicker"

Pour beaucoup d'installations, un faible facteur de puissance peut créer des problèmes de gestion de puissance, puisqu'un compteur conventionnel en kW.h ne fonctionnera pas correctement sous ces conditions.

En mode l'angle de phase associé à une charge résistive le facteur de puissance serait faible pour de faibles angles de conduction. Le mode train d'ondes rapide ou lent ou le mode syncopé, permettant la commutation des thyristors au "zéro" de tension, ne créent pas de pointe de courant. Ces modes de commande ne créeront pas de distorsions sur le réseau, sauf si la puissance est très importante par rapport à la puissance totale de l'installation. On constate alors des fluctuations de tension secteur avec la mise en conduction du système (phénomène de "flicker").

2. - Compensation des variations brusques du secteur

D'une variation de la tension d'alimentation résultera évidemment une variation de la puissance aux bornes de la charge. Pour remédier à cet inconvénient, le régulateur qui pilote les unités à thyristors peut être muni d'un circuit de compensation. La puissance délivrée sur

la sortie soit bloquée à la mise sous tension, pour permettre au circuit de commande de se stabiliser, ou lorsque la tension d'alimentation aux bornes de la charge disparaît momentanément.

7. - Impératifs d'installation

La conception mécanique des unités à thyristors simplifie leur mise en place, mais on doit respecter certains impératifs d'installation afin de s'affranchir des risques de mauvais fonctionnement. Ces impératifs deviennent de plus en plus complexes au fur et à mesure que la taille des installations augmente.

Ils sont les suivants :

Position de montage.

Une orientation correcte du montage est importante pour un bon refroidissement des ventilateurs. Les unités doivent être montées avec les radiateurs verticaux. Ne pas monter les unités directement les unes au-dessus des autres. Il doit exister un espace suffisamment grand afin de laisser circuler un courant d'air. Espace minimum : 125 mm.

Température de l'air.

Elle ne doit pas dépasser 50 °C. Cette température doit être mesurée directement en-dessous du bloc thyristor. Dans une même armoire il peut y avoir plusieurs sources de chaleur. Toutes ces sources de chaleur étant réunies, la température ne doit pas dépasser 50 °C. Par conséquent il faudra prévoir des ouvertures pour l'évacuation de toutes ces calories. Si une armoire est équipée de ventilateurs, il faudra contrôler le bon fonctionnement de la ventilation avec une interdiction pour les thyristors de fonctionner en cas de panne de ventilation.

Protection contre les surtensions

Pour protéger les thyristors contre les surtensions on utilise une varistance (VDR - Voltage Dependand Resistor) dont la fonction fait décréter les surtensions.

Le réseau de protection RC participe également à l'écrêtage des surtensions. Les éléments R, C et VDR sont montés sur l'unité à thyristor.

La valeur des composants dépend de la tension prévue pour l'unité à thyristors.

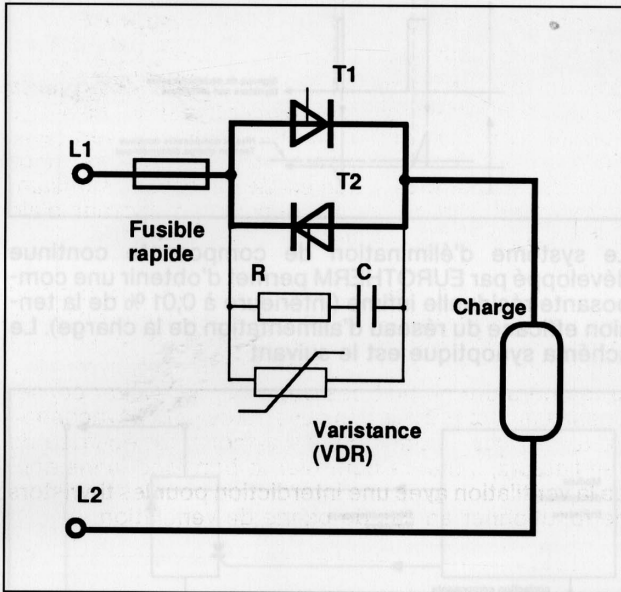


Figure 9.

Protection contre les surchauffes

Une telle protection n'est nécessaire que lorsque les conditions ambiantes sont critiques. Il faut alors prévoir un circuit de refroidissement, soit par ventilateur, soit par circulation d'eau ou d'huile. De plus une surchauffe due à un excès de courant sera facilement évitée avec un fusible adéquat. Les unités à thyristors équipées d'un ventilateur sont protégées par un dispositif interne coupant la puissance en cas de surchauffe.

Isolation

L'isolation entre le signal provenant du régulateur, et les thyristors commutant la puissance est recommandé pour plusieurs raisons : d'une part pour la sécurité de l'opérateur, d'autre part pour la protection de l'équipement qui peut être connecté à l'unité à thyristors. Une autre raison est l'élimination des retours de masse qui peuvent provoquer notamment de mauvais déclenchements.

Le signal d'entrée des séries 425S, 451-454 est isolé par opto-coupleur du reste du circuit. Pour les séries 425A, 455-458 et 461-464, les impulsions de commande sont isolées des gachettes des thyristors par un transformateur.

Boîte diagnostique

La boîte diagnostique EURO THERM, type 260 (voir photo de page 3) peut être utilisée sur les séries 455 et 460 (ainsi que sur d'autres gradateurs EURO THERM). Elle permet de faciliter les mises en service et la maintenance par mesure de 20 points des tests du circuit électronique de commande.

3

Nécessité de l'élimination de composante continue

L'apport d'énergie dans les processus de fusion ou d'affinage du verre a connu un essor important ces dernières années de part son coût de plus en plus intéressant (en particulier après la crise du pétrole de 1973), son rendement excellent et ses caractéristiques de propreté et de commodité d'emploi (pas de pollution du verre, possibilité de création de courants de convection contrôlés dans le bain de verre, favorables à son homogénéité).

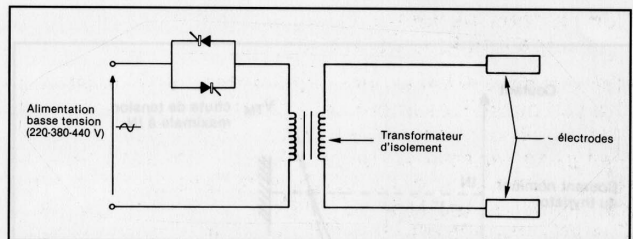
C'est pourquoi EURO THERM a développé un système de contrôle de puissance à thyristors spécialement adapté au problème du chauffage du verre par électrodes plongeantes : avec élimination de composante continue permettant de contrôler des courants de plusieurs milliers d'Ampères.

1. - Différents modes d'utilisation des thyristors pour le chauffage du verre par électrodes plongeantes

Plusieurs configurations sont possibles suivant le type d'alimentation utilisée : moyenne tension (15 à 20 kV en France) ou basse tension (220, 380 ou 440 V).

1.1. Alimentation basse tension

Pour des raisons évidentes de sécurité et de mise en œuvre (la carcasse d'un four étant impérativement reliée à la terre) ainsi que d'adaptation d'impédance le montage suivant est utilisé :

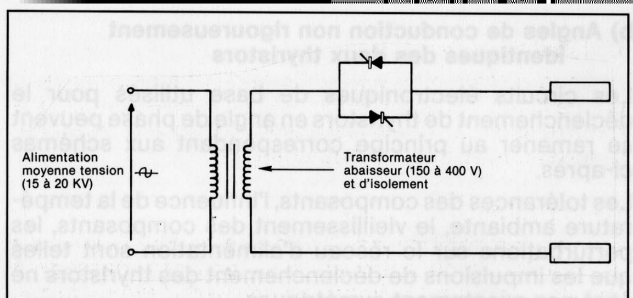


Dans ce cas, les thyristors fonctionnent en angle de phase.

L'utilisation du transformateur d'isolement évite toute présence de composante continue dans le verre.

1.2. Alimentation moyenne tension

Il est impossible d'utiliser un montage du type précédent : les tensions admissibles par les thyristors sont limitées à des réseaux industriels de l'ordre de 600 V. Les thyristors sont alors montés au secondaire d'un transformateur d'abaissement et d'isolement.



Dans cette configuration les thyristors fonctionnent également en angle de phase, le fonctionnement en train d'onde étant proscrit d'une part parce que la tension secondaire du transformateur n'est pas toujours exactement adaptée à l'impédance du verre (qui en outre peut varier suivant la qualité du verre et sa température), les électrodes pouvant être surchargées en courant et d'autre part le fonctionnement en train d'onde entraînerait des contraintes électro-mécaniques et thermiques dont on a peu d'informations sur l'incidence sur la durée de vie des électrodes.

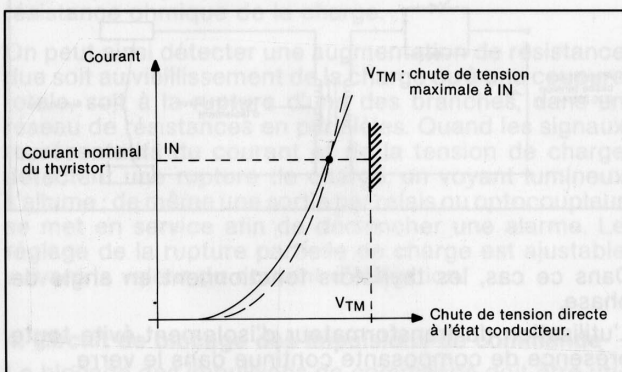
C'est dans cette configuration associée à un fonctionnement en angle de phase qu'apparaît le problème de composante continue : le courant traversant les électrodes (donc la tension à leurs bornes) doit avoir une composante continue rigoureusement nulle, sinon cette composante entraîne une électrolyse des électrodes se traduisant par les deux phénomènes physiques suivants :

- élévation de température anormale des électrodes et porte électrodes (réaction exothermique).
- usure des électrodes plus ou moins rapide suivant l'amplitude de la composante continue, électrodes dont on retrouve alors des traces dans le verre du produit fini et qui modifient ses caractéristiques mécaniques (résistance à la pression interne des bouteilles de champagne par exemple, qualité optique du verre).

Deux paramètres sont à l'origine de la composante continue : chutes de tension direction de deux thyristors anti-parallèles et principalement le système électronique d'amorçage des thyristors.

a) Disparité de chute de tension directe à l'état conducteur des thyristors

On peut y remédier en utilisant des thyristors appariés en chute de tension directe.

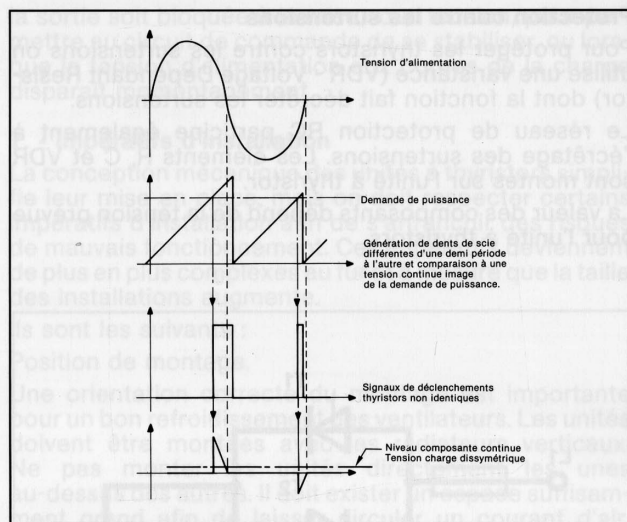


L'appariage est fait pour une seule valeur de courant si bien qu'une légère différence peut persister à d'autres niveaux de courants entraînant une légère composante continue résiduelle (de quelques millivolts à quelques dizaines de millivolts).

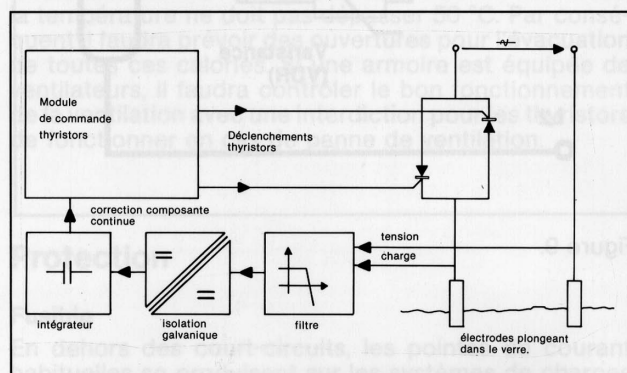
b) Angles de conduction non rigoureusement identiques des deux thyristors

Les circuits électroniques de base utilisés pour le déclenchement de thyristors en angle de phase peuvent se ramener au principe correspondant aux schémas ci-après.

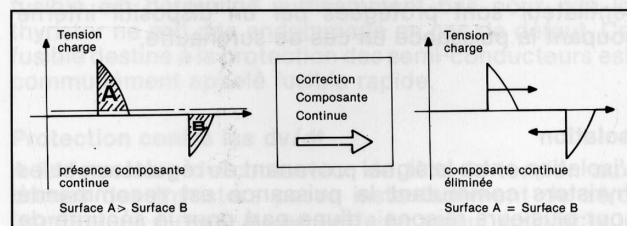
Les tolérances des composants, l'influence de la température ambiante, le vieillissement des composants, les perturbations sur le réseau d'alimentation sont telles que les impulsions de déclenchement des thyristors ne sont pas exactement symétriques.



Le système d'élimination de composante continue développé par EURO THERM permet d'obtenir une composante résiduelle infime (inférieure à 0,01 % de la tension efficace du réseau d'alimentation de la charge). Le schéma synoptique est le suivant :



L'action de la correction de composante continue permet, en modifiant le décalage relatif d'amorçage des thyristors, d'éliminer la composante continue (elle tient compte également de la disparité de chute de tension directe des thyristors, donc pas de nécessité d'appariage des semi-conducteurs).



CONCLUSION quelque soit le type d'alimentation imposé par les conditions d'utilisation, EURO THERM peut fournir un système de contrôle de puissance bien adapté à la situation offrant à la fois fiabilité et souplesse d'emploi.

En basse tension

- Utilisation de thyristors fonctionnant en angle de phase au primaire d'un transformateur de puissance si le réseau d'alimentation n'est pas isolé.
- Utilisation de thyristors fonctionnant en angle de phase si le réseau d'alimentation monophasé est isolé de la terre.

En moyenne tension

Utilisation de thyristors en angle de phase avec dispositif d'élimination de composante continue au secondaire d'un transformateur abaisseur/isolateur.