

GENIE ELECTRIQUE

Conversion statique d'énergie

Michel Piou

Conversion AC → DC (Redressement triphasé) Chapitre V

Edition 24/11/2010

Extrait de la ressource en ligne *PowerElecPro* sur le site Internet iutenligne.net

Table des matières

1 POURQUOI ET COMMENT ?	1
2 SYNTHÈSE DE CONVERTISSEURS TRIPHASÉS AC → DC	2
2.1 Synthèse de convertisseurs AC → DC établissant une liaison directe entre une source de tension triphasée à une charge inductive	2
2.1.1 Convertisseur de tensions simples:	2
2.1.2 Convertisseur de tensions composées:	4
3 ÉTUDE DES CONVERTISSEURS AC → DC À DIODES	7
3.1 Notion de commutateur à diodes	7
3.2 Classification des ponts de diodes triphasés	7
3.3 Exemple d'un P3 à diodes avec une charge R	8
3.4 Exemple d'un PD3 à diodes en conduction continue	10
3.5 Exemple d'un PD3 à diodes en panne partielle	12
4 ÉTUDE DES CONVERTISSEURS AC → DC À THYRISTORS	13
4.1 Fonction d'un thyristor	13
4.2 Commutation des associations de thyristors	13
4.3 Classification des ponts à Thyristors triphasés	14
4.4 Exemple d'un PD3 à 6 thyristors en régime permanent	15
5 PROBLÈMES ET EXERCICES	18
Chap 5. Exercice 1 : PD 3 à diodes suite à une erreur de branchement	18
Chap 5. Exercice 2 : Redresseur hexaphasé à diodes	19
Chap 5. Exercice 3 : Pont redresseur triphasé à diodes débitant sur une charge capacitive	21
Chap 5. Exercice 4 : Pont redresseur triphasé mixte	23
Chap 5. Exercice 5 : Défaillance dans un pont redresseur mixte	25
Chap 5. Exercice 6 : PD3 tout thyristor en onduleur assisté	26
6 ANNEXE : PUISSANCE EN TRIPHASÉ ÉQUILIBRÉ	28
7 CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE	29
8 RÉPONSES AUX QUESTIONS DU COURS	30

Copyright : droits et obligations des utilisateurs

Ce document est extrait de la ressource *PowerElecPro* qui est disponible en version numérique sur le site Internet *IUT en ligne*

Je ne renonce pas à ma qualité d'auteur et aux droits moraux qui s'y rapportent du fait de la publication de mon document.

Les utilisateurs sont autorisés à faire un usage non commercial, personnel ou collectif, de ce document et de la ressource *PowerElecPro*, notamment dans les activités d'enseignement, de formation ou de loisirs. Tout ou partie de cette ressource ne doit pas faire l'objet d'une vente - en tout état de cause, une copie ne peut pas être facturée à un montant supérieur à celui de son support.

Pour tout extrait de ce document, l'utilisateur doit maintenir de façon lisible le nom de l'auteur *Michel Piou*, la référence à *PowerElecPro* et au site *Internet IUT en ligne*.

Michel PIOU - Agrégé de génie électrique – IUT de Nantes - FRANCE

LA CONVERSION TRIPHASEE AC → DC

1 POURQUOI ET COMMENT ?

Prérequis :

Le premier chapitre « introduction à l'électronique de puissance », le second chapitre « Conversion DC→DC. Convertisseurs à liaison directe et indirecte », le troisième chapitre « Conversion DC→AC. Onduleurs » et le quatrième chapitre « Conversion AC→DC redressement monophasé ».

Objectifs :

Dans le chapitre précédent, nous avons utilisé une démarche précise pour étudier les montages redresseurs monophasés. Nous allons continuer à exploiter cette méthode pour les « ponts redresseurs triphasés » (en présence de réseaux de tensions alternatives sinusoïdales triphasées).

Dans ce chapitre, nous mettrons également l'accent sur l'**utilisation des courbes alternatives sinusoïdales triphasées équilibrées**.

Lorsque ces outils seront bien maîtrisés, on pourra envisager le comportement de quelques convertisseurs en cas de panne partielle.

Méthode de travail :

Comme les précédents, ce chapitre mobilise les connaissances sur les bases de l'électricité. Il est donc important de le travailler page après page pour acquérir l'**entraînement** à l'utilisation de ces lois dans des contextes divers.

Travail en autonomie :

Pour permettre une étude du cours de façon autonome, les réponses aux questions du cours sont données en fin de document.

On trouvera des compléments dans la ressource en ligne « PowerElecPro »

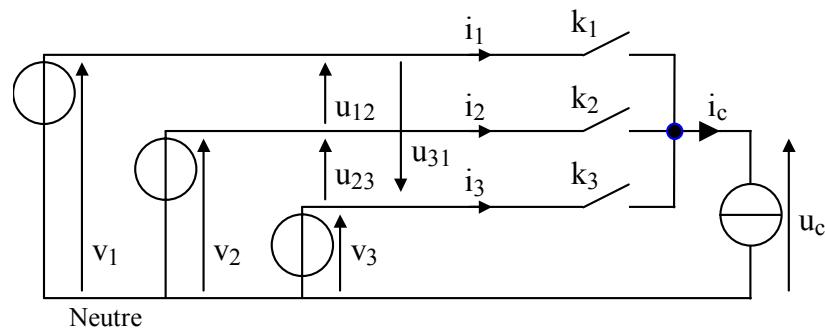
Temps de travail estimé pour un apprentissage de ce chapitre en autonomie : 17h

2 SYNTHÈSE DE CONVERTISSEURS TRIPHASÉS AC → DC.

2.1 Synthèse de convertisseurs AC → DC établissant une liaison directe entre une source de tension triphasée à une charge inductive.

On se contentera d'étudier deux types de convertisseurs AC→DC dont la source est une source triphasée et dont la charge est symbolisée par une source de courant i_c ::

2.1.1 Convertisseur de tensions simples:



Avec le convertisseur ci-dessus, si $i_c(t) \neq 0$: un et un seul interrupteur doit être fermé à la fois:

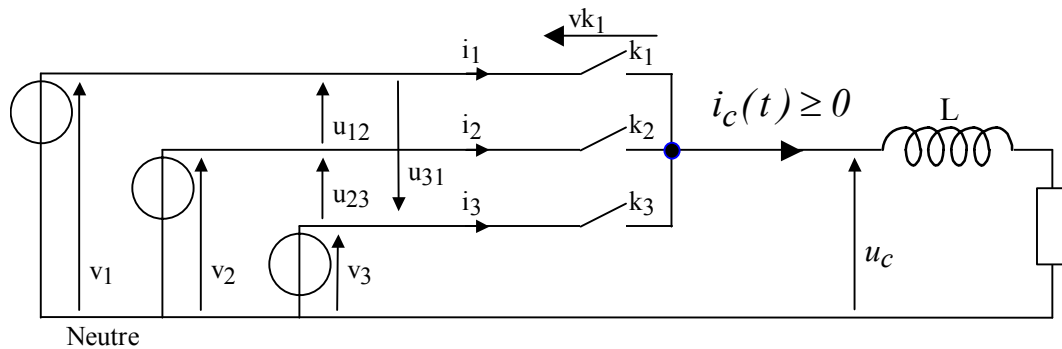
- pour éviter un court-circuit de la source « tension » triphasée
- pour éviter une ouverture de la source « courant ».

Par la fermeture de k_1 , k_2 ou k_3 , la tension $u_c(t)$ peut s'identifier à l'une ou l'autre des trois tensions simples disponibles: $v_1(t)$, $v_2(t)$ ou $v_3(t)$.

Avec ce convertisseur, par une commande des interrupteurs convenablement choisie, on peut obtenir en sortie de multiples formes de tension $u_c(t)$.

Exemple : Synthèse d'un P3 délivrant une tension la plus grande possible à une charge inductive (à partir des tensions simples).

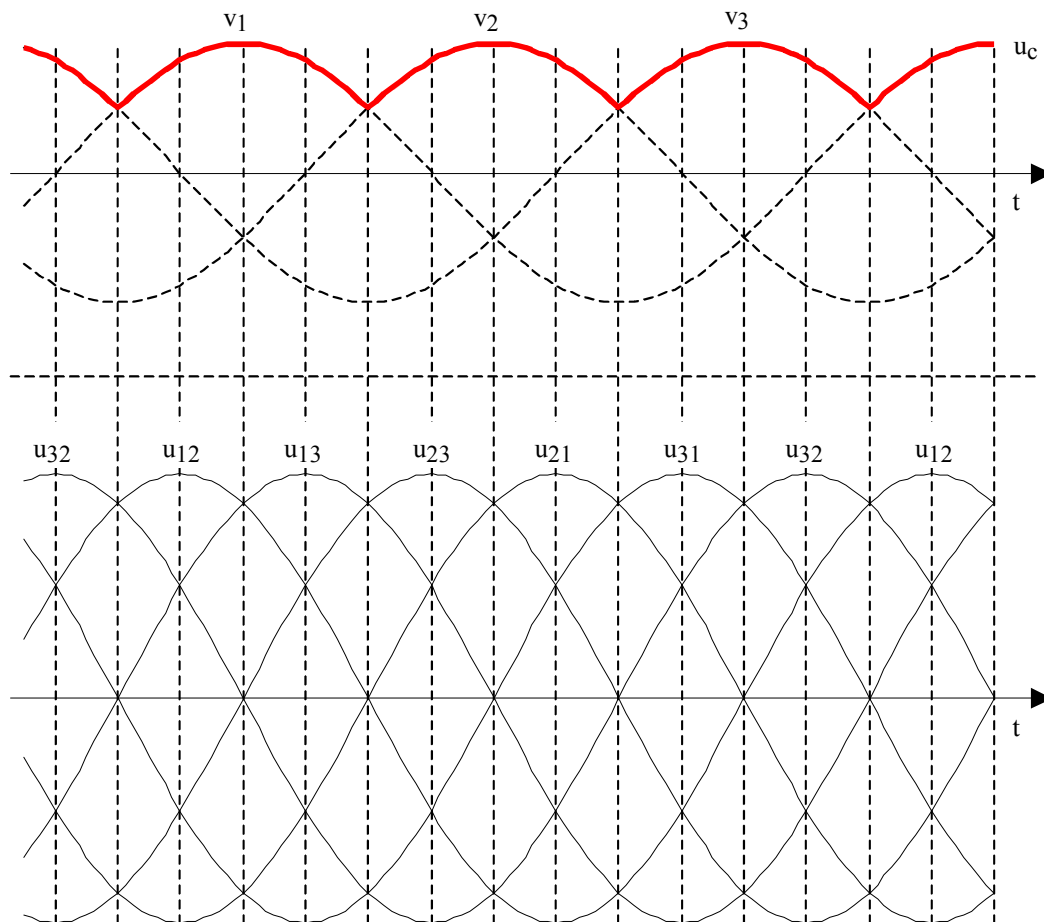
On souhaite, à partir du convertisseur ci-dessous, obtenir en sortie la tension $u_c(t)$ suivante



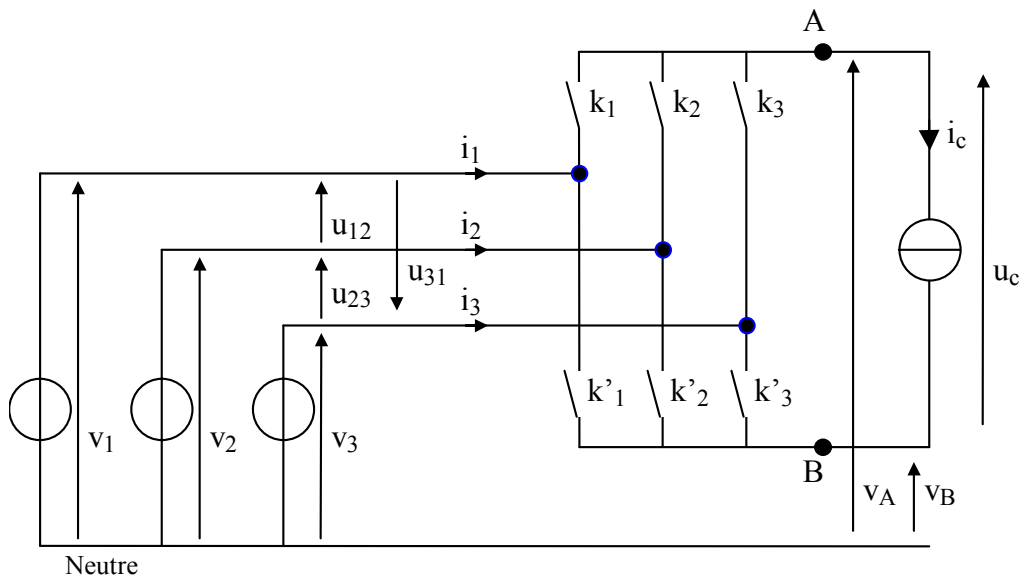
a) Indiquer sous le graphe des tensions simples ($v_1(t)$, $v_2(t)$, $v_3(t)$) et de $u_c(t)$ (en gras), l'intervalle de conduction de chaque interrupteur. (Pour faciliter les choses, les interrupteurs portent le même numéro que la phase à laquelle ils sont associés).

b) Représenter $vk_1(t)$.

On constate que lorsque k_1 est passant, il est traversé par un courant $i_1 = i_c$ positif, et lorsqu'il est bloqué, la tension vk_1 est négative. k_1 peut donc être réalisé par une diode. Il en est de même pour k_2 et k_3 . Placer les diodes sur le schéma ci-dessus. (Réponse 1:)



2.1.2 Convertisseur de tensions composées:



Avec le convertisseur ci-dessus, si $i_c(t) \neq 0$:

- un et un seul interrupteur doit être fermé à la fois parmi k_1 , k_2 et k_3
- un et un seul interrupteur doit être fermé à la fois parmi k'_1 , k'_2 et k'_3 .

(pour éviter un court-circuit de la source "tension" triphasée)
 (pour éviter une ouverture de la charge courant)

Par la fermeture de k_1 , k_2 ou k_3 , la tension $v_A(t)$ s'identifie à l'une ou l'autre des trois tensions simples disponibles: $v_1(t)$, $v_2(t)$ ou $v_3(t)$.

Par la fermeture de k'_1 , k'_2 ou k'_3 , la tension $v_B(t)$ s'identifie à l'une ou l'autre des trois tensions simples disponibles: $v_1(t)$, $v_2(t)$ ou $v_3(t)$

$u_c(t) = v_A(t) - v_B(t) \Rightarrow$ Par la fermeture de k_1 , k_2 ou k_3 et de k'_1 , k'_2 ou k'_3 , la tension $u_c(t)$ s'identifie à l'une ou l'autre des six tensions composées disponibles: $u_{12}(t)$, $u_{21}(t)$, $u_{23}(t)$, $u_{32}(t)$, $u_{31}(t)$ ou $u_{13}(t)$, ou, si les points A et B sont reliés à la même phase en entrée, $u_c(t) = 0$.

Ce qui fait au total 7 possibilités pour $u_c(t)$ à chaque instant si $i_c(t) \neq 0$.

Avec ce convertisseur, par une commande des interrupteurs convenablement choisie, on peut obtenir en sortie de multiples formes de tension $u_c(t)$.

Exemple : synthèse d'un PD3 délivrant une tension de valeur moyenne positive réglable à une charge en conduction continue.

On souhaite obtenir en sortie du convertisseur de la page suivante les tensions $v_A(t)$ et $v_B(t)$ indiquées (en gras).

Sachant que l'objectif est d'obtenir une tension dont la valeur moyenne est positive, on a choisi pour $v_B(t)$ la tension la plus négative possible parmi les tensions simples disponibles.

C'est en jouant sur l'intervalle de retard τ de la tension $v_A(t)$ (cf la courbe de $v_A(t)$) qu'on obtient la tension moyenne variable:

- si $\tau = 0 \rightarrow V_{A_{moy}}$ est maximum

- si $\tau = \frac{T}{2} \rightarrow V_{A_{moy}}$ est minimum ($v_A(t)$ est alors confondu avec $v_B(t)$)

- si $0 < \tau < \frac{T}{2} \rightarrow V_{A_{moy}}$ est variable.

Par la suite, on se placera dans l'hypothèse $i_c(t) \geq 0$ et $0 < \tau < \frac{T}{2}$.

Comme pour les études précédentes (voir les graphes page suivante) :

a) Indiquer sous le graphe des tensions simples ($v_1(t)$, $v_2(t)$, $v_3(t)$) et de $v_A(t)$ et $v_B(t)$, l'intervalle de conduction de chaque interrupteur. (Pour faciliter les choses, les interrupteurs portent le même numéro que la phase à laquelle ils sont associés. L'intervalle de conduction de k_1 , k_2 et k_3 sera indiqué sur une ligne et l'intervalle de conduction de k'_1 , k'_2 et k'_3 sera indiqué sur une seconde ligne).

A partir des intervalles de conduction des interrupteurs correspondant aux graphes de $v_A(t)$ et $v_B(t)$, en déduire le graphe de $u_c(t)$ (à représenter sur le même réseau de courbes triphasées)

b) Représenter $vk_1(t)$ et $vk'_1(t)$ avec deux couleurs différentes sur le second réseau de courbes triphasées de la page suivante. (utiliser si possible des surligneurs).

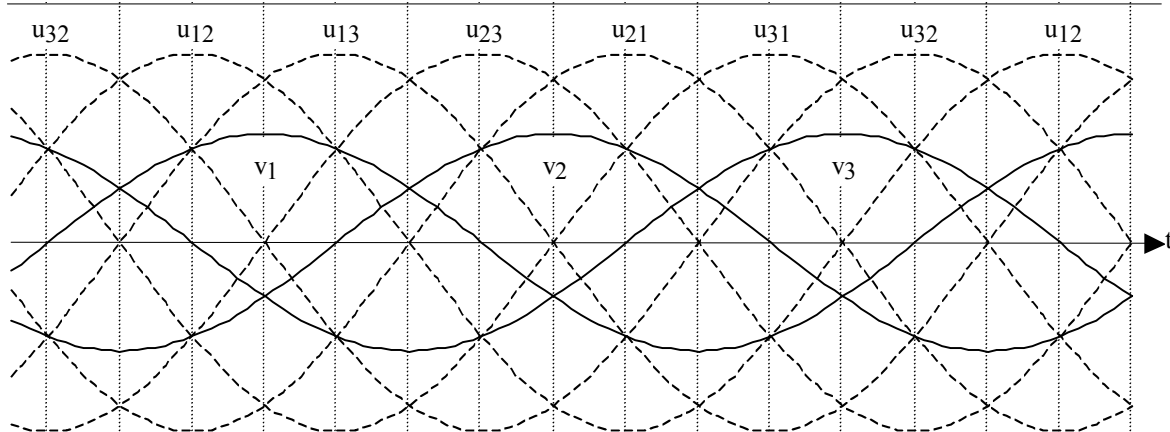
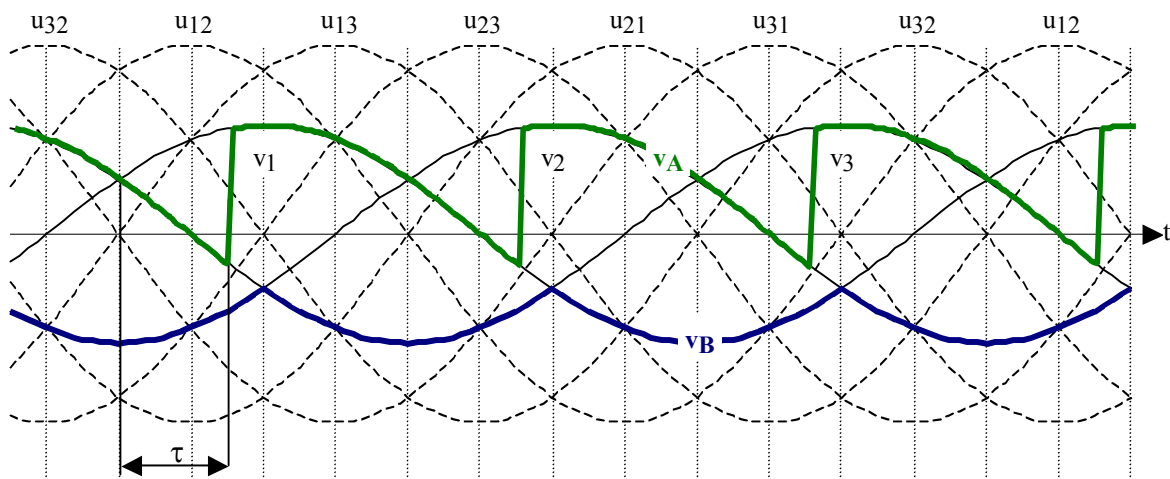
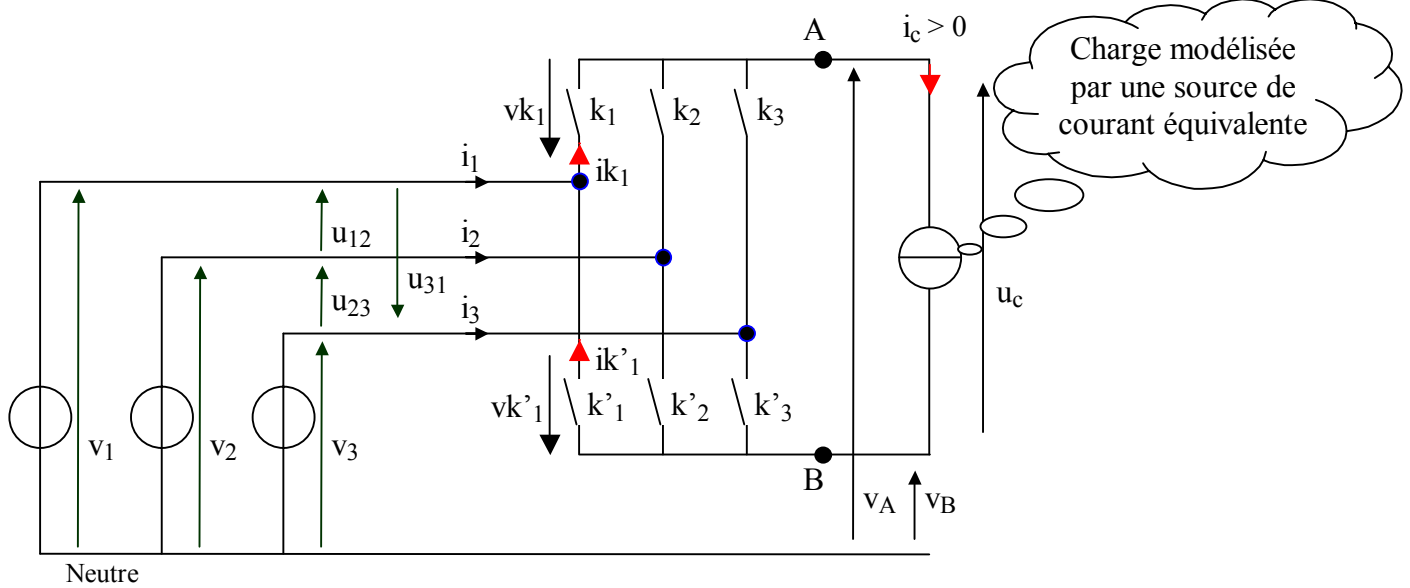
c) On constate que, lorsque k'_1 n'est pas passant, la tension $v_{k'_1}$ est négative. Lorsque k'_1 est passant : $i_{k'_1}(t) = i_c(t) \geq 0$, on en déduit que k'_1 est une diode (et de même pour k'_2 et k'_3).

A partir de la connaissance de la tension $v_{k_1}(t)$ et sachant que $i_{k_1}(t) = i_c(t) \geq 0$ lorsque k_1 est passant, on en déduit (par une méthode hors programme) que k_1 est un thyristor (et de même pour k_2 et k_3).

Représenter le schéma du convertisseur en y figurant la fonction de chaque interrupteur.

(Réponse 2:)

Astuce : Les interrupteurs ont été numérotés avec les mêmes numéros que les phases pour faciliter le repérage et réduire les risques d'erreurs.

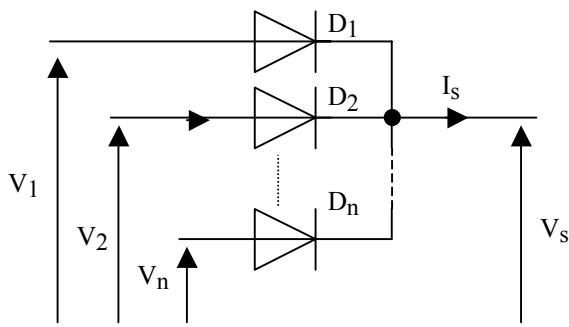


3 ETUDE DES CONVERTISSEURS AC → DC A DIODES.

3.1 Notion de commutateur à diodes

Pour plus de détails, se reporter au chapitre précédent : « Chapitre IV Conversion AC→DC (redressement monophasé) »

- Un assemblage de n diodes reliées par leur cathode est dit "**commutateur plus positif**" ou « **association de diodes à cathode commune** ».

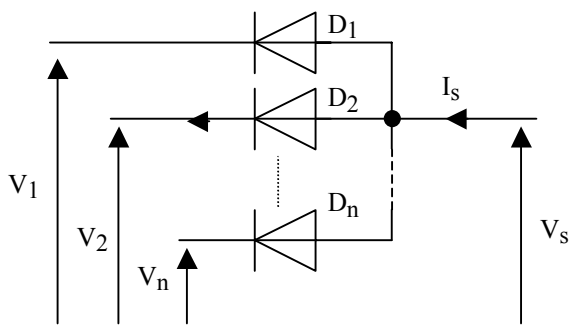


Commutateur Plus Positif:

Si $i_s(t) > 0$, à chaque instant, la diode conductrice est celle dont le potentiel d'anode est le plus élevé; et donc

$$v_s(t) = \sup(v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t))$$

- Un assemblage de n diodes reliées par leur anode est dit "**commutateur plus négatif**" ou « **association de diodes à anode commune** ».



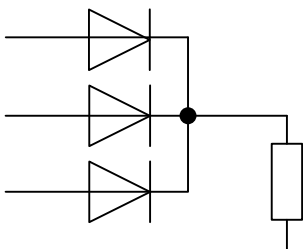
Commutateur Plus Négatif:

Si $i_s(t) > 0$, à chaque instant, la diode conductrice est celle dont le potentiel de cathode est le plus faible; et donc

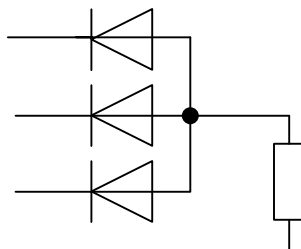
$$v_s(t) = \inf(v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t))$$

3.2 Classification des ponts de diodes triphasés

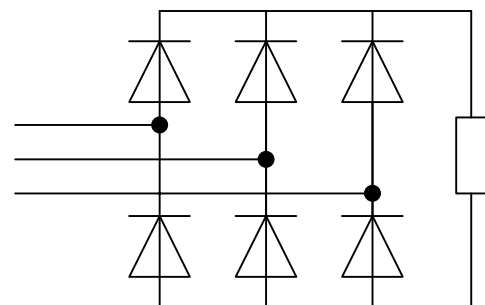
- Ponts parallèles simples** : un seul commutateur, plus positif ou plus négatif.
- Ponts parallèles doubles** : deux commutateurs, un plus positif et un plus négatif.



P3 (plus positif)



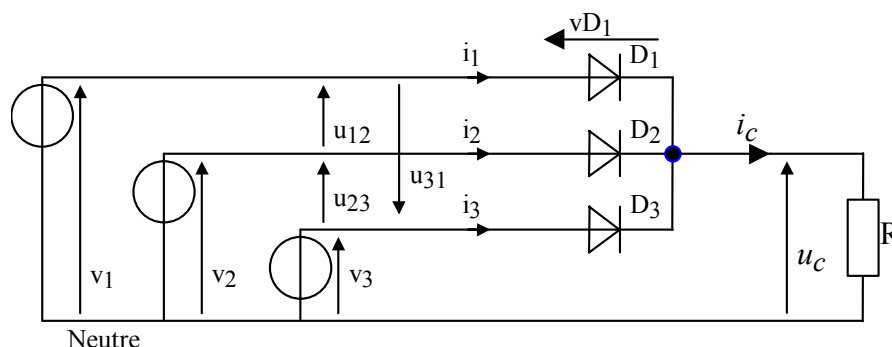
P3 (plus négatif)



PD3

3.3 Exemple d'un P3 à diodes avec une charge R.

(Réponse 3:)



Hypothèse : la conduction est continue dans la charge R. Autrement dit, $i_c(t) > 0$ (Ce qui sera vérifié à posteriori).

① Après avoir remarqué que D_1 , D_2 et D_3 constituent un commutateur plus positif, déterminer et représenter les intervalles de conduction des diodes (1^{er} ligne pointillée sous les courbes de la page suivante).

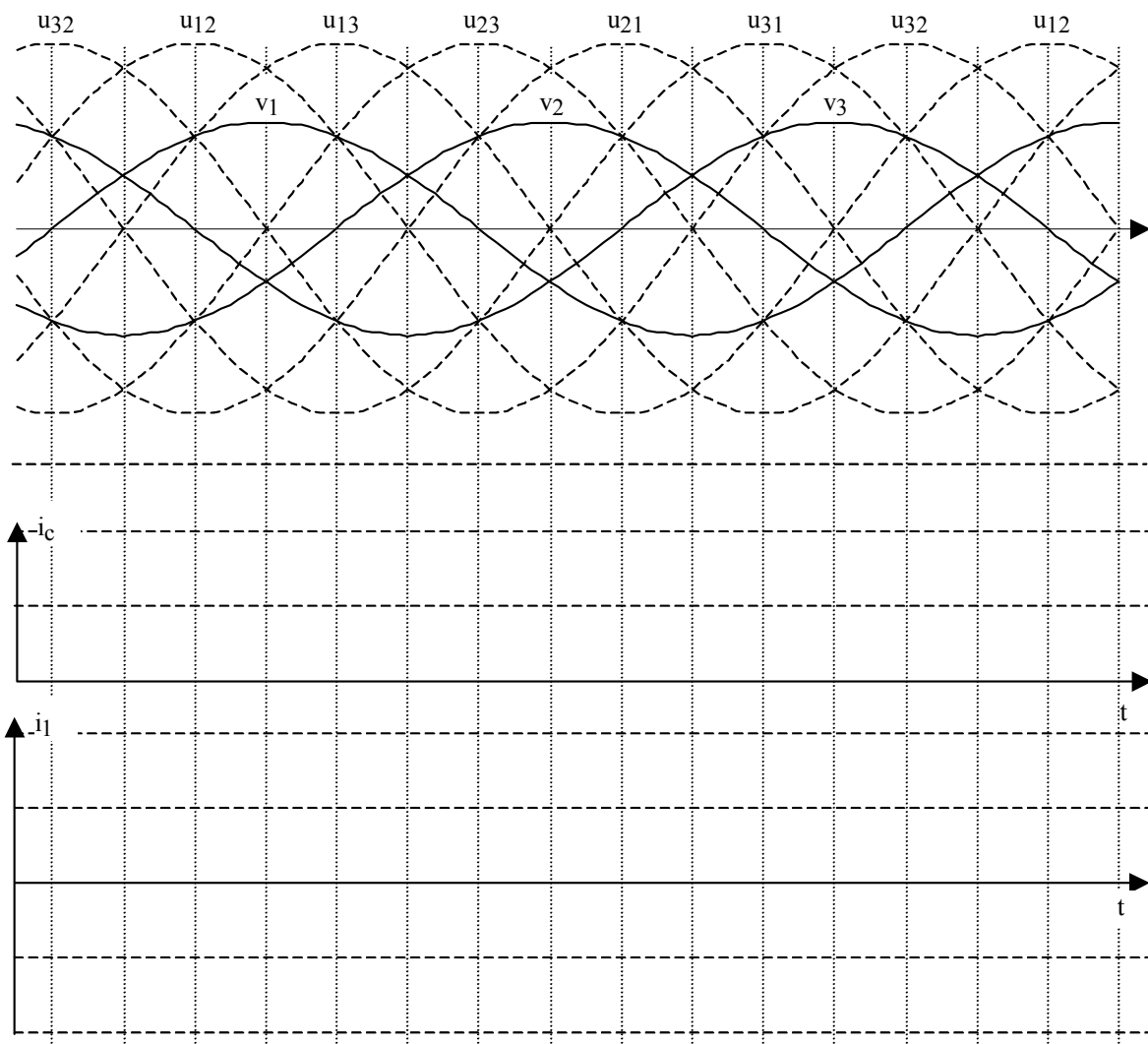
② Connaissant les intervalles de conduction des diodes, en déduire $u_c(t)$ et $v_{D_1}(t)$ (à représenter avec deux couleurs différentes sur le graphe des tensions). Calculer $U_{c_{moy}}$ en fonction de V_{max} .

③ Connaissant la nature de la charge (la charge est uniquement résistive). En déduire le courant $i_c(t)$ et représenter son allure. (L'hypothèse de la conduction continue dans la charge est-elle vérifiée?). Exprimer la valeur moyenne de $i_c(t)$ en fonction de R et V_{max} .

④ En déduire le graphe de $i_l(t)$ en considérant les intervalles de conduction des diodes. Calculer $I_{l_{moy}}$.

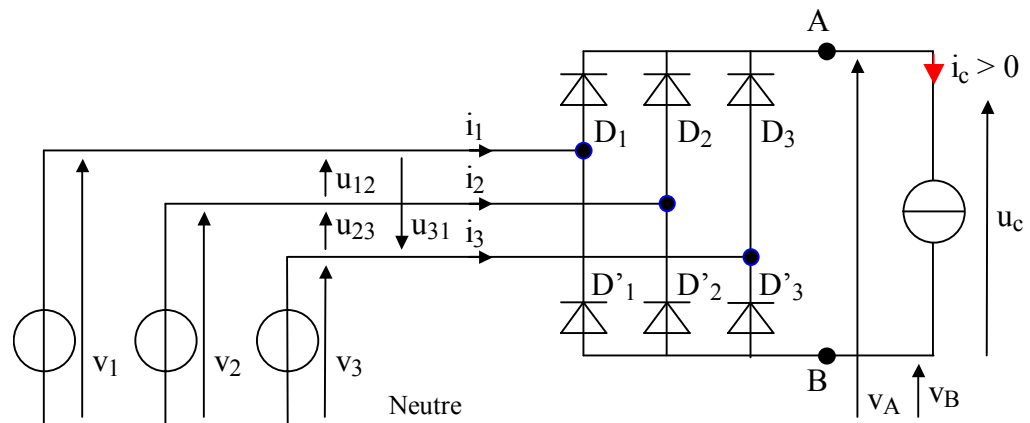
Sachant que $I_{l_{eff}} = 0,485 \cdot \frac{V_{max}}{R}$, en déduire le facteur de puissance en entrée du montage (sur la ligne triphasée). (Au besoin revoir le paragraphe 6).

(Réponse 3:)

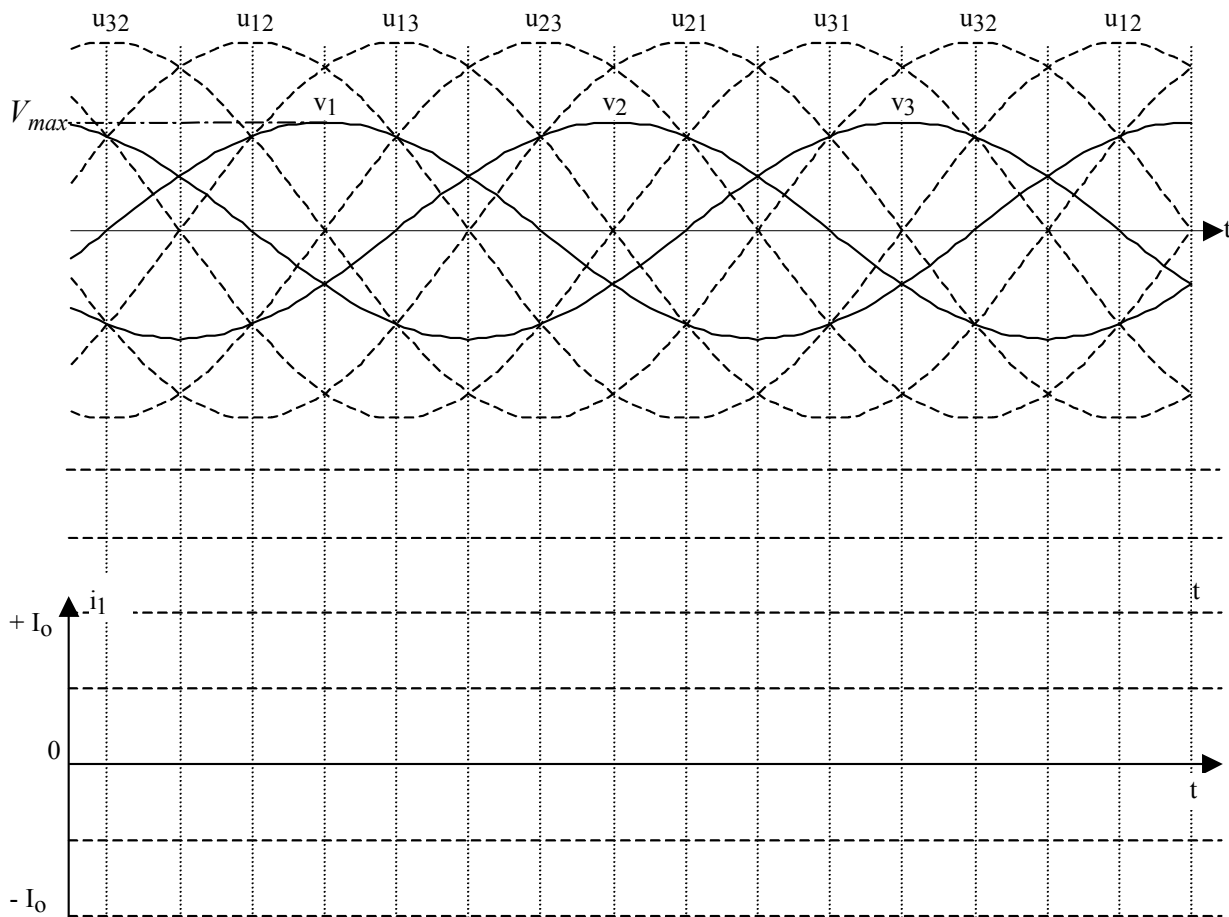


3.4 Exemple d'un PD3 à diodes en conduction continue.

(Réponse 4:)

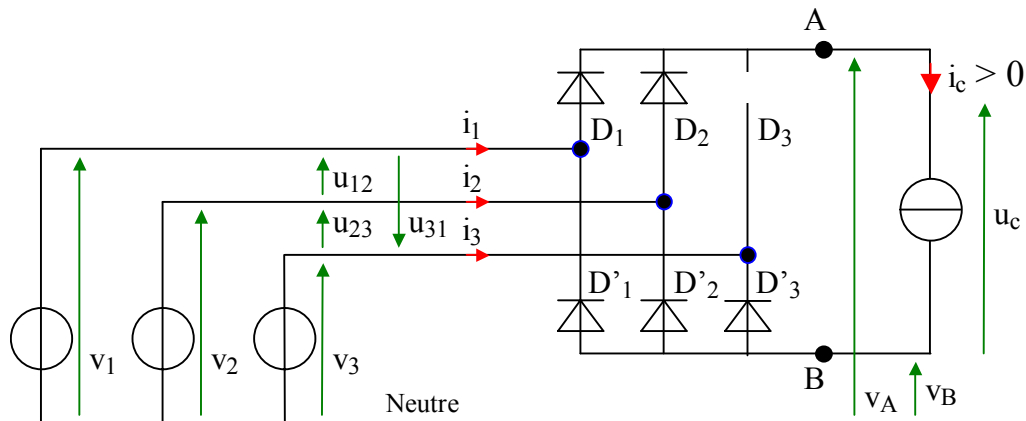


- ① Déterminer et représenter les intervalles de conduction des diodes sur les graphes ci-après.
- ② Connaissant les intervalles de conduction des diodes, en déduire $v_A(t)$, $v_B(t)$ et $u_c(t)$ (à représenter avec des couleurs différentes). Calculer $V_{A_{moy}}$ et $U_{c_{moy}}$ en fonction de V_{max} .
- ③ Le courant $i_c(t)$ est supposé presque constant: $i_c(t) \approx I_o$ (C'est le cas par exemple avec un circuit très inductif). En déduire la puissance active reçue par la charge i_c en fonction de V_{max} et I_o .
- ④ En déduire le graphe de $i_l(t)$ en considérant les intervalles de conduction des diodes. Calculer le facteur de puissance de la ligne triphasée qui alimente le montage.

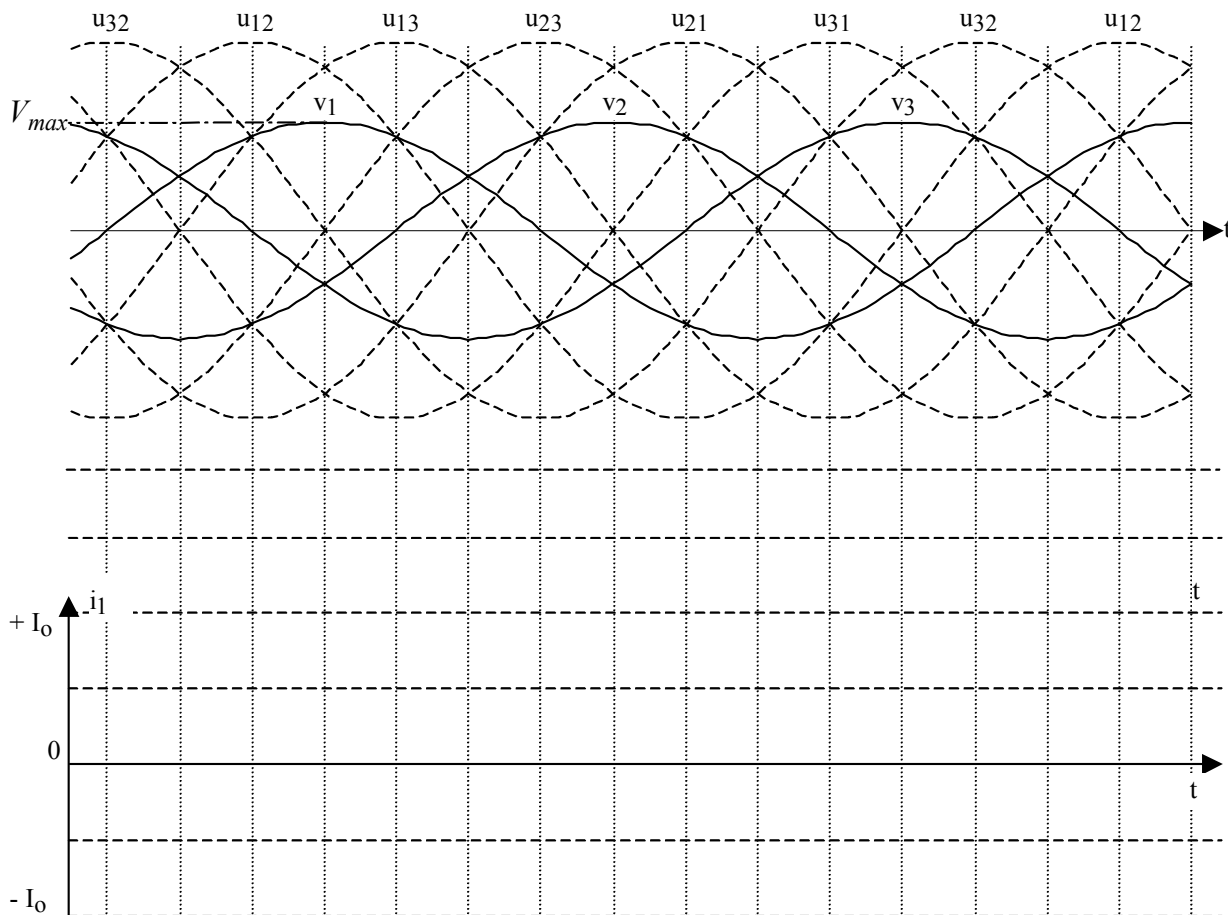


3.5 Exemple d'un PD3 à diodes en panne partielle.

(Réponse 5:)

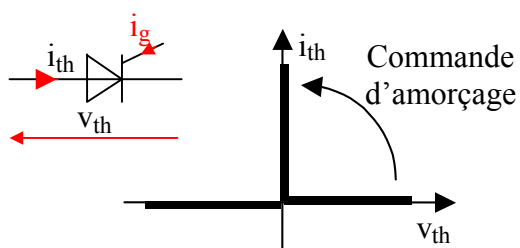


- ① Sachant que la diode D_3 est détruite et se comporte comme un circuit ouvert, déterminer et représenter les intervalles de conduction des diodes sur les graphes ci-après (en supposant la conduction continue dans la source de courant « i_c » qui représente la charge).
- ② Connaissant les intervalles de conduction des diodes, en déduire $v_A(t)$, $v_B(t)$ et $u_c(t)$ (à représenter avec des couleurs différentes). Calculer $V_{A_{moy}}$ et $U_{c_{moy}}$ en fonction de V_{max} .
- ③ Le courant $i_c(t)$ est supposé constant: $i_c(t) = I_o$.
- ④ En déduire le graphe de $i_1(t)$ en considérant les intervalles de conduction des diodes.



4 ETUDE DES CONVERTISSEURS AC → DC A THYRISTORS.

4.1 Fonction d'un thyristor.



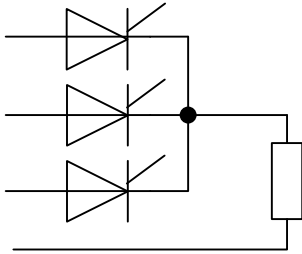
Pour plus de détails, se reporter au chapitre précédent : « Chapitre IV Conversion AC→DC (redressement monophasé) »

4.2 Commutation des associations de thyristors.

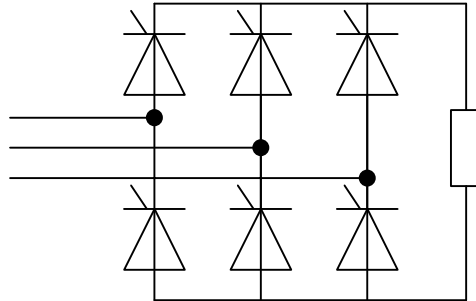
Pour plus de détails, se reporter au chapitre précédent : « Chapitre IV Conversion AC→DC (redressement monophasé) »

4.3 Classification des ponts à Thyristors triphasés.

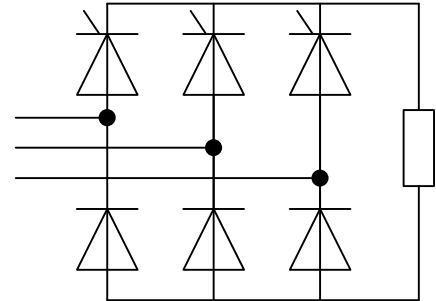
- **Ponts parallèles simples** : un seul commutateur, plus positif ou plus négatif.
- **Ponts parallèles doubles** : deux commutateurs, un plus positif et un plus négatif.



P3 (plus positif)



PD3 tout thyristor

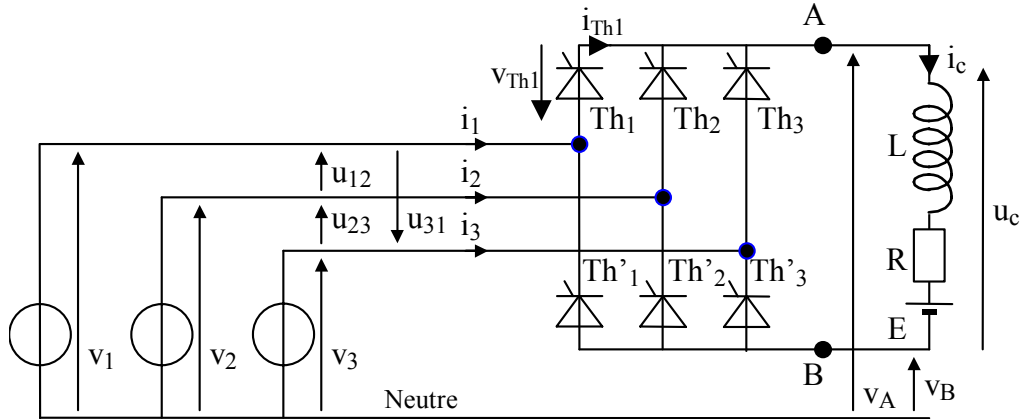


PD3 mixte

4.4 Exemple d'un PD3 à 6 thyristors en régime permanent.

Le pont PD3 à six thyristors ci-dessous est alimenté par une ligne triphasée alternative sinusoïdale équilibrée de sens direct. Il est chargé par une charge R.L.E.

On suppose que le retard à l'amorçage et les valeurs de la charge sont tels que **la conduction est continue** dans cette dernière. (Réponse 6:)



① Indiquer sur les deux premières lignes pointillées des graphes de la page suivante les intervalles de conduction qu'auraient les composants s'il s'agissait de diodes et non pas de thyristors.

Les thyristors fonctionnent avec un angle de retard à l'amorçage $\psi = \frac{\pi}{6}$ (1). En déduire sur les graphes de la page suivante leurs intervalles de conduction. (La conduction étant continue par hypothèse, il y a en permanence un et un seul thyristor conducteur parmi Th_1, Th_2 et Th_3 ; et un et un seul thyristor conducteur parmi Th'_1, Th'_2 et Th'_3).

② Connaissant les intervalles de conduction des thyristors, en déduire $v_A(t)$, $v_B(t)$ et $u_c(t)$ (Les représenter sur les courbes triphasées ci-après).

Calculer $V_{A_{moy}}$ et $V_{B_{moy}}$ en fonction de ψ et de V_{max} (Pour ψ quelconque tel que $0 < \psi < \pi$). Sachant que $u_c(t) = v_A(t) - v_B(t)$, en déduire $U_{c_{moy}}$ en fonction de ψ et de V_{max} .

(1) Rappel:

Temps de retard à l'amorçage: τ = temps de retard à l'amorçage d'un thyristor par rapport à une diode placée au même endroit.

Angle de retard à l'amorçage $\psi = \omega \cdot \tau$.

Les thyristors commencent donc à conduire avec un retard ψ (déplacement vers la droite sur l'axe des θ) par rapport à une diode placée au même endroit.

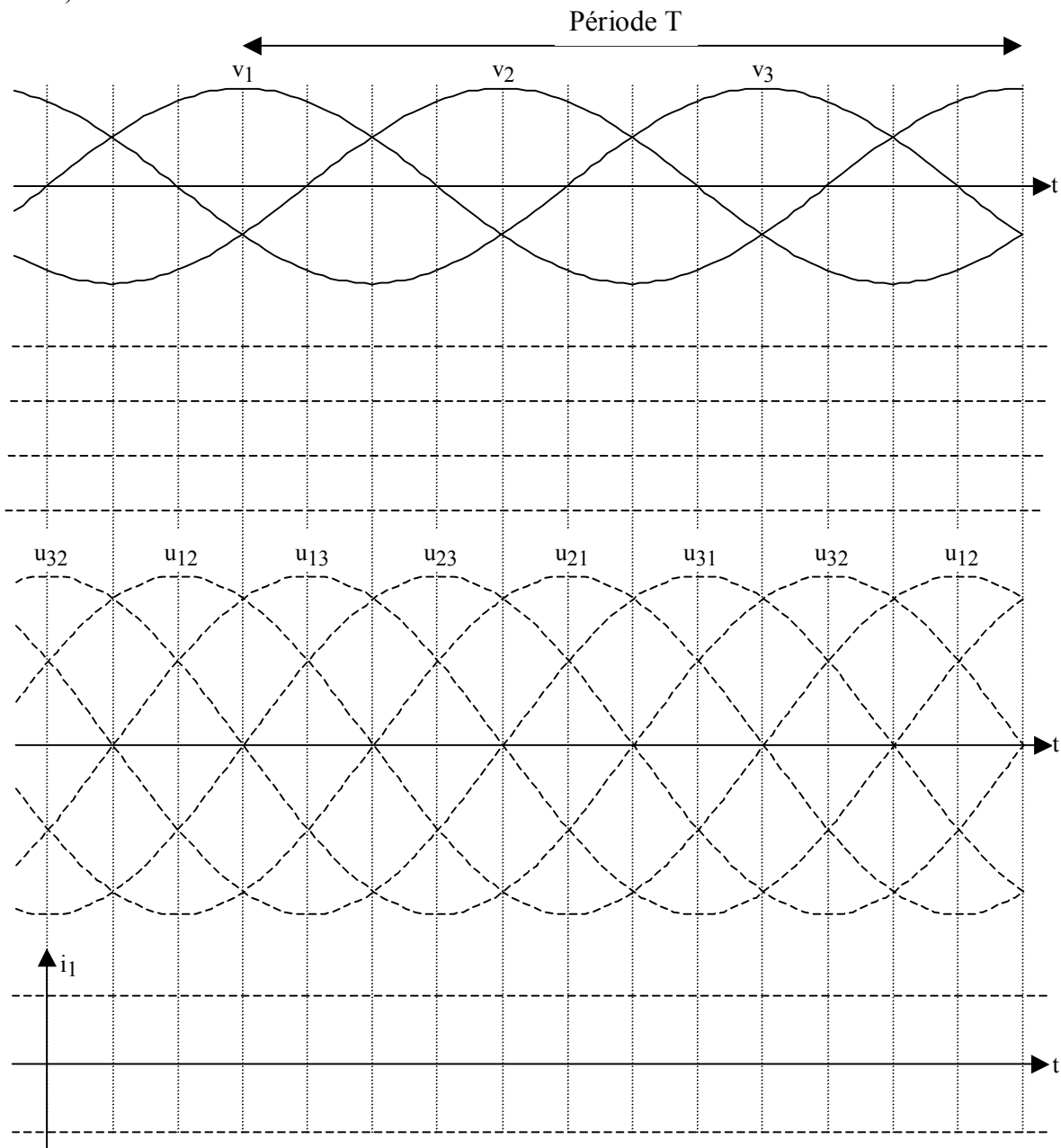
Les thyristors sont commandés séparément les uns des autres de façon à rendre leur conduction possible (Le détail des commandes sera vu plus tard)

③ Pour l'étude des courants, nous ferons l'hypothèse: $\frac{L}{R}$ très supérieure à $\frac{T}{6}$, on peut donc poser : $i_c(t) \approx I_o = cte$. Exprimer I_o en fonction de R, E, V_{max} et ψ . En déduire que si $E > 0$, la conduction continue n'est pas possible pour $\frac{\pi}{2} < \psi < \pi$.

④ Représenter $i_1(t)$ avec l'hypothèse $i_c(t) \approx I_o > 0$ et $\psi = \frac{\pi}{6}$.

Calculer la puissance active reçue par la charge en conduction continue en fonction de I_o, V_{max} et ψ . En déduire, en conduction continue, le facteur de puissance de la ligne qui alimente ce montage.

(Réponse 6:)



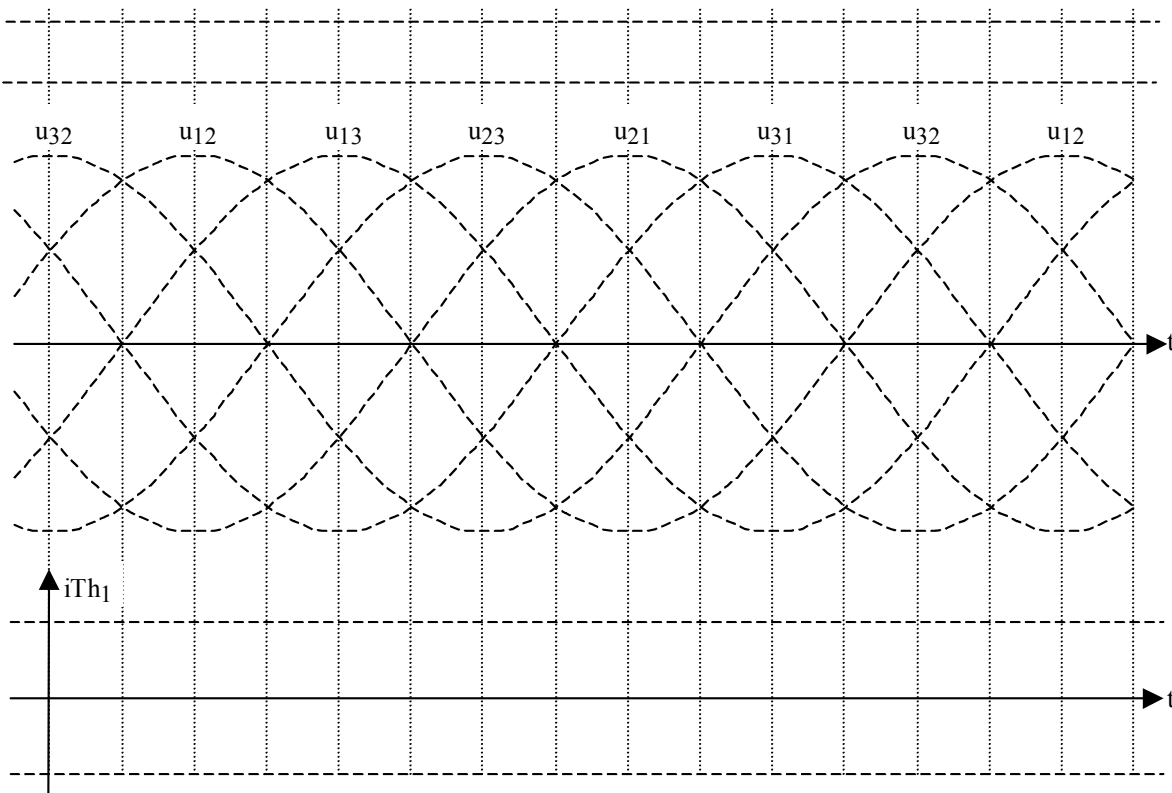
On constate qu'en conduction continue :

pour $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$: $P > 0$: le montage fonctionne en **redresseur**. Il reçoit de l'énergie de la ligne triphasée et la transmet à la charge R.L.E.

pour $\frac{\pi}{2} < \psi < \pi$: $P < 0$: le montage fonctionne en **onduleur assisté**. Il renvoie de l'énergie dans la ligne triphasée. Cela suppose que $E < 0$ avec une valeur suffisante.

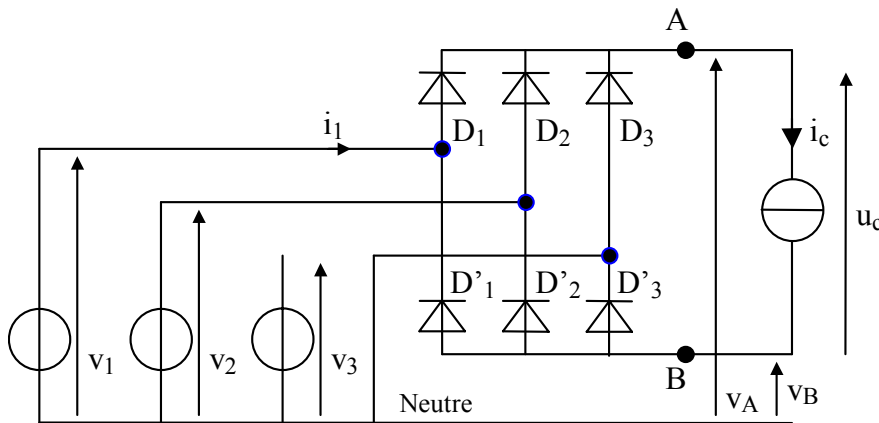
5 De façon à évaluer les contraintes sur Th_1 , représenter ci dessous $v_{Th_1}(t)$ et $i_{Th_1}(t)$ lorsque $\psi = \frac{\pi}{6}$ avec $i_c(t) \approx I_o > 0$.

(Réponse 7:)



5 PROBLEMES ET EXERCICES

Chap 5. Exercice 1 : PD 3 à diodes suite à une erreur de branchement

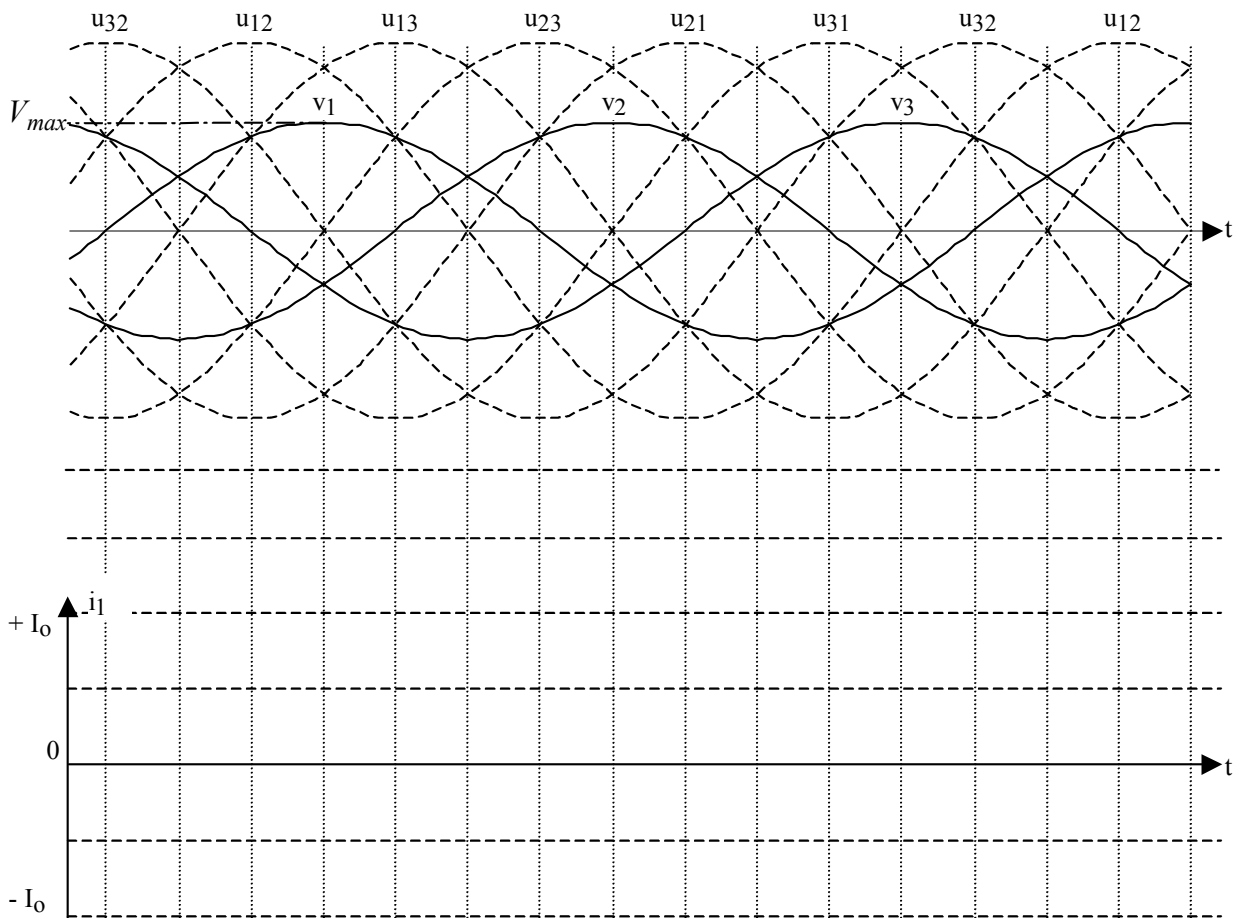


Une ligne triphasée quatre fils 220/380V 50Hz (tensions triphasées équilibrées de sens direct) alimente un montage redresseur PD3 à diodes chargé par une source de courant constant i_c .

Par erreur, on a branché le neutre à la place de la phase 3 (voir la figure ci-contre).

1) Sachant que $i_c(t) \approx I_o = cte$, représenter les intervalles de conduction des différentes diodes, et la forme d'onde de $u_c(t)$. En déduire le graphe de $i_1(t)$ dans la phase 1.

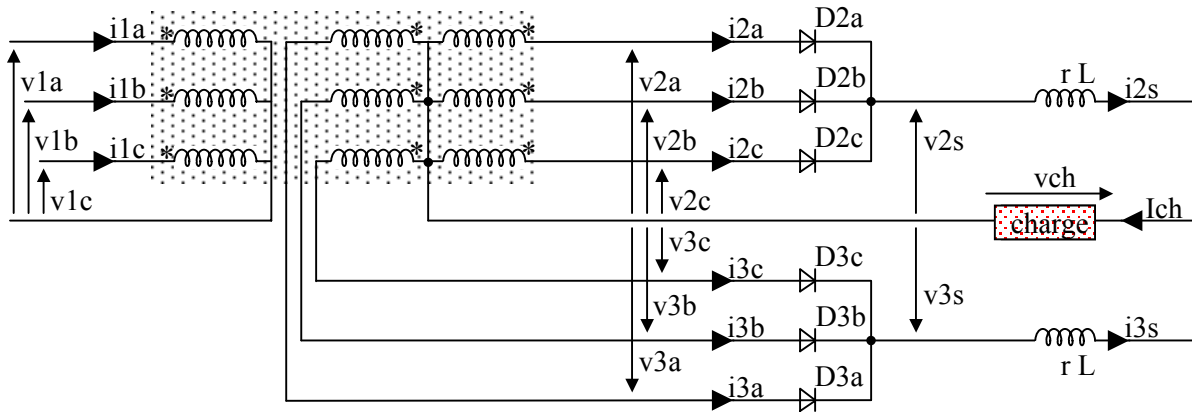
2) Calculer $U_{c moy}$



Chap 5. Exercice 2 : Redresseur hexaphasé à diodes.

Un redresseur hexaphasé (redresseur à 2 P3 en parallèle) à diodes utilise un transformateur triphasé à deux secondaires (aucune connaissance des transformateurs triphasés n'est nécessaire pour ce problème). Deux bobines identiques d'inductance « L » et de résistance interne « r » complètent le dispositif destiné à débiter un courant redressé $i_{ch}(t)$ dans une charge.

Sauf pour la question e), on suppose les diodes idéales.



Les tensions $v_{1a}(t)$, $v_{1b}(t)$ et $v_{1c}(t)$ sont sinusoïdales triphasées équilibrées de sens direct.

Le transformateur triphasé impose les relations suivantes :

$$\begin{aligned} i_{1a}(t) &= m(i_{2a}(t) - i_{3a}(t)) & v_{2a}(t) &= m.v_{1a}(t) & v_{3a}(t) &= -m.v_{1a}(t) \\ i_{1b}(t) &= m(i_{2b}(t) - i_{3b}(t)) & v_{2b}(t) &= m.v_{1b}(t) & v_{3b}(t) &= -m.v_{1b}(t) \\ i_{1c}(t) &= m(i_{2c}(t) - i_{3c}(t)) & v_{2c}(t) &= m.v_{1c}(t) & v_{3c}(t) &= -m.v_{1c}(t) \end{aligned}$$

Le coefficient constant « m » est appelé rapport de transformation du transformateur triphasé.

Dans tout le problème, on supposera la conduction continue dans les bobines identiques « r , L ». (Donc $i_{2s}(t) > 0$ et $i_{3s}(t) > 0$).

a) Sur les graphes réservés à cet effet à la page suivante, représenter l'intervalle de conduction de chaque diode. En déduire $v_{2s}(t)$ et $v_{3s}(t)$. Calculer $V_{2s\text{moy}}$ et $V_{3s\text{moy}}$ en fonction de V_{max} .

b) Montrer que $v_{ch}(t) = \frac{v_{2s}(t) + v_{3s}(t)}{2} - \frac{L}{2} \cdot \frac{d(i_{ch}(t))}{dt} - \frac{r}{2} i_{ch}(t)$

c) Etablir la relation entre $V_{2s\text{moy}}$, $V_{ch\text{moy}}$, $I_{2s\text{moy}}$ et r, puis entre $V_{3s\text{moy}}$, $V_{ch\text{moy}}$, $I_{3s\text{moy}}$ et r.

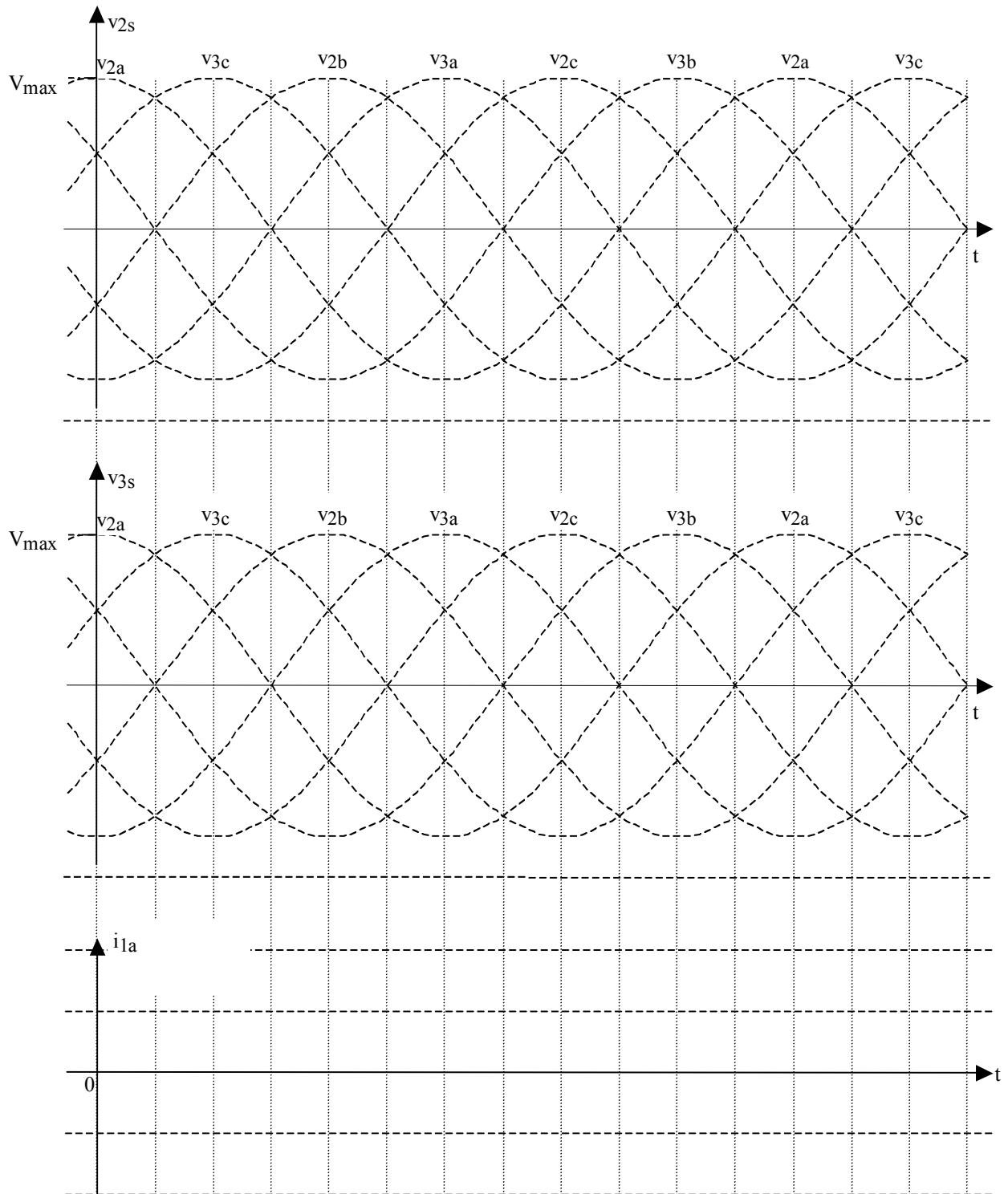
En déduire la relation entre $I_{2s\text{moy}}$ et $I_{3s\text{moy}}$ puis la relation entre $I_{2s\text{moy}}$, $I_{3s\text{moy}}$ et $I_{ch\text{moy}}$.

d) On suppose maintenant la valeur de « L » très grande, de sorte que les courants $i_{2s}(t)$ et $i_{3s}(t)$ puissent être considérés quasiment constants.

Sur les graphes réservés à cet effet à la page suivante, représenter l'allure du courant $i_{1a}(t)$. Sachant que $m = 0,1$, préciser sa valeur maximum en fonction de I_{ch} .

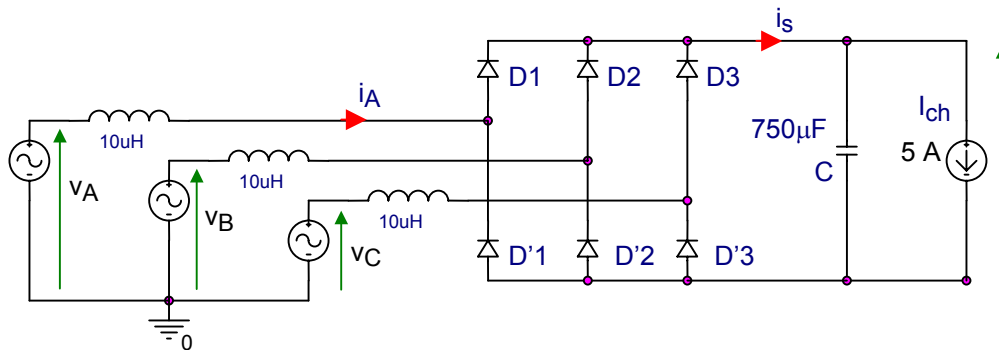
e) Lorsqu'elles sont passantes, les diodes présentent en réalité une tension de seuil E_0 . (Cette valeur étant faible par rapport aux autres tensions présentes dans le montage, elle ne remet pas en cause les résultats établis aux questions précédentes).

Calculer la puissance perdue dans l'ensemble des 6 diodes en fonction de I_{ch} .



Chap 5. Exercice 3 : Pont redresseur triphasé à diodes débitant sur une charge capacitive

Le montage étudié ci-dessous représente l'étage d'entrée d'un variateur de vitesse alimenté par des tensions alternatives sinusoïdales triphasées équilibrées de tension simple 230 V efficace. La source de courant constant représente la consommation de courant de l'étage onduleur du variateur (non étudié).



La simulation du montage ci-contre a permis d'obtenir les courbes représentées ci-après, ainsi que les valeurs suivantes :
 $I_{s\text{eff}} = 10,46 \text{ A}$ et
 $V_{ch\text{moy}} = 553 \text{ V}$.

Les inductances de $10\mu\text{H}$ représentent les inductances des conducteurs de la ligne. La simulation n'a été retenue qu'en régime permanent (au-delà de 20 ms)

a) Indiquer l'intervalle de conduction de chaque diode sur les lignes pointillées placées sous les courbes des tensions alternatives sinusoïdales triphasées équilibrées (page suivante). (Lorsque le courant i_s est nul, aucune diode ne conduit !).

b) Lorsque i_s est nul, quelle est l'expression de $\frac{d[v_{ch}(t)]}{dt}$ en fonction de C et I_{ch} ?

Calculer la valeur numérique de $\frac{d[v_{ch}(t)]}{dt}$ lorsque i_s est nul. (Préciser l'unité)

c) A partir des informations établies en a) et b), en déduire le graphe de $v_{ch}(t)$ (A représenter sur les graphes ci-après)... (Cette question n'a pas d'incidence sur la suite de l'exercice)

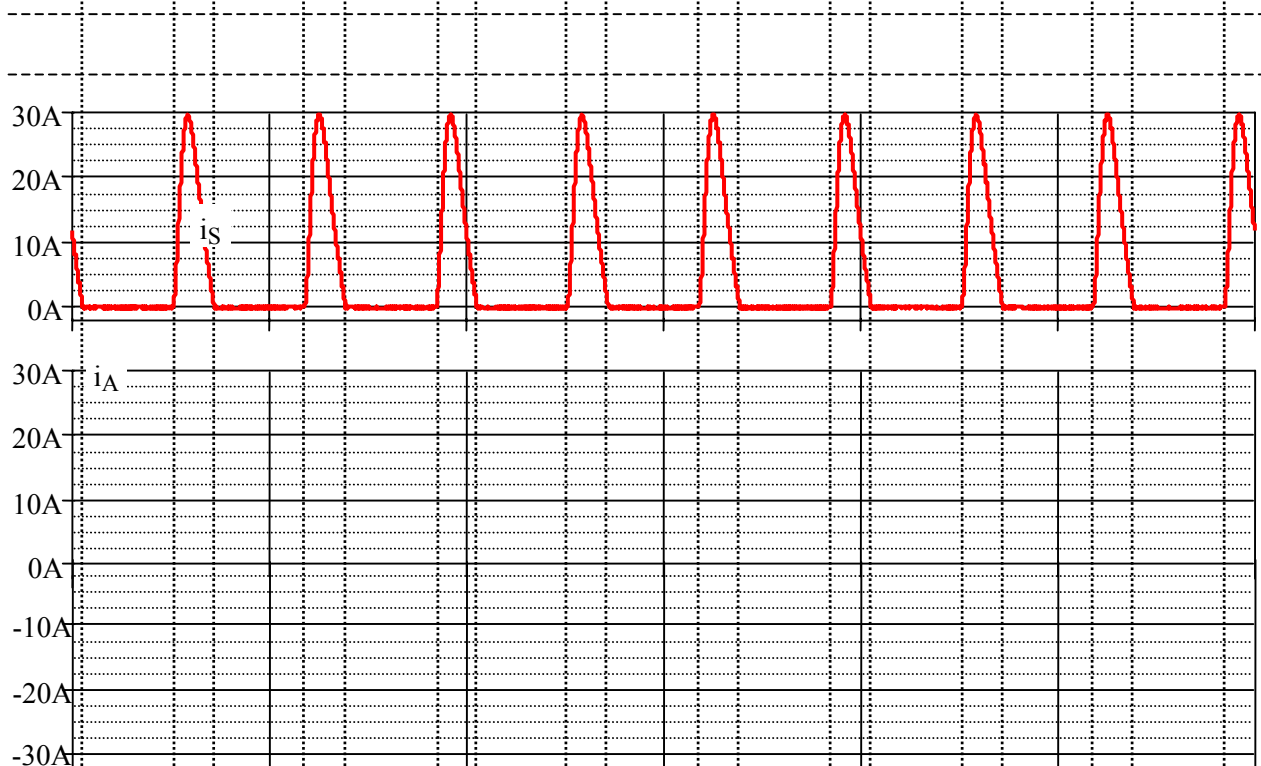
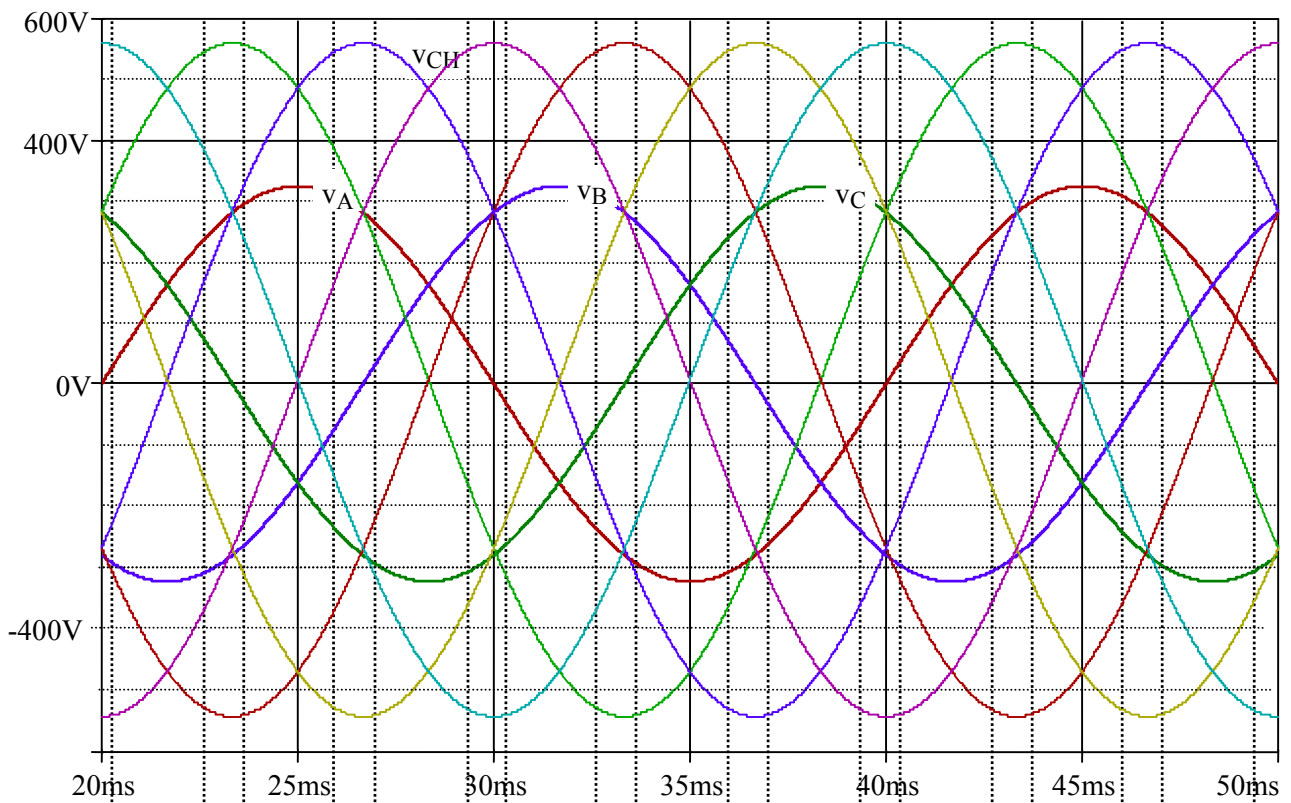
d) Calculer $I_{s\text{moy}}$ en régime périodique. (Justifier en quelques mots)

e) Calculer la puissance active consommée par la charge I_{ch} . (Justifier en quelques mots)

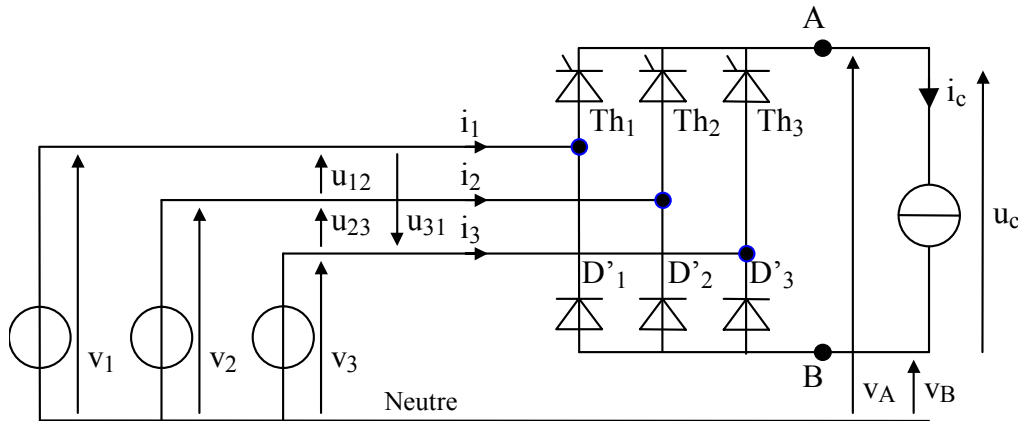
f) Représenter, sous les courbes, le graphe de $i_A(t)$ en concordance des temps.

g) Par comparaison entre les graphes de $i_A(t)$ et de $i_s(t)$, en déduire la valeur numérique de $I_{A\text{eff}}$ (Justifier la démarche en quelques mots)

h) Définir le facteur de puissance de la ligne triphasée (au niveau des sources $v_A(t)$, $v_B(t)$ et $v_C(t)$). Calculer sa valeur numérique.



Chap 5. Exercice 4 : Pont redresseur triphasé mixte.



Le pont PD3 mixte ci-dessus est alimenté sous tension triphasée équilibrée de sens direct: $v_1(t)$, $v_2(t)$ et $v_3(t)$.

a) On suppose la conduction continue dans la source « i_c ».

Représenter, sur la feuille jointe, les intervalles de conduction des différents interrupteurs, et la forme d'onde de $v_A(t)$, $v_B(t)$ et $u_c(t)$ pour un angle de retard à l'amorçage des thyristors $\psi = \frac{\pi}{6}$.

A partir d'une expression sous la forme d'une intégrale, calculer $V_{A_{moy}}$ en fonction de V_{max} et $\cos(\psi)$ (pour $0 < \psi < \pi$). (2). En déduire les expressions de $V_{B_{moy}}$ et $U_{c_{moy}}$ en fonction de V_{max} et $\cos(\psi)$.

b) La source « i_c » est telle que $i_c(t) \approx I_o = cte$.

Exprimer la puissance active échangée dans la source « i_c » en fonction de I_o , V_{max} et ψ .

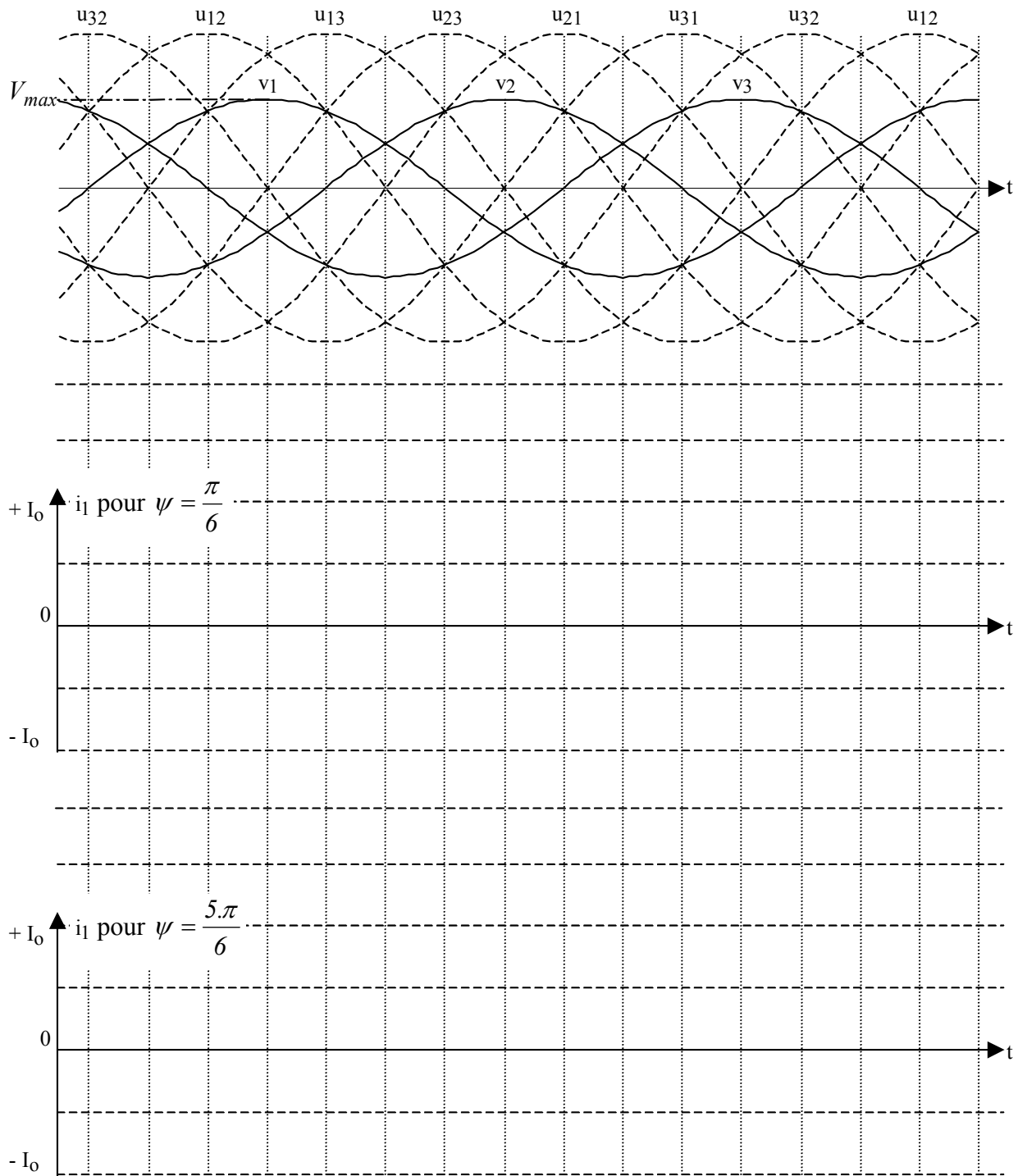
c) On suppose toujours $i_c(t) \approx I_o = cte$.

Représenter, sur la feuille jointe, le graphe de $i_1(t)$ dans la phase 1 pour $\psi = \frac{\pi}{6}$.

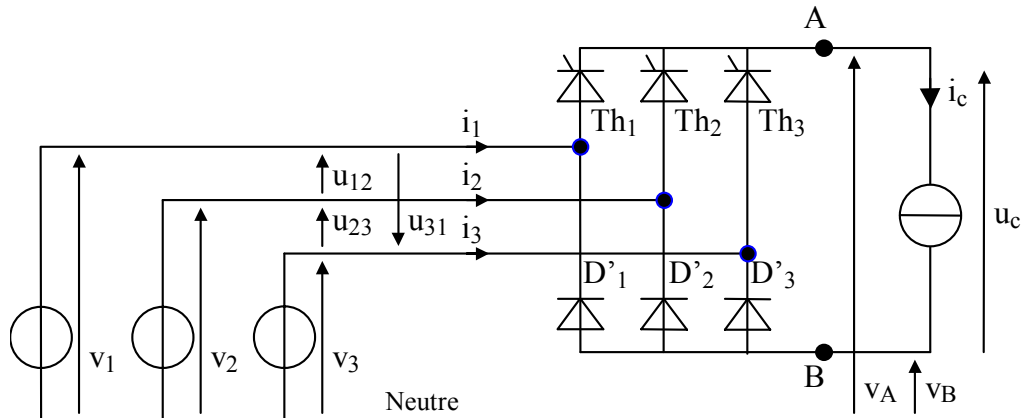
Représenter, sur la feuille jointe, le graphe de $i_1(t)$ dans la phase 1 pour $\psi = \frac{5\pi}{6}$.

En déduire $I_{I_{eff}}$ en fonction de I_o et ψ .

(2) $\cos(a + b) = \cos(a).\cos(b) - \sin(a).\sin(b)$



Chap 5. Exercice 5 : Défaillance dans un pont redresseur mixte.

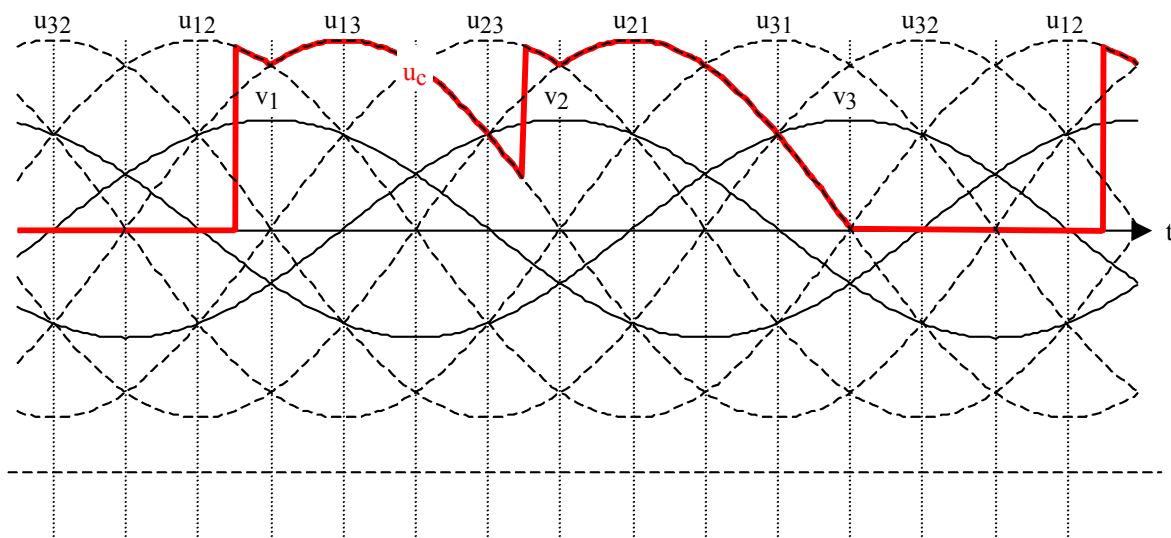


Le pont PD3 mixte ci-dessus est alimenté sous tension triphasée équilibrée de sens direct: $v_1(t)$, $v_2(t)$ et $v_3(t)$.

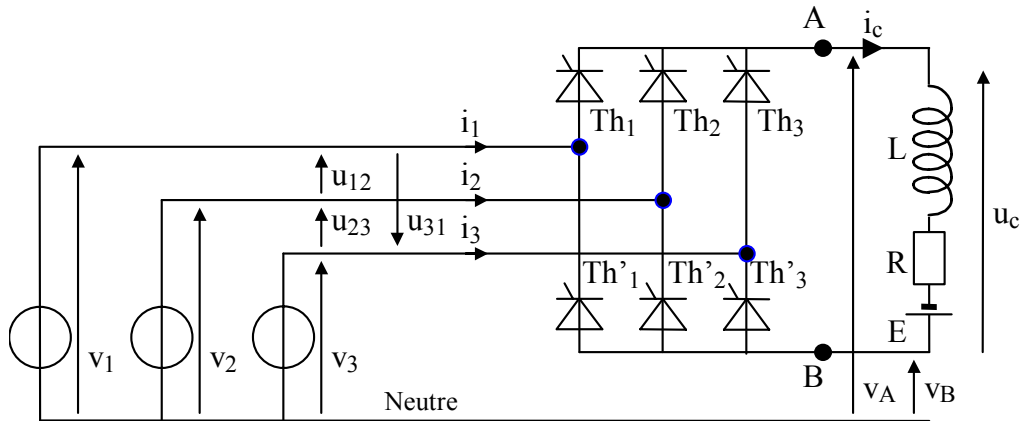
Une défaillance est apparue: le signal $u_c(t)$ observé en sortie avec un oscilloscope est représenté ci-dessous.

On a vérifié que $i_c(t) > 0$.

Déterminer la nature de la panne.



Chap 5. Exercice 6 : PD3 tout thyristor en onduleur assisté.



Le montage PD3 tout thyristors ci-dessus fonctionne en onduleur avec une charge R.L.E. Il est commandé avec un angle de retard à l'amorçage de 150° .

La f.e.m. E est positive par rapport à l'orientation, et de valeur telle que **la conduction est continue** dans celle-ci lorsque l'angle de retard à l'amorçage est de 150° .

Les thyristors sont commandés par des **trains d'impulsions** de largeur suffisante ($>T/6$) de façon que l'amorçage soit possible au démarrage ou en cas de conduction discontinue ⁽³⁾.

Les trains d'impulsions sur la gâchette de chaque thyristor sont représentés sous les courbes triphasées (cf traits fort sur la feuille de réponse).

(Train d'impulsions = intervalle de commande \neq intervalle de conduction)

Sur tout l'intervalle où un thyristor reçoit des impulsions sur sa gâchette, il devient conducteur dès qu'il est polarisé positivement.

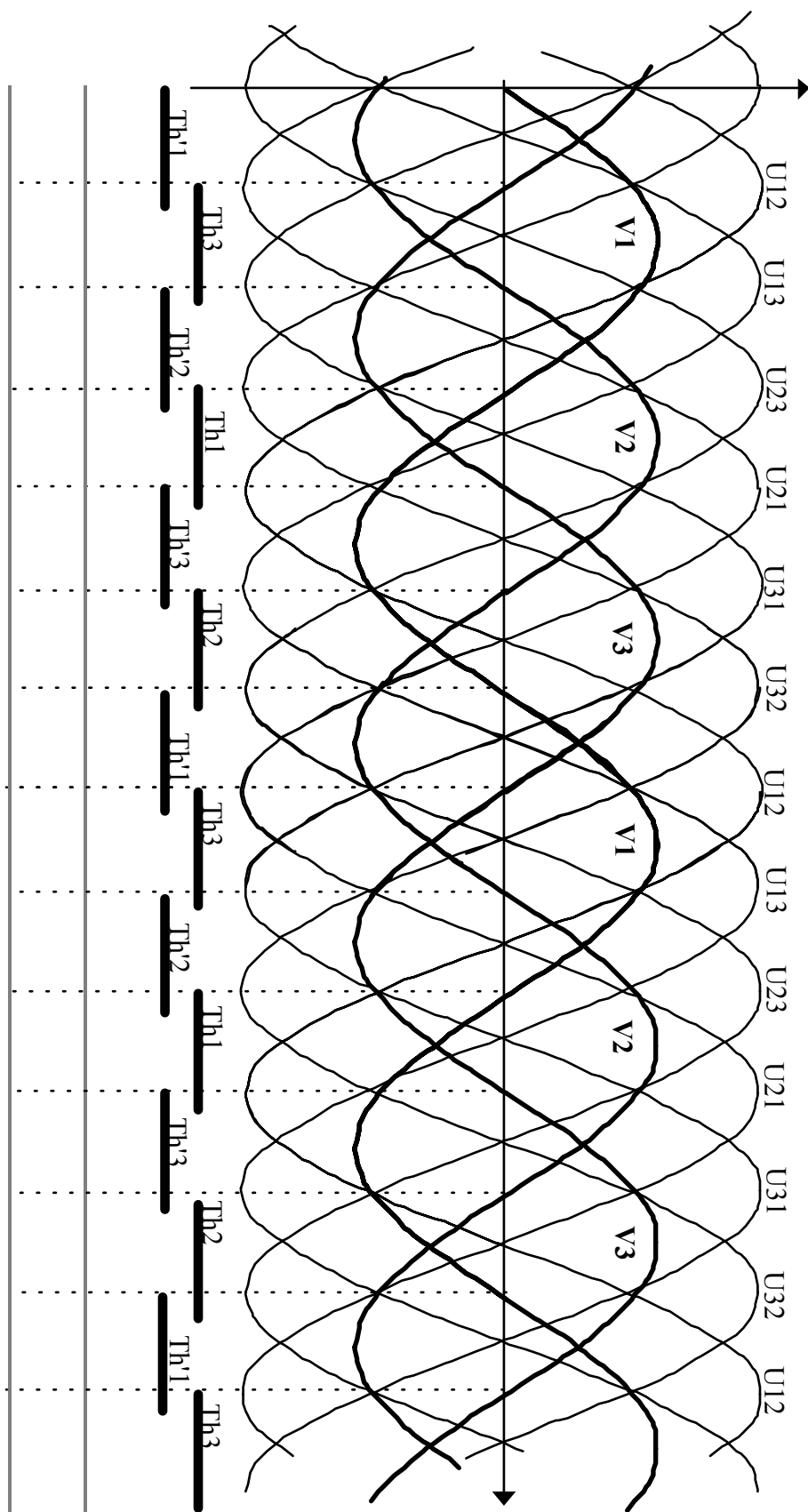
A l'instant t_1 (cf feuille de réponses) la phase 1 de la ligne d'alimentation est rompue (La phase 1 du montage est alors en l'air, et donc pour $t > t_1 : i_1(t) = 0$).

Si $i_1(t) = 0$, les thyristors Th_1 et $Th'1$ ne peuvent entrer en conduction que s'ils sont commandés simultanément. Les trains d'impulsions sur les gâchettes de Th_1 et $Th'1$ ne se recouvrent pas, **Th_1 et $Th'1$ sont bloqués.**

Représenter sur la feuille de réponses la tension $u_c(t)$ en fonctionnement normal (avant l'instant t_1) et après la panne (après l'instant t_1).

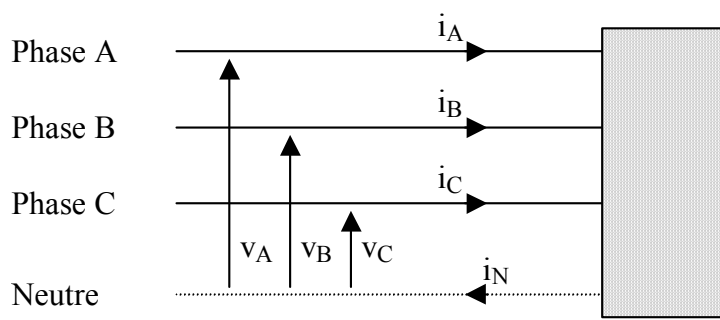
Quelle est la conséquence de cette panne ?

⁽³⁾ En effet pour qu'au démarrage ou en conduction discontinue, un courant puisse s'établir lors de la commande d'un thyristor, il faut impérativement qu'un thyristor de l'association à cathode commune entre en conduction simultanément avec un thyristor de l'association à anode commune. Les intervalles de commande de ces deux thyristors doivent donc se chevaucher (voir le graphe des intervalles de commande).

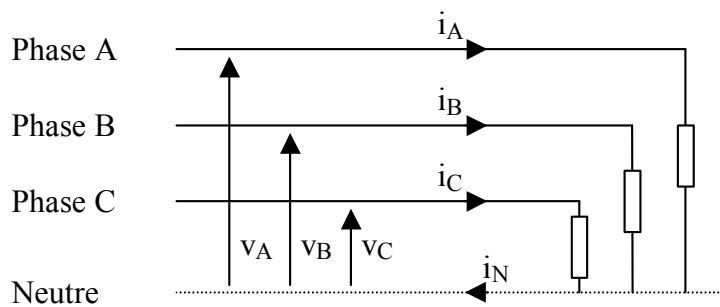


t1: Rupture de la phase 1

6 ANNEXE : PUISSANCE EN TRIPHASÉ EQUILIBRE



La ligne triphasée ci-contre est soumise à des tensions $v_A(t)$, $v_B(t)$ et $v_C(t)$, et elle est parcourue par des courants $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ et $i_N(t)$ qu'elle délivre à une charge quelconque.



Il est toujours possible de simuler le comportement de cette charge par trois dipôles montés en étoile qui, pour les mêmes tensions, engendreront les mêmes courants.

La loi de conservation de l'énergie précise que la puissance active totale consommée par la charge est la somme des puissances actives consommées par chaque élément.

✓ **Lorsque les signaux sont tous de même période T ,**
La puissance active (ou puissance moyenne) s'exprime par la relation :

$$P = (v_A(t).i_A(t))_{moy} + (v_B(t).i_B(t))_{moy} + (v_C(t).i_C(t))_{moy}$$

✓ **Si les tensions et les courants sont triphasés équilibrés ⁽⁴⁾ :**

$$P = 3.(v_A(t).i_A(t))_{moy} = 3.(v_B(t).i_B(t))_{moy} = 3.(v_C(t).i_C(t))_{moy}$$

et $V_{Aeff} = V_{Beff} = V_{Ceff} = V_{eff}$ et de même $I_{Aeff} = I_{Beff} = I_{Ceff} = I_{eff}$

Le facteur de puissance s'exprime par : $k = \frac{P}{S} = \frac{P}{3.V_{eff}.I_{eff}}$

Revoir éventuellement les chapitres 11 et 12 de « baselecpro » :
(Rechercher **Baselecpro** sur Internet avec un moteur de recherche)

(4) " Equilibré" signifie : 3 même graphes décalés les uns par rapport aux autres de $\pm 1/3$ de période.

7 CE QUE J'AI RETENU DE CE CHAPITRE.

Comme les précédents, ce chapitre mobilise les connaissances sur les bases de l'électricité. Il est donc important de le travailler page après page pour acquérir l'**entraînement** à l'utilisation de ces lois dans des contextes divers.

La réponse aux questions suivantes permet de vérifier si certaines connaissances sont acquises, mais elle ne permet pas de vérifier l'aptitude à les utiliser dans une situation inédite.

- a) Quelle est la règle de fonctionnement des diodes d'une « association à cathode commune » ?
- b) Quelle est la règle de fonctionnement des diodes d'une « association à anode commune » ?
- c) L'étude des ponts redresseurs peut être largement facilitée si on respecte un ordre précis. Indiquer les étapes ①, ②, ③ et ④ de cet ordre.
- d) Les ponts redresseurs sont-ils des convertisseurs à liaison directe ? Que peut-on en conclure pour ce qui concerne la puissance instantanée ?
- e) Qu'est-ce que la « conduction continue » dans une branche d'un montage ?
- f) Dans un pont à thyristor, on parle de « retard à l'amorçage », de quoi s'agit-il ?
- g) Comment s'exprime la puissance active dans une ligne triphasée dont tous les courants et toutes les tensions sont de même période ?

Comment s'exprime la puissance active dans une ligne triphasée dont les courants et les tensions, de même période, sont équilibrés (mais pas sinusoïdaux) ? Comment s'exprime alors le facteur de puissance ?

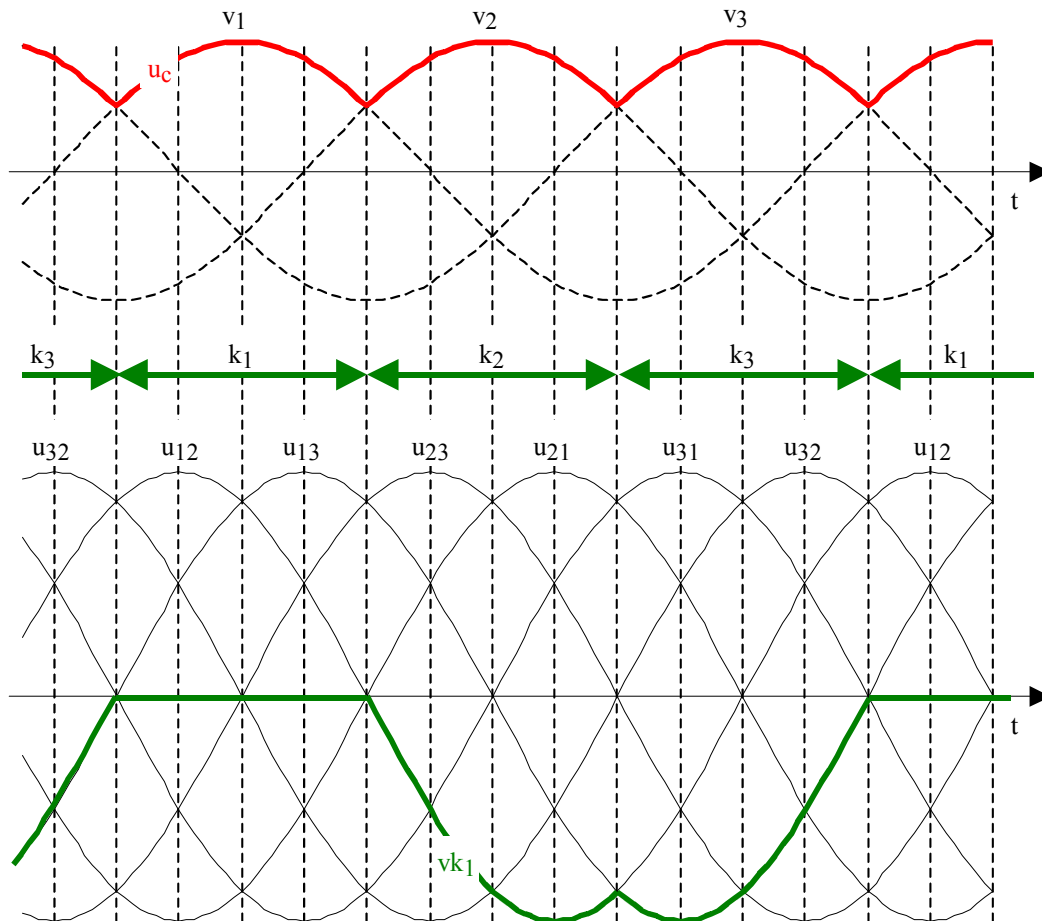
8 REPONSES AUX QUESTIONS DU COURS

Réponse 1:

Lorsque k_1 est fermé : $u_c(t) = v_1$ et $v_{k_1} = 0$

Lorsque k_2 est fermé : $u_c(t) = v_2$ et $v_{k_1} = v_1 - v_2$

Lorsque k_3 est fermé : $u_c(t) = v_3$ et $v_{k_1} = v_1 - v_3$

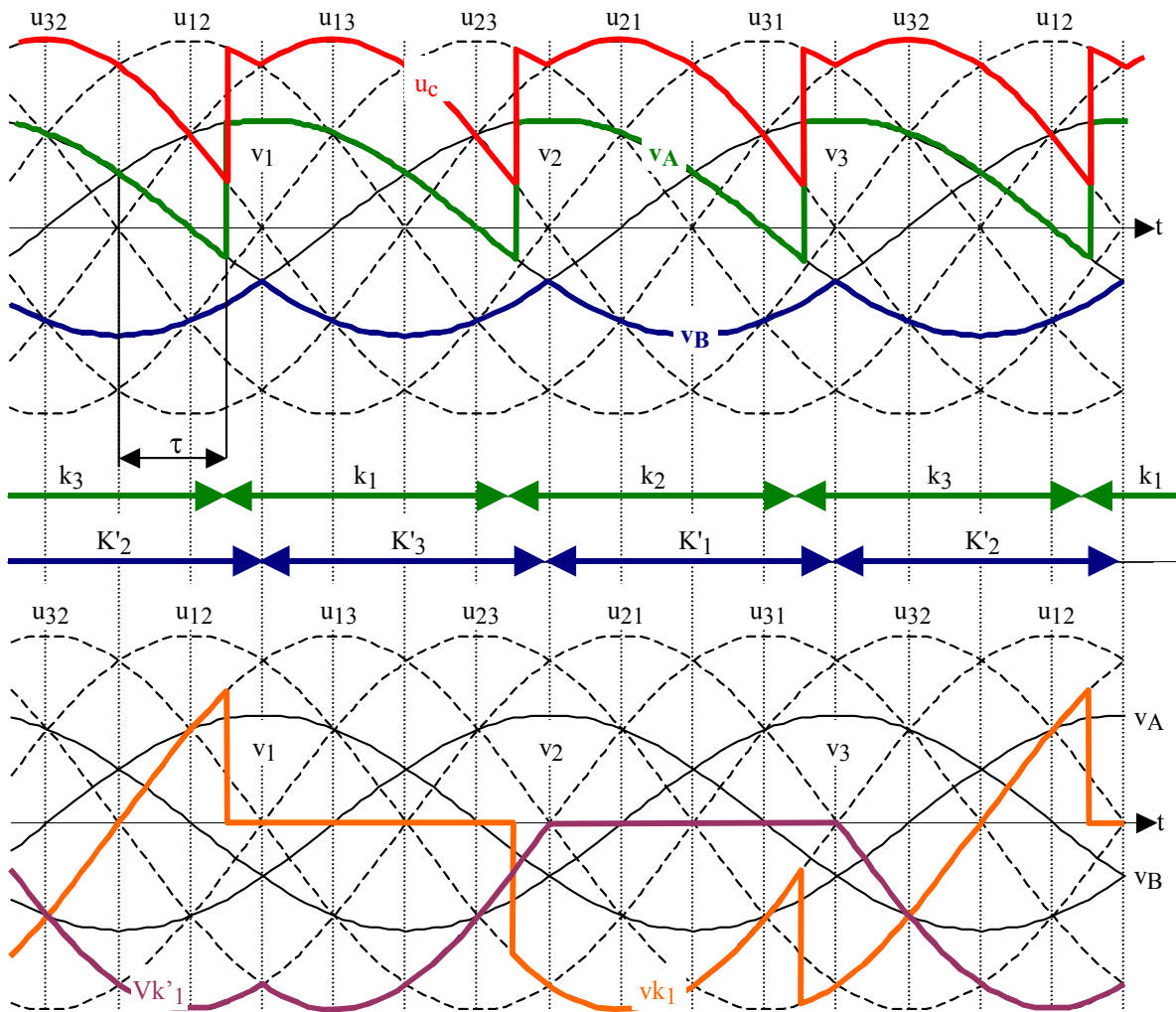


On constate que lorsque « k_1 » est fermé : $i_{k_1}(t) = i_c(t) \geq 0$, et lorsque « k_1 » est ouvert : $v_{k_1}(t) \leq 0$.

Donc la fonction que réalise l'interrupteur « k_1 » est la fonction diode.

[Retour](#)

Réponse 2:

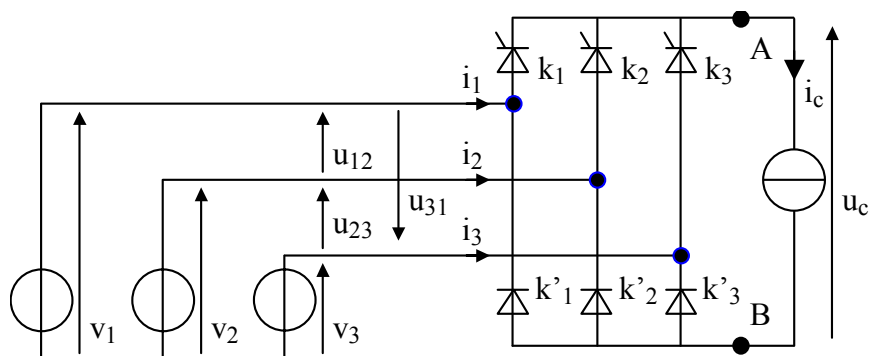


A partir du signe de la tension v_{k_1} et sachant que $i_{k_1}(t) = i_c(t) \geq 0$ lorsque k_1 est passant, on en déduit que k_1 est un thyristor

A partir du signe de la tension $v_{k'_1}$ et sachant que $i_{k'_1}(t) = i_c(t) \geq 0$ lorsque k'_1 est passant, on en déduit (par une méthode hors programme) que k'_1 est une diode.

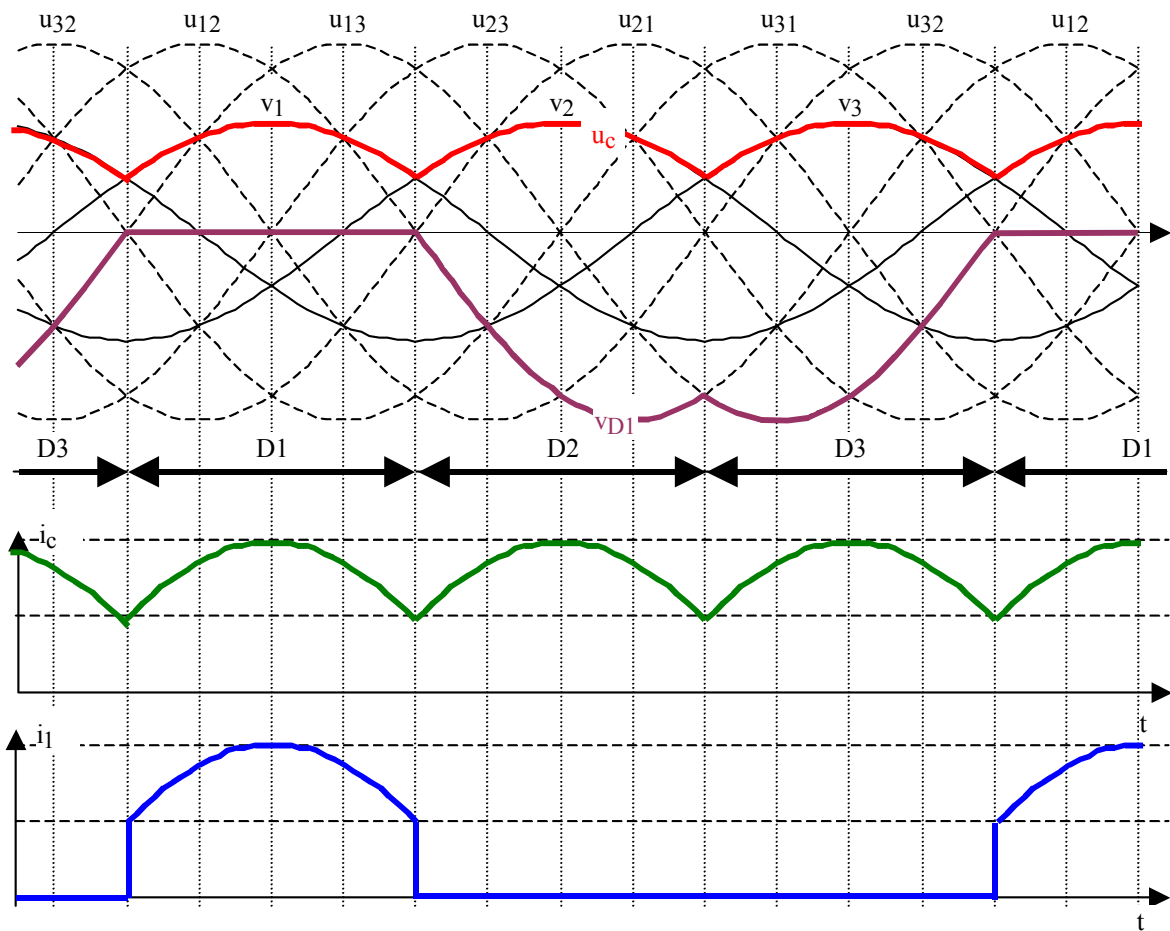
Le schéma du convertisseur est donc le suivant : (il s'agit d'un pont mixte triphasé).

Le graphe de $u_c(t)$ est obtenu soit en considérant $u_c(t) = v_A(t) - v_B(t)$, soit en considérant l'intervalle de conduction de chaque interrupteur.



[Retour](#)

Réponse 3:



On constate que l'hypothèse de la conduction continue dans la charge est vérifiée ($i_c(t) > 0$) ;

$$U_{c\text{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_{\text{max}} \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta = \frac{3 \cdot V_{\text{max}}}{2\pi} \cdot \left[\sin(\theta) \right]_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} = \frac{3 \cdot V_{\text{max}}}{2\pi} \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot V_{\text{max}}$$

$$I_{c\text{moy}} = \frac{U_{c\text{moy}}}{R} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{V_{\text{max}}}{R} \quad ; \quad I_{1\text{moy}} = \frac{I_{c\text{moy}}}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{V_{\text{max}}}{R} = 0,276 \cdot \frac{V_{\text{max}}}{R}$$

On vérifie bien que $I_{1\text{moy}} = 0,276 \cdot \frac{V_{\text{max}}}{R} \leq I_{1\text{eff}} = 0,485 \cdot \frac{V_{\text{max}}}{R}$

En comparant $i_c(t)^2$ et $i_1(t)^2$, on en déduit que $(i_c(t)^2)_{\text{moy}} = 3 \cdot (i_1(t)^2)_{\text{moy}}$

$$\Leftrightarrow I_{c\text{eff}} = \sqrt{(i_c(t)^2)_{\text{moy}}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{(i_1(t)^2)_{\text{moy}}} = \sqrt{3} \cdot I_{1\text{eff}}$$

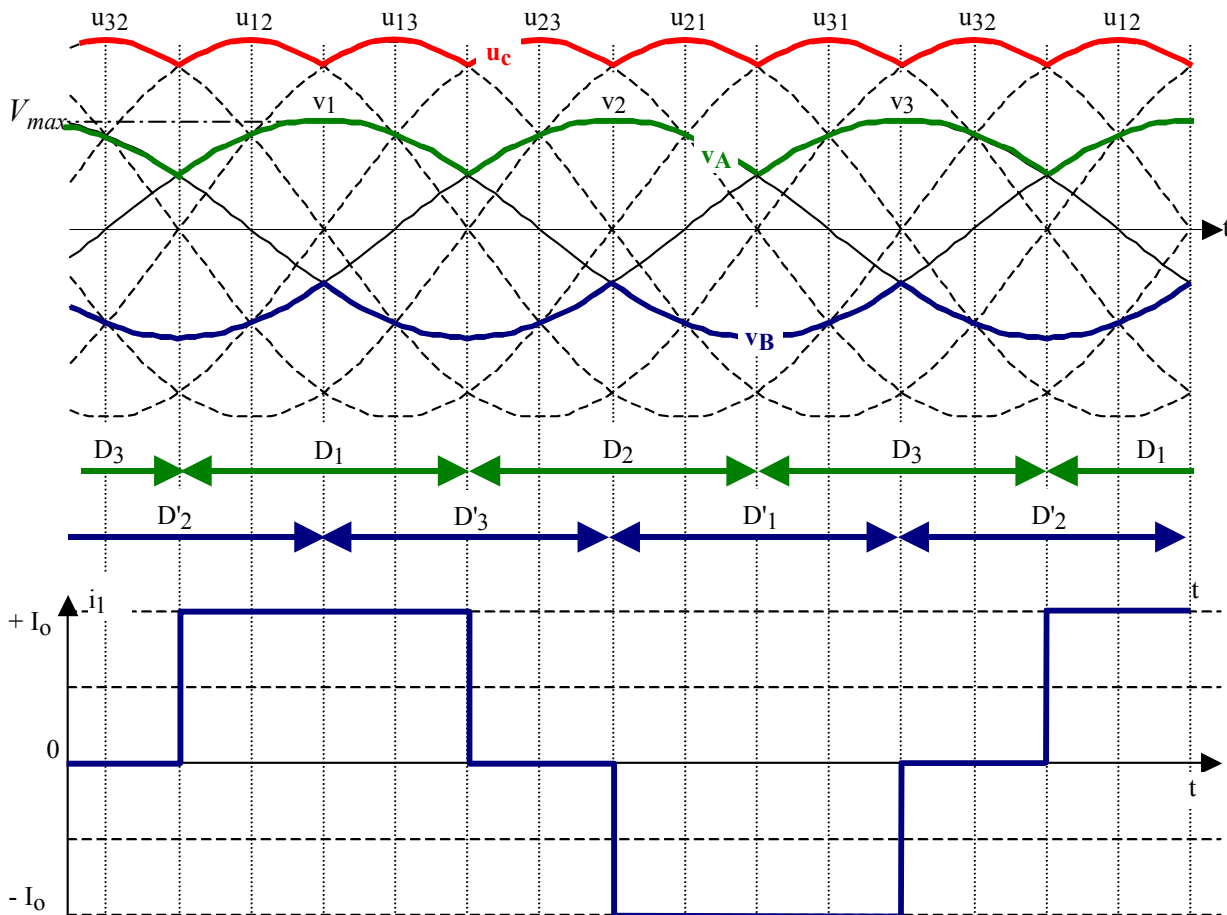
Le pont de diodes (supposées idéales), ne consomme aucune puissance, donc $P_{\text{source}} = P_{\text{charge}} = R \cdot I_{c\text{eff}}^2$

Par définition, le facteur de puissance en triphasé équilibré s'exprime par : $k = \frac{P}{S} = \frac{P}{3.V_{eff}.I_{eff}}$.

$$\text{Ici : } k = \frac{P}{3.V_{eff}.I_{eff}} = \frac{R.I_{c_{eff}}^2}{3.\frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}.I_{eff}} = \frac{R.(I_{1_{eff}}.\sqrt{3})^2}{3.\frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}.I_{eff}} = \frac{R.I_{1_{eff}}.\sqrt{2}}{V_{\max}} = 0,485.\sqrt{2} = 0,686$$

[Retour](#)

Réponse 4:



$$\Rightarrow V_{A_{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_{\max} \cdot \cos(\theta) d\theta = \frac{3V_{\max}}{2\pi} \cdot [\sin(\theta)]_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} = \frac{3V_{\max}}{2\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{\max} = 0,827 \cdot V_{\max}$$

$$U_{C_{moy}} = V_{A_{moy}} - V_{B_{moy}} = 2V_{A_{moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} = 1,65 \cdot V_{\max}$$

➤ Puissance active (ou puissance moyenne) reçue par la charge i_c :

Le courant dans le dipôle « source de courant » étant constant, la puissance moyenne s'exprime par :

$$P = U_{c_{moy}} \cdot I_o = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} \cdot I_o$$

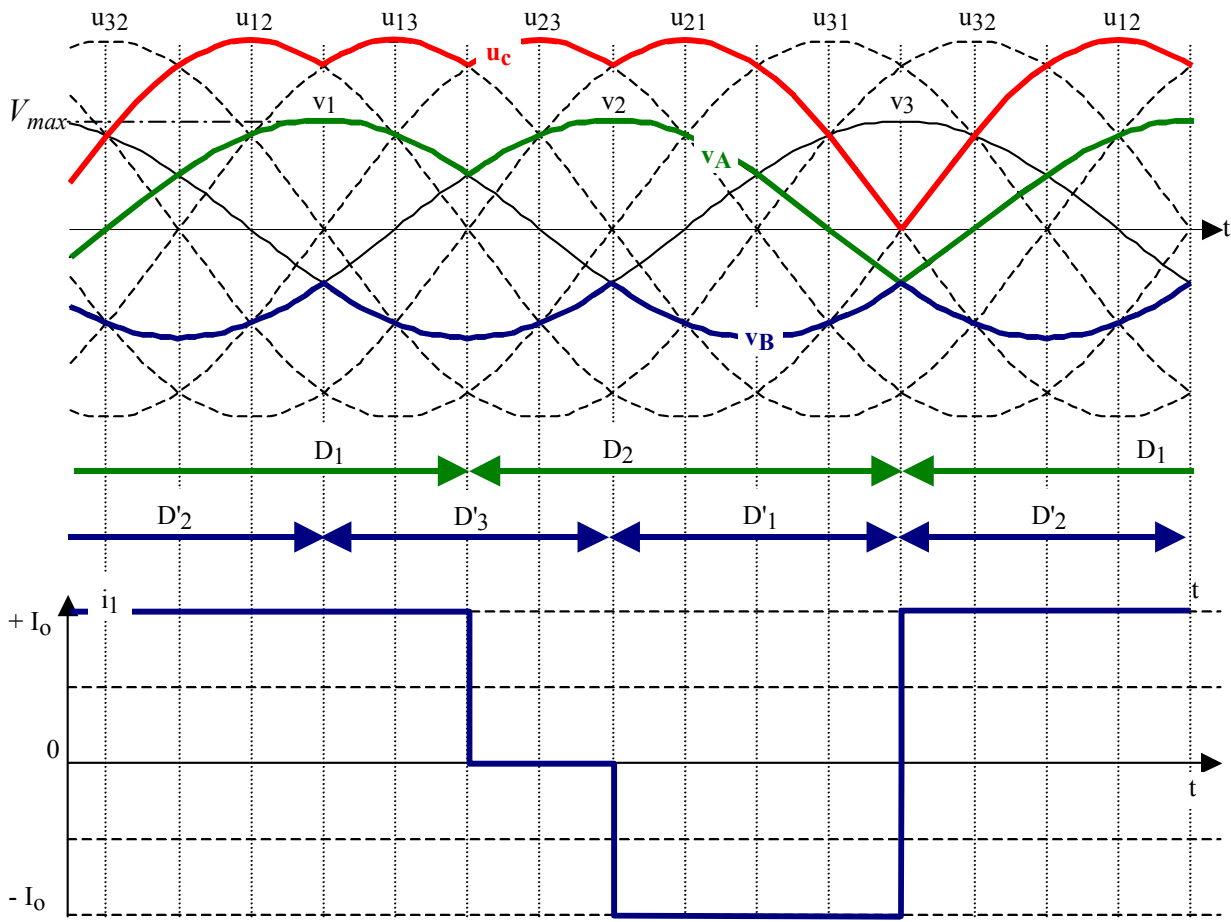
➤ En comparant $i_c(t)^2$ et $i_1(t)^2$, on en déduit que :

$$\left(i_1(t)^2 \right)_{moy} = \frac{2}{3} I_o^2 \Leftrightarrow I_{1_{eff}} = \sqrt{\left(i_1(t)^2 \right)_{moy}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_o$$

$$\Rightarrow \text{Facteur de puissance: } k = \frac{P}{3 \cdot V_{eff} \cdot I_{1_{eff}}} = \frac{U_{c_{moy}} \cdot I_o}{3 \cdot \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_o \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = \frac{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} \cdot I_o}{3 \cdot \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_o \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = \frac{3}{\pi} = 0,955$$

[Retour](#)

Réponse 5:



$$\Rightarrow V_{A_{moy}} = \frac{2}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}} V_{\max} \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{V_{\max}}{\pi} [-\cos(\theta)]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{7\pi}{6}} = \frac{V_{\max}}{\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_{\max}$$

$$\Rightarrow V_{B_{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} -V_{\max} \cdot \cos(\theta) d\theta = -\frac{3V_{\max}}{2\pi} [\sin(\theta)]_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} = -\frac{3V_{\max}}{2\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = -\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{\max}$$

$$\Rightarrow U_{C_{moy}} = V_{A_{moy}} - V_{B_{moy}} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{\max} = 1,38 V_{\max}$$

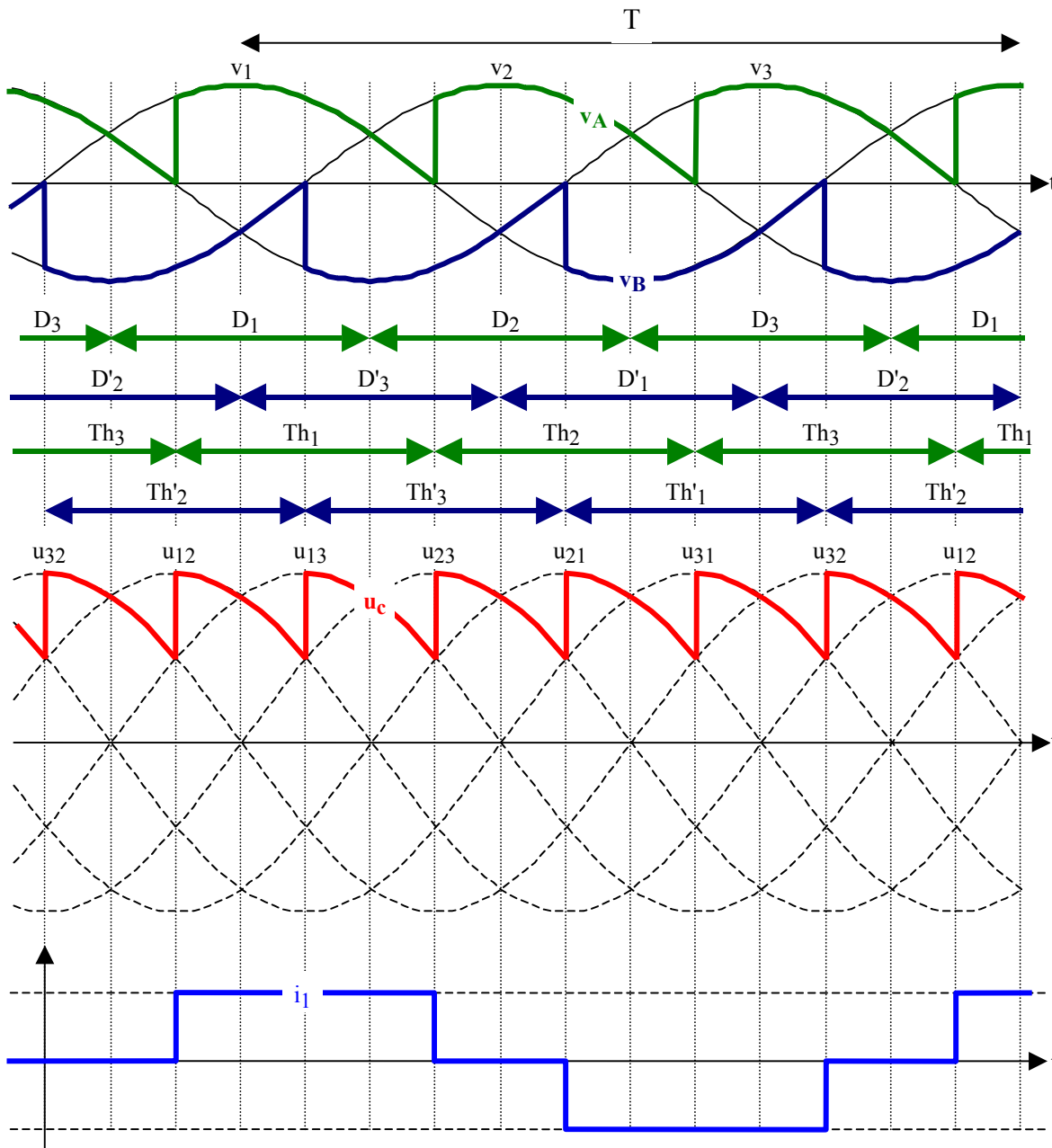
La tension de sortie $U_{C_{moy}}$ est dégradée ($1,38 \cdot V_{\max}$ au lieu de $1,65 \cdot V_{\max}$ en fonctionnement normal), et les diodes D_1 et D_2 sont plus sollicitées.

Nous constatons qu'avec la méthode proposée, nous arrivons sans trop de difficultés à prévoir le comportement du montage en cas de panne partielle.

[Retour](#)

Réponse 6:

Les courbes suivantes sont obtenues avec l'hypothèse de la conduction continue dans la charge RLE ($i_c(t) > 0$)



$$\rightarrow V_{A_{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi} V_{\max} \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta = \frac{3V_{\max}}{2\pi} \cdot [-\cos(\theta)]_{\frac{\pi}{6} + \psi}^{\frac{5\pi}{6} + \psi}$$

$$V_{A_{moy}} = \frac{3V_{\max}}{2\pi} \cdot \left[-\cos\left(\frac{5\pi}{6} + \psi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \psi\right) \right]$$

$$V_{A_{moy}} = \frac{3V_{\max}}{2\pi} \cdot \left[-\cos(\psi) \cos\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \sin(\psi) \sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) + \cos(\psi) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \sin(\psi) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right]$$

$$V_{A_{moy}} = \frac{3V_{\max}}{2\pi} \left[\cos(\psi) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + \cos(\psi) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{2\pi} \cdot \cos(\psi)$$

➤ On voit sur les courbes que $V_{B_{moy}} = -V_{A_{moy}} \Rightarrow V_{B_{moy}} = -\frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{2\pi} \cdot \cos(\psi)$

➤ $u_c(t) = v_A(t) - v_B(t) \Rightarrow U_{c_{moy}} = V_{A_{moy}} - V_{B_{moy}} = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{\pi} \cdot \cos(\psi)$

➤ $u_c(t) = R i_c(t) + E \Rightarrow U_{c_{moy}} = R I_{c_{moy}} + E \Leftrightarrow I_{c_{moy}} = \frac{U_{c_{moy}} - E}{R}$

➤ La conduction continue dans la charge RLE implique que $i_c(t) > 0$, donc

$$\Rightarrow I_{c_{moy}} = \frac{U_{c_{moy}} - E}{R} > 0 \Rightarrow U_{c_{moy}} > E > 0 \Rightarrow \psi < \frac{\pi}{2}.$$

Cette condition $\psi < \frac{\pi}{2}$ est une condition nécessaire, mais elle ne garantit pas à elle seule la conduction continue.

➤ La puissance active reçue par la charge est $P = U_{c_{moy}} \cdot I_o = \frac{3\sqrt{3}V_{\max} \cdot I_o}{\pi} \cdot \cos(\psi)$

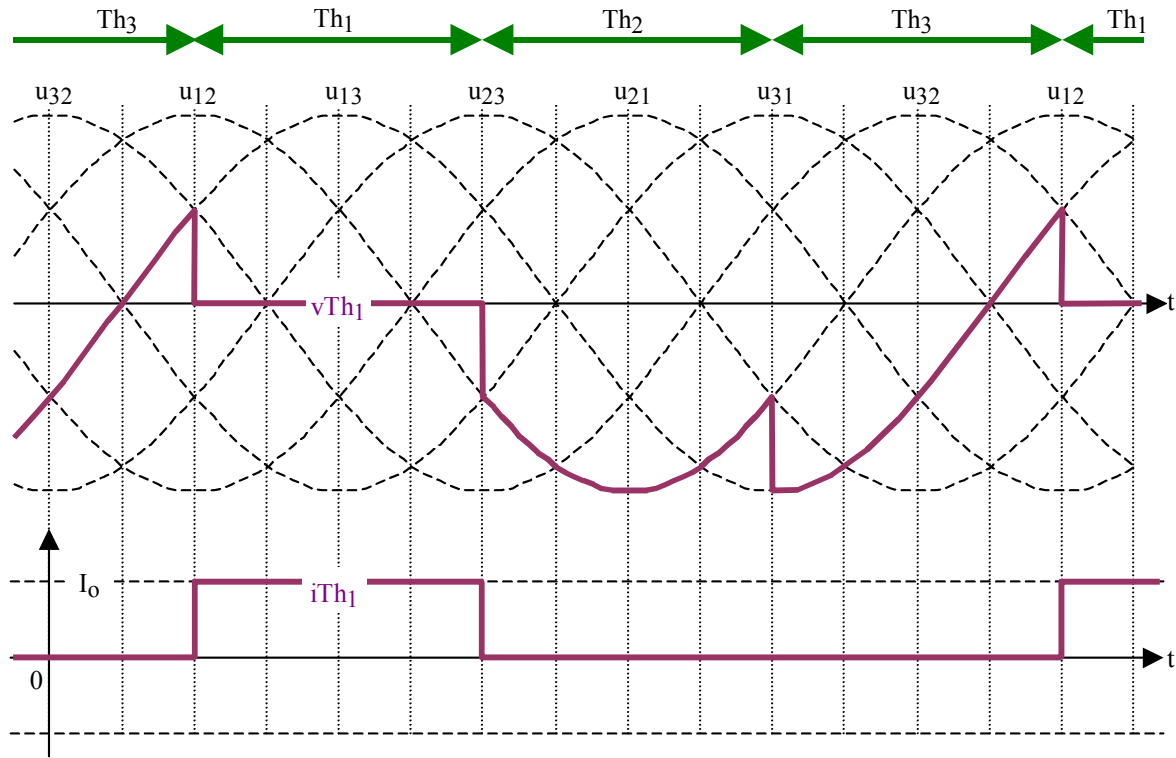
➤ Lorsque les tensions sont triphasées équilibrées et les courants triphasés équilibrés de même période : le facteur de puissance de la ligne (ou PF) a pour expression : $k = \frac{P}{S} = \frac{P}{3V_{eff} \cdot I_{eff}}$. Dans notre cas :

$$k = \frac{\frac{3\sqrt{3}V_{\max} \cdot I_o}{\pi} \cdot \cos(\psi)}{3 \cdot \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot I_o \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = \frac{3}{\pi} \cdot \cos(\psi) = 0,955 \cdot \cos(\psi)$$

On constate que le facteur de puissance (PF) est inférieur à 1 (ce qui est toujours le cas !).

[Retour](#)

Réponse 7:



[Retour](#)

