

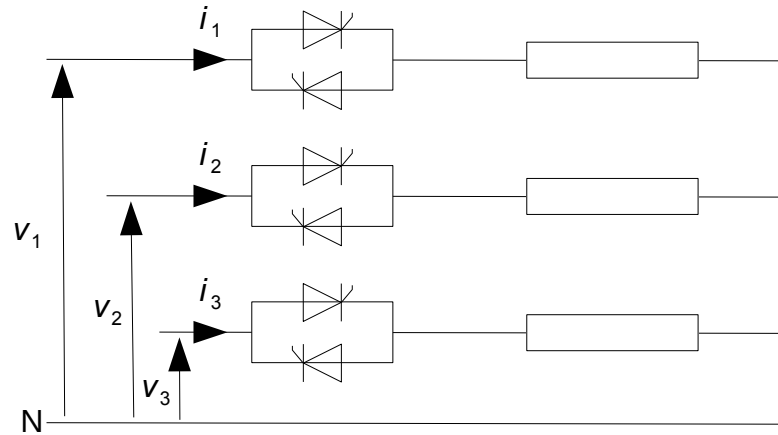
Le gradateur Monophasé

- 1° Comment disposer les interrupteurs
- 2° Trois interrupteurs sur charge étoile
- 3° Trois interrupteurs sur charge triangle
- 4° Interrupteurs avals en étoile
- 5° Montage économique
- 6° Applications

1° Comment disposer les interrupteurs

Première idée :

Utiliser trois gradateurs monophasés commandés par la même consigne.



Cette idée nécessite la présence d'un neutre sur le réseau et ce n'est que le moindre des défauts.

La forte teneur en harmoniques du courant, et notamment en harmoniques multiples de trois provoquera un très fort courant dans ce neutre.

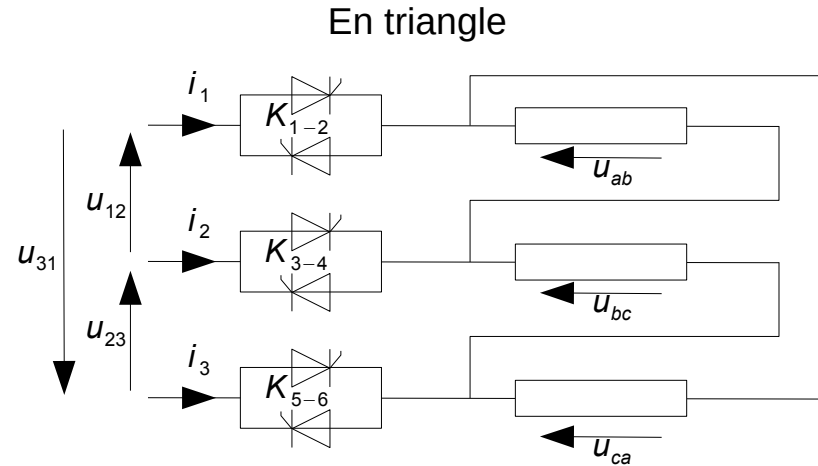
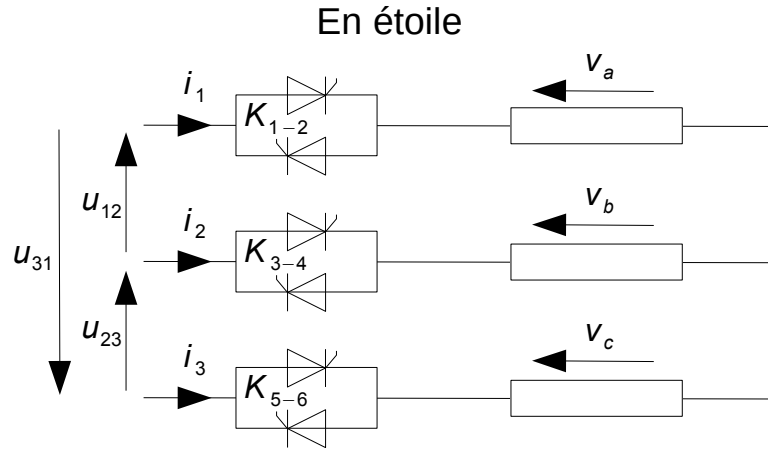
C'est donc une solution à proscrire.

Les solutions à envisager devront donc se passer du fil de neutre !

1° Comment disposer les interrupteurs

Deuxième idée :

Je garde les interrupteurs entre le réseau et la charge. La charge pourra être :



Cette idée permettra d'obtenir un fonctionnement correct, sans charger le neutre (vu qu'il n'y en a pas)

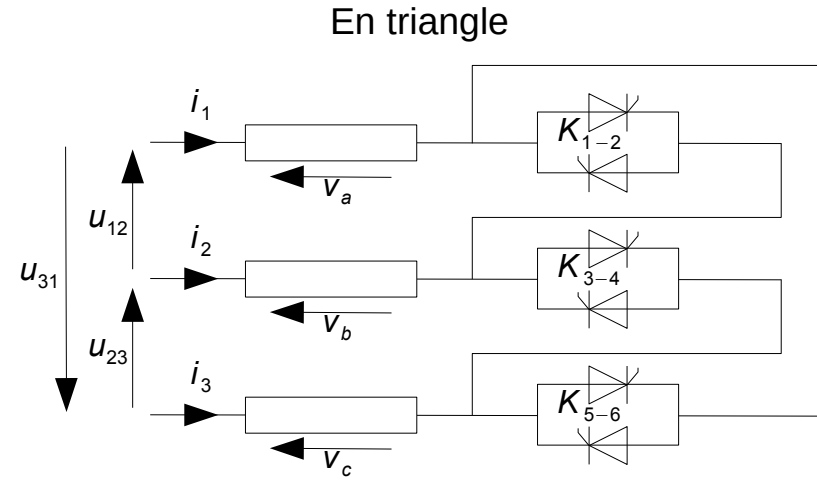
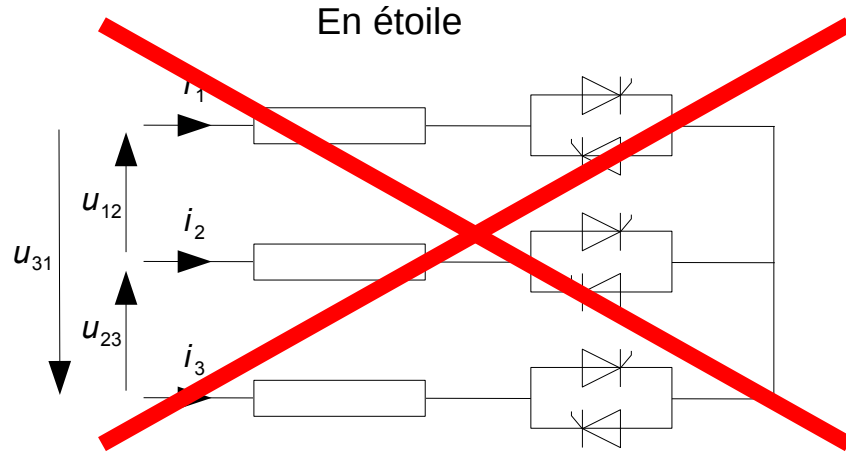
Mais attention ! Comme en monophasé, le problème des harmoniques et de la puissance déformante ne sera réglé que par un filtrage en amont du système.

Un point important à remarquer est que, pour que le courant circule, il faut obligatoirement que deux des interrupteurs soient en conduction.

1° Comment disposer les interrupteurs

Troisième idée :

J'inverse la position des interrupteurs et des charges :



Seul le choix d'une disposition en triangle est nouveau !.

Ici aussi, on aura un fonctionnement correct.

Mais cette fois, pour que le courant circule, un seul interrupteur en conduction suffit.

1° Comment disposer les interrupteurs

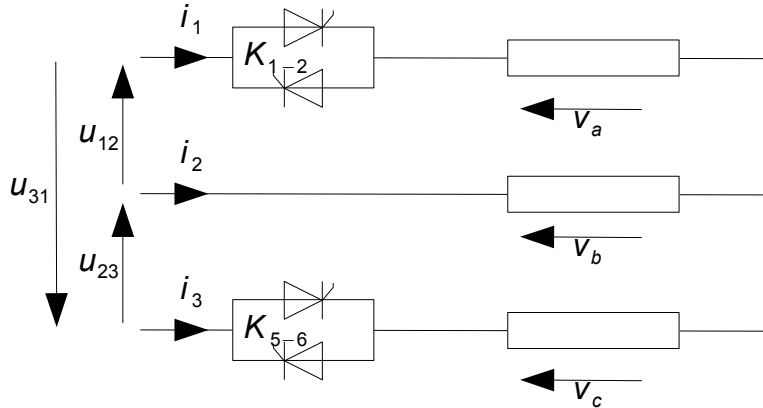
Quatrième idée : le montage « économique »

Et si on faisait des économies !!!

Si en plaçant les interrupteurs avant la charge, il doit impérativement y en avoir deux en conduction pour que le courant circule.

Pourquoi ne pas en supprimer un des trois ?

On pourra toujours contrôler le fonctionnement avec les deux autres !



Un problème apparaît : la charge du milieu fonctionnera à la fois en même temps que celle du haut et en même temps que celle du bas.

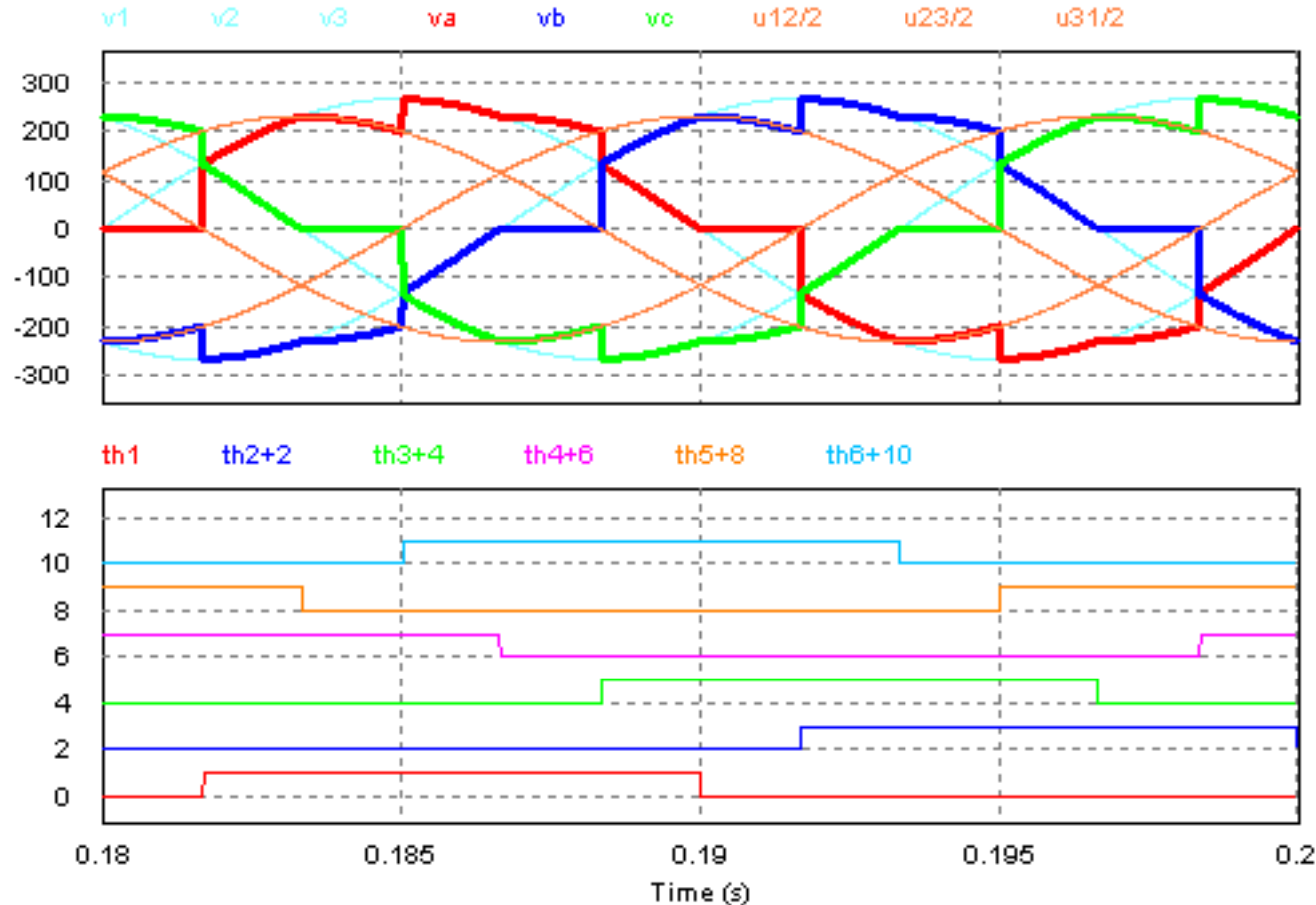
On court le risque d'un fonctionnement déséquilibré.

Sauf si les deux autres interrupteurs fonctionnent toujours simultanément.

Et c'est justement le cas lors de la commande en train d'onde.

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

a) Observation du fonctionnement :



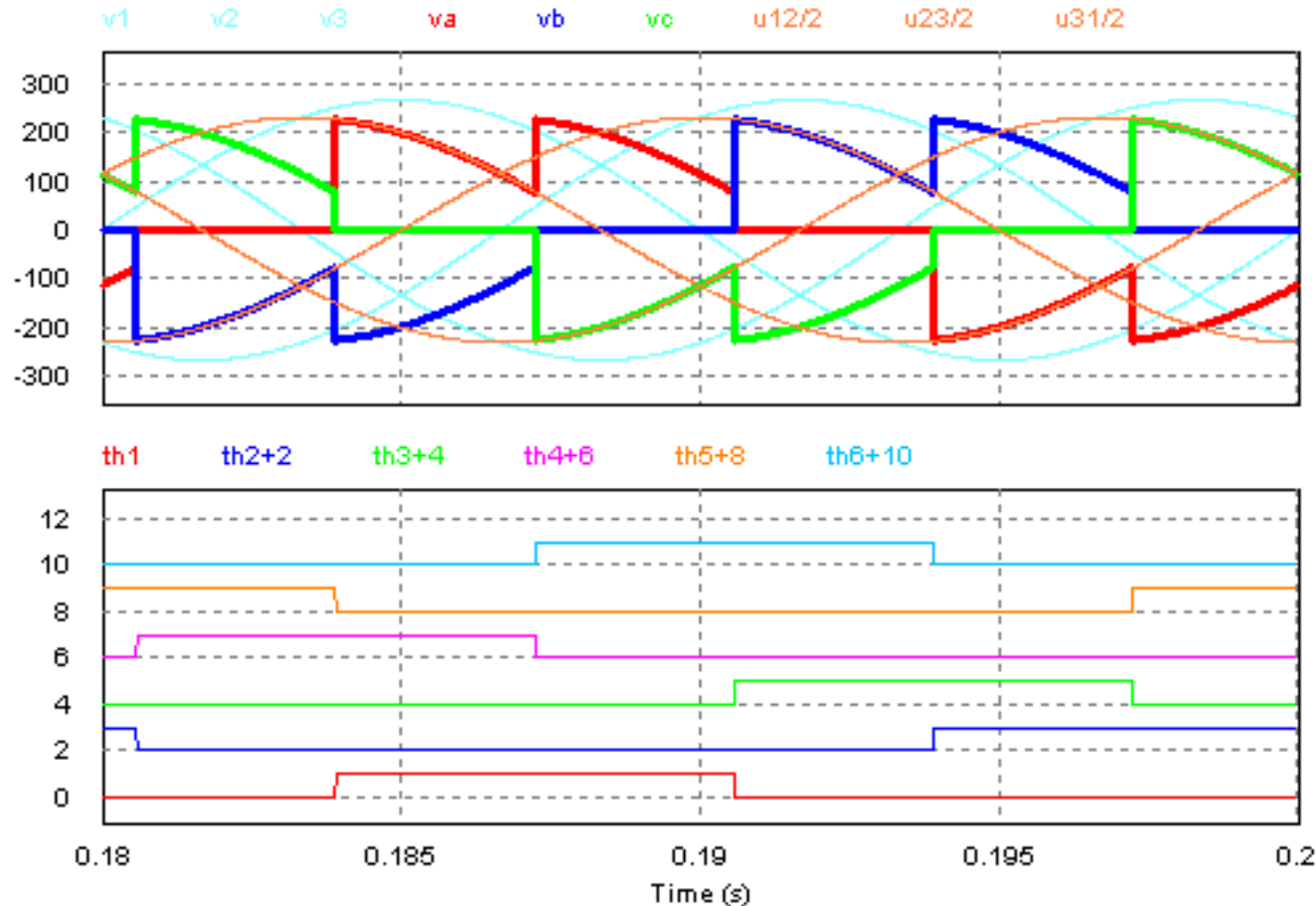
Tensions aux bornes des charges

Les courbes observées ci-contre ont été obtenues avec un retard à l'amorçage de $\alpha_0 = 30^\circ$. On applique un train d'impulsion de commande long ($1/3$ de la période).

Thyristors en conduction

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

a) Observation du fonctionnement :



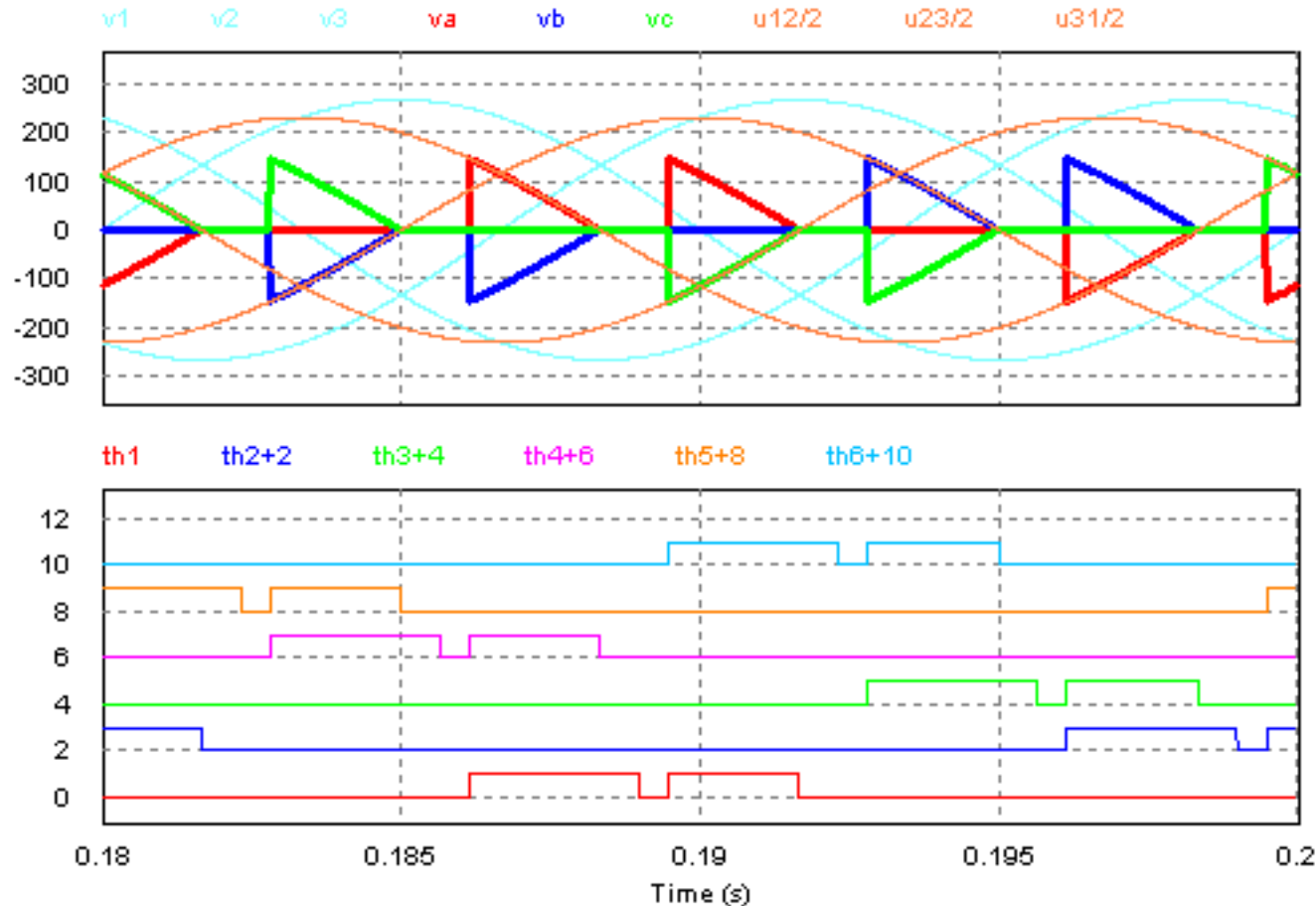
Tensions aux bornes des charges

Les courbes observées ci-contre ont été obtenues avec un retard à l'amorçage de $\alpha_0 = 70^\circ$. On applique un train d'impulsion de commande long (1/3 de la période).

Thyristors en conduction

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

a) Observation du fonctionnement :



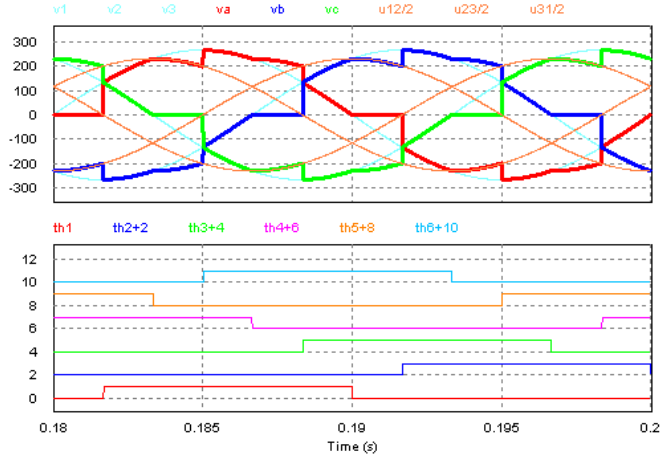
Tensions aux bornes des charges

Les courbes observées ci-contre ont été obtenues avec un retard à l'amorçage de $\alpha_0 = 110^\circ$. On applique un train d'impulsion de commande long (1/3 de la période).

Thyristors en conduction

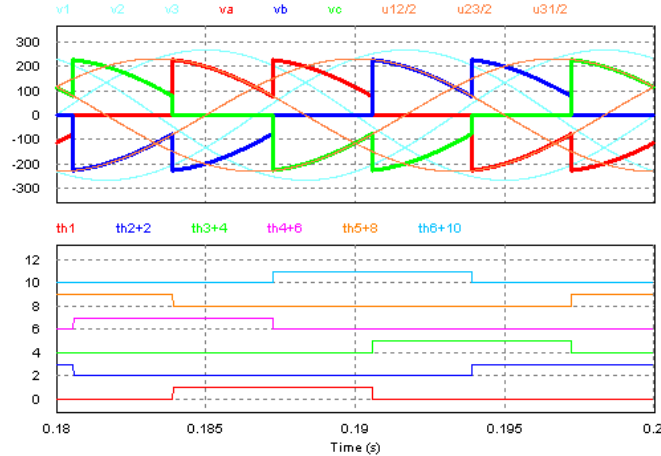
2° Trois interrupteurs sur charge étoile

a) Observation du fonctionnement :



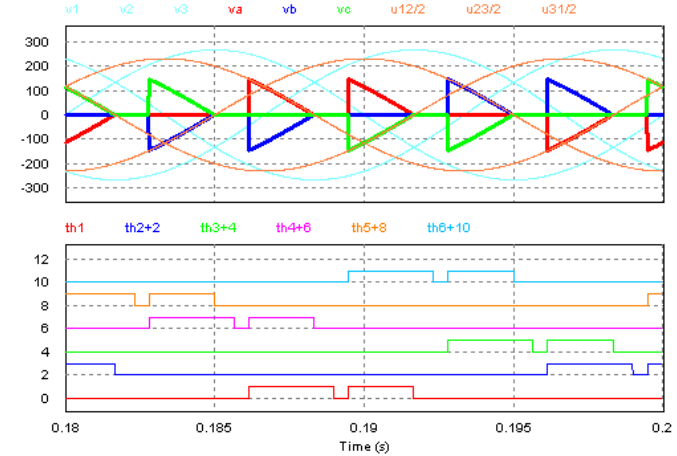
Retard à l'amorçage
entre 0° et 60°

Fonctionnement en **mode 1**



Retard à l'amorçage
entre 60° et 90°

Fonctionnement en **mode 2**



Retard à l'amorçage
entre 90° et 150°

Fonctionnement en **mode 3**

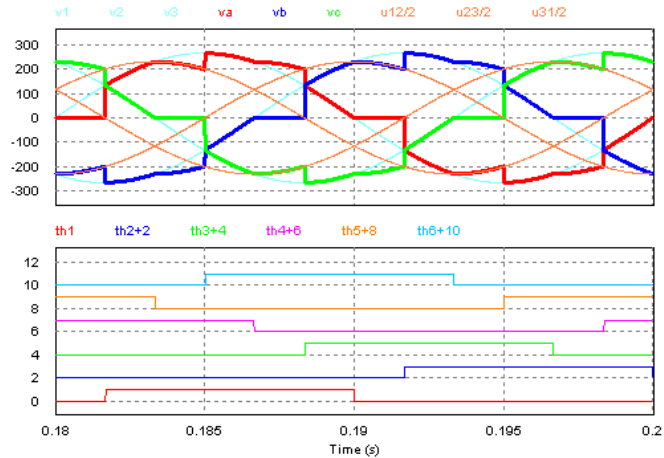
Pour s'assurer du bon fonctionnement, surtout en mode 3, les trains d'impulsions de commande des thyristors doivent être sensiblement d'une durée d'un tiers de période. En effet, On peut voir qu'il est possible que le courant s'arrête puis reprenne un peu plus tard.

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Fonctionnement en **mode 1** (α_0 compris entre 0° et 60°)

Les trois phases ont un fonctionnement identique bien que décalé de 120° .



Grâce aux symétries, on peut également constater que le fonctionnement est semblable sur les deux alternances.

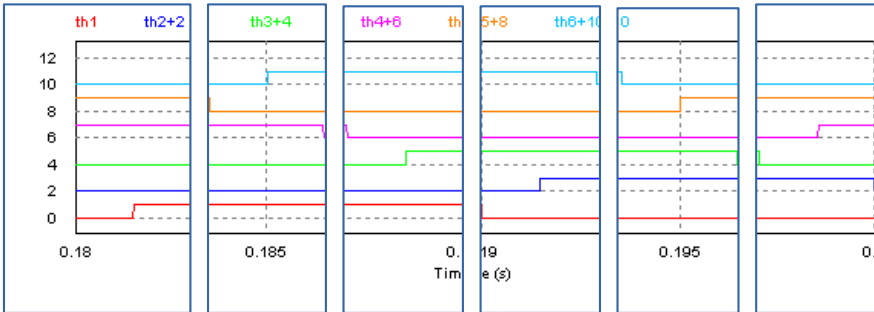
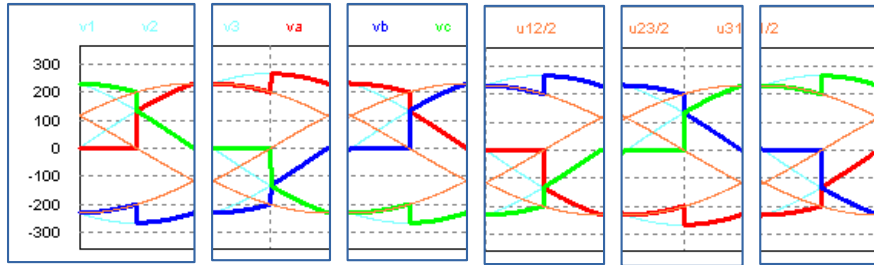
2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Fonctionnement en **mode 1**

Les trois phases ont un fonctionnement identique bien que décalé de 120° .

Grâce aux symétries, on peut également constater que le fonctionnement est semblable sur les deux alternances.



2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

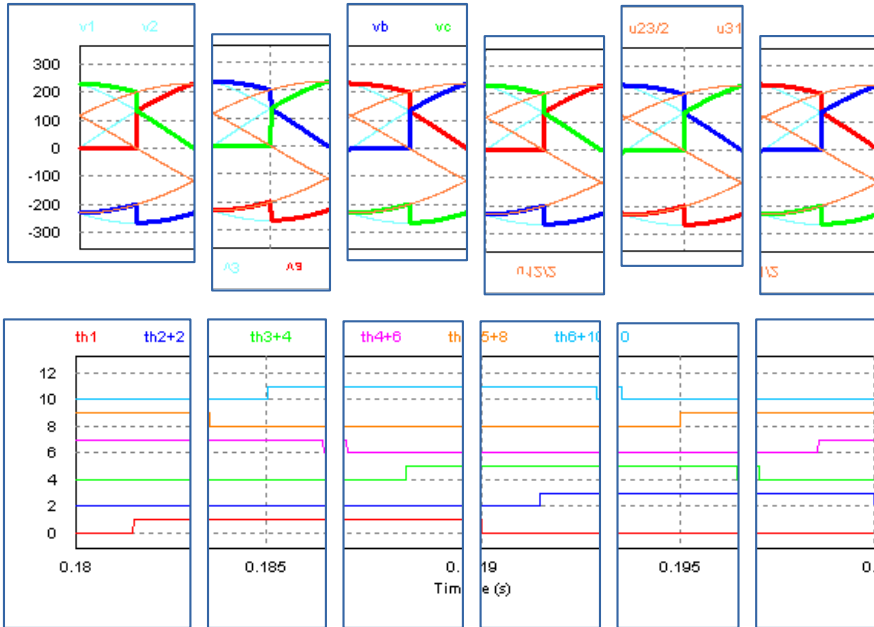
Fonctionnement en **mode 1**

Les trois phases ont un fonctionnement identique bien que décalé de 120° .

Grâce aux symétries, on peut également constater que le fonctionnement est semblable sur les deux alternances.

On ne va donc étudier le fonctionnement que sur $1/6$ de période soit 60°

Ce raisonnement pourra être appliqué aux trois modes de fonctionnement.



2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Fonctionnement en **mode 1**

Sur l'intervalle restant, on peut compter deux séquences de fonctionnement.

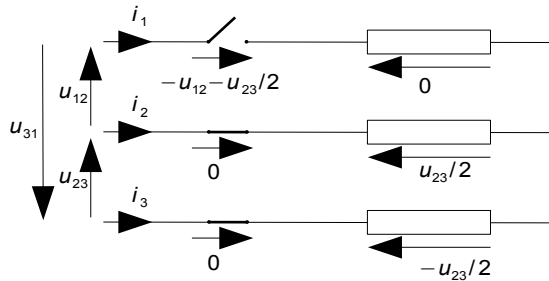
De 0° à a_0

Avant l'instant 0° Th2, Th4 et Th5 conduisaient.

A l'instant 0° la tension s'annule dans la branche 1. Le courant aussi (charge résistive).

Th2 se bloque.

Th4 et Th5 continuent de conduire.



On mesure :

$$v_a = 0 \text{ V} \quad v_b = \frac{u_{23}}{2} \quad v_c = \frac{-u_{23}}{2}$$

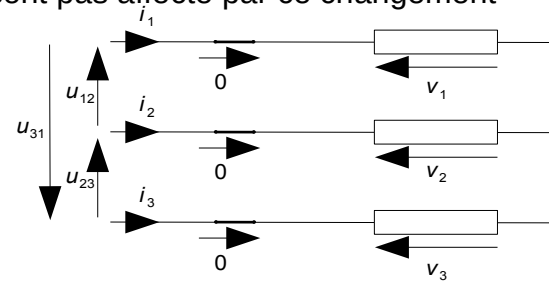
De a_0 à 60°

Avant l'instant a_0 Th4 et Th5 conduisaient.

A l'instant a_0 on commande les thyristors de l'interrupteur 1-2.

Comme sa tension est alors positive, Th1 s'amorce.

Les deux autres thyristors en conduction ne sont pas affecté par ce changement



On mesure :

$$v_a = v_1 \quad v_b = v_2 \quad v_c = v_3$$

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Le fonctionnement observé sur la première séquence se reproduit, mais en permutant les phases 1/3 de période plus tard

On reporte le fonctionnement de la phase 1 sur la 2, de la 2 sur la 3 et de la 3 sur la 1. On permute aussi les indices des tensions.

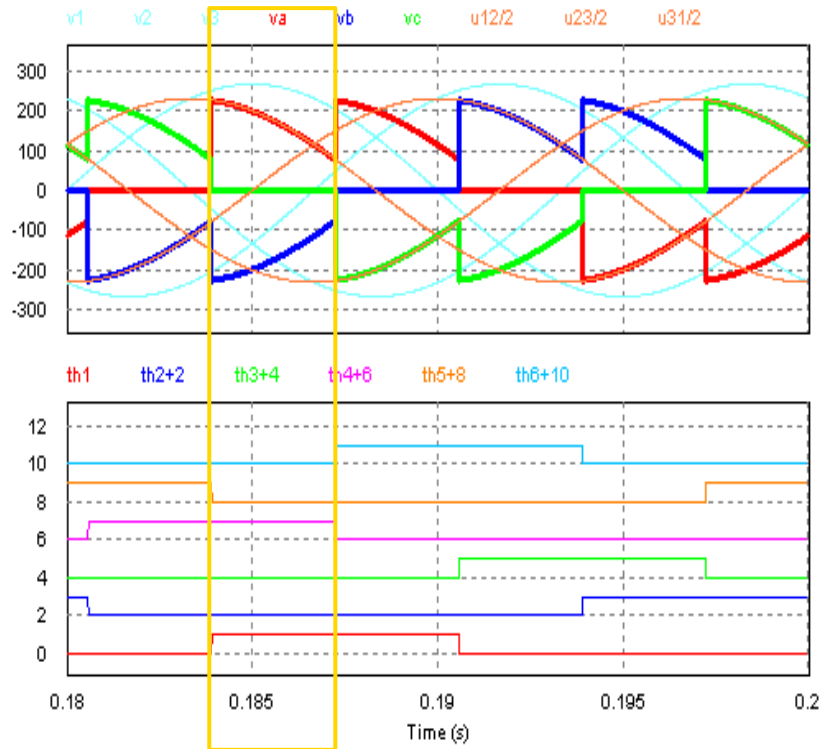
On applique la symétrie qui apparaît sur une même branche du circuit tout les 180° , on permute les fonctionnements de th1 avec th2

[illegible]

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Fonctionnement en **mode 2** (a_0 compris entre 60° et 90°)



Comme pour le mode 1, on retrouve une répétition tous les 120° et une symétrie par phase décalée de 180° .

On va donc également étudier le fonctionnement sur $1/6$ de période.

Le plus simple est de faire cette étude de a_0 à a_0+60° .

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Fonctionnement en **mode 2**

Sur l'intervalle restant, il n'y a qu'une séquence de fonctionnement.

De α_0 à $\alpha_0 + 60^\circ$

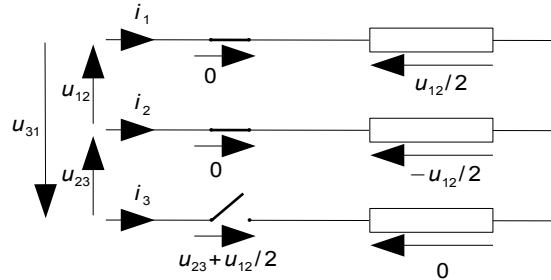
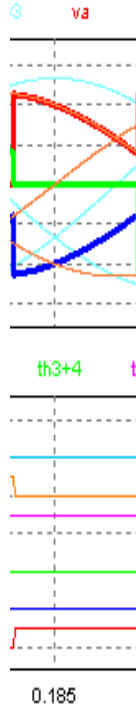
Avant l'instant α_0 , Th4 et Th5 conduisaient.

A l'instant α_0 On commande Th1.

Comme sa tension était positive il s'amorce.

L'amorçage de Th1 détourne le courant qui passait dans Th5. Th5 se bloque.

Th4 continue de conduire.



On mesure :

$$v_a = \frac{u_{12}}{2} \quad v_b = \frac{-u_{12}}{2} \quad v_c = 0V$$

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement en mode 2:

	a_0 a_0+60	a_0+60 a_0+120	a_0+120 a_0+180	a_0+180 a_0+240	a_0+240 a_0+300	a_0+300 a_0+360
Th1	X					
Th2						
Th3						
Th4	X					
Th5						
Th6						
va	$\frac{u_{12}}{2}$					
vb	$-\frac{u_{12}}{2}$					
vc	0V					

Le fonctionnement observé sur la première séquence se reproduit, mais en permutant les phases 1/3 de période plus tard.

On reporte le fonctionnement de la phase 1 sur la 2,
de la 2 sur la 3
et de la 3 sur la 1.
On permute aussi les indices des tensions.

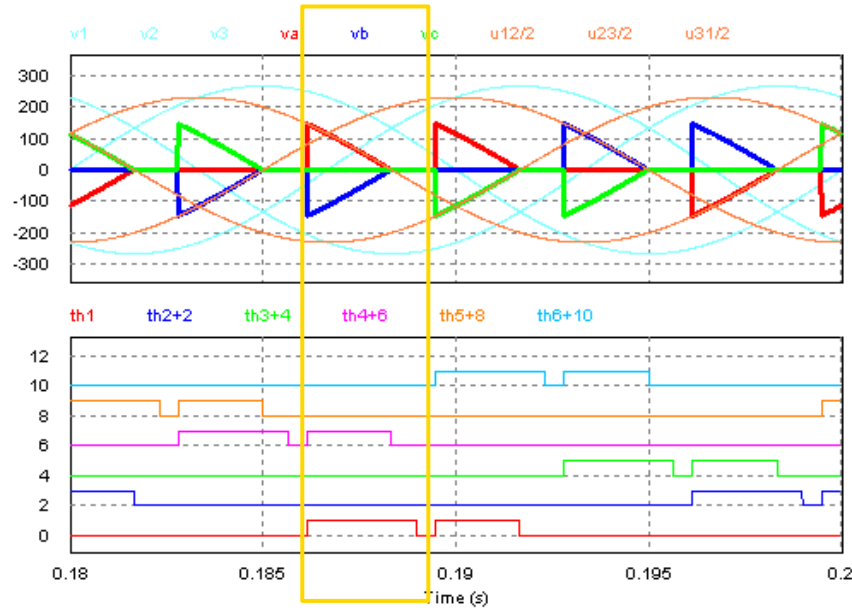
On applique la symétrie qui apparaît sur une même phase tous les 180°

On permute les fonctionnements de th1 avec th2, de th3 avec th4 et de th5 avec th6. Les expressions des tensions restent inchangées.

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Fonctionnement en **mode 3** (a_0 compris entre 90° et 150°)



Comme pour les mode 1 et 2, on retrouve une répétition tous les 120° et une symétrie par phase décalée de 180° .

On va donc également étudier le fonctionnement sur $1/6$ de période.

Le plus simple est de faire cette étude de a_0 à $a_0 + 60^\circ$.

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

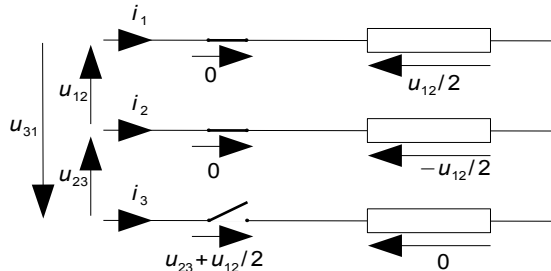
Fonctionnement en **mode 3**

Sur l'intervalle restant, on peut compter deux séquences de fonctionnement.

De a_0 à 150°

Avant l'instant a_0 aucun thyristor ne conduit, mais Th4 reçoit toujours des impulsions de commande. (les thyristors doivent être commandé par un train d'impulsions d'au moins 150°)

On commande alors Th1 dont la tension est positive. Il se met à conduire.
Th4 dont la tension est aussi positive se remet à conduire.



On mesure :

$$v_a = \frac{u_{12}}{2} \quad v_b = \frac{-u_{12}}{2} \quad v_c = 0V$$

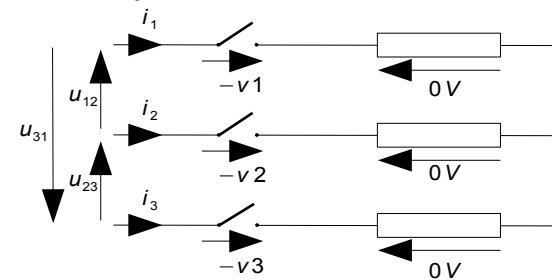
De 150° à $a_0 + 60^\circ$

Avant l'instant 150° Th1 et Th4 conduisaient.

A l'instant 150° u_{12} s'annule. Le courant dans les deux thyristors s'annule aussi, ils se bloquent.

Toutefois, on continue d'envoyer des impulsions sur Th1. Il pourra se réamorcer si une autre branche permet le passage du courant.

Aucun thyristor ne conduit



On mesure :

$$v_a = 0V \quad v_b = 0V \quad v_c = 0V$$

2° Trois interrupteurs sur charge étoile

b) Description des séquences de fonctionnement :

Le fonctionnement observé sur la première séquence se reproduit, mais en permutant les phases 1/3 de période plus tard

On reporte le fonctionnement de la phase 1 sur la 2, de la 2 sur la 3 et de la 3 sur la 1. On permute aussi les indices des tensions.

On applique la symétrie qui apparaît sur une même branche du circuit tout les 180° , on permute les fonctionnements de th1 avec th2

[illegible]

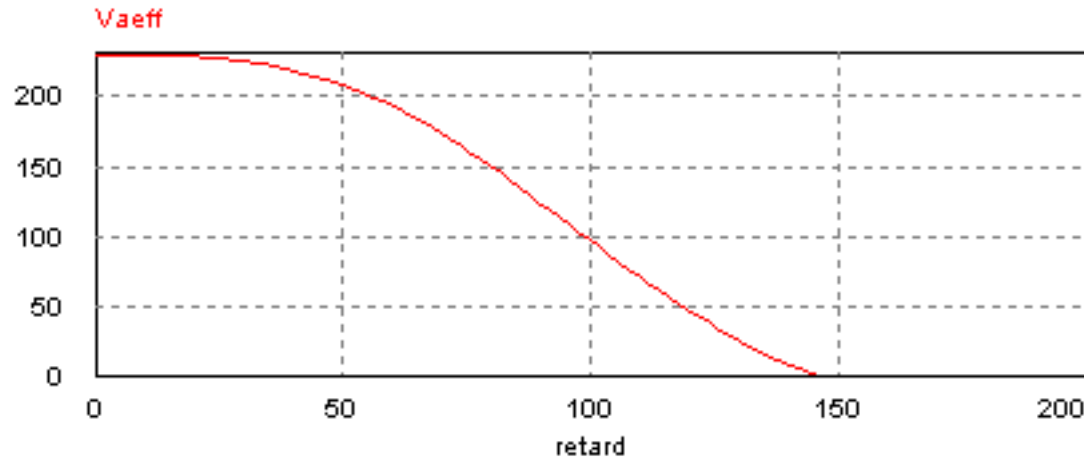
2° Trois interrupteurs sur charge étoile

c) Valeur efficace : synthèse

$$V_s = V \cdot \sqrt{1 - \frac{3 \cdot a_0}{4 \cdot \pi} + \frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(2 \cdot a_0)}$$

$$V_s = V \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{4 \cdot \pi} \cdot \sin\left(2 \cdot a_0 + \frac{\pi}{6}\right)}$$

$$V_s = V \cdot \sqrt{\frac{5}{4} - \frac{3 \cdot a_0}{2 \cdot \pi} + \frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \sin\left(2 \cdot a_0 + \frac{\pi}{3}\right)}$$



Si on a observé trois modes de fonctionnements différents et obtenu trois fonctions pour exprimer la valeur efficace.

On peut voir que la variation est en fait une fonction continue et permet un réglage de la tension de sortie de 0 à V en agissant sur le retard.