1 Transport à haute tension à courant continu

1.1 Classification des liens HTCC

Le transport d'énergie à haute tension à courant continu a plusieurs applications et permet:

- La transmission d'énergie électrique par câble pour de grandes distances pouvant excéder 30 km sous l'eau ou sous terre. L'effet capacitif rend la transmission en courant alternatif difficile dans les cas où il est impossible d'installer des stations intermédiaires pour la compensation.
- La connection asynchrone entre 2 systèmes. Une connection à courant alternatif exige que les 2 systèmes aient la même fréquence et affecte la stabilité des systèmes. Une connection asynchrone peut être effectuée en courant continu sans effet sur la stabilité.
- Le transport de puissance élevée par des lignes aériennes pour des distances excédant 600 km et est une alternative économique à la transmission à courant alternatif.

Les liens à haute tension à courant continu peuvent être classifiés comme suit:

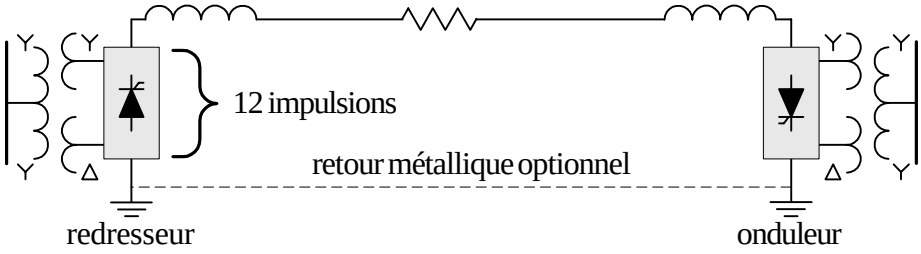


Figure 1.1 Lien HTCC monopolaire

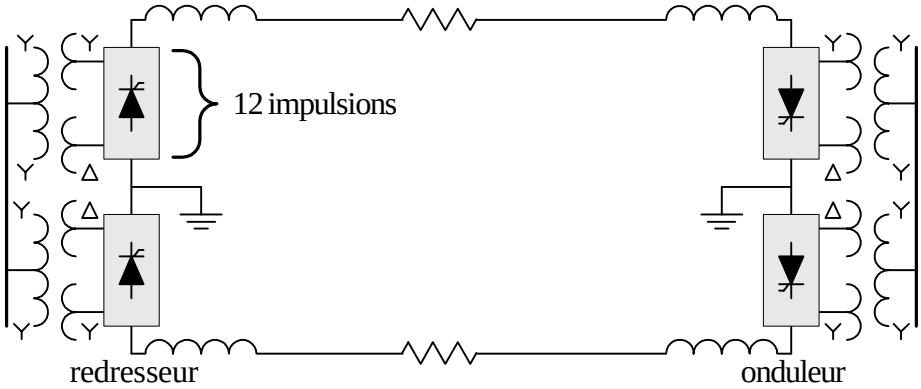


Figure 1.2 Lien HTCC bipolaire

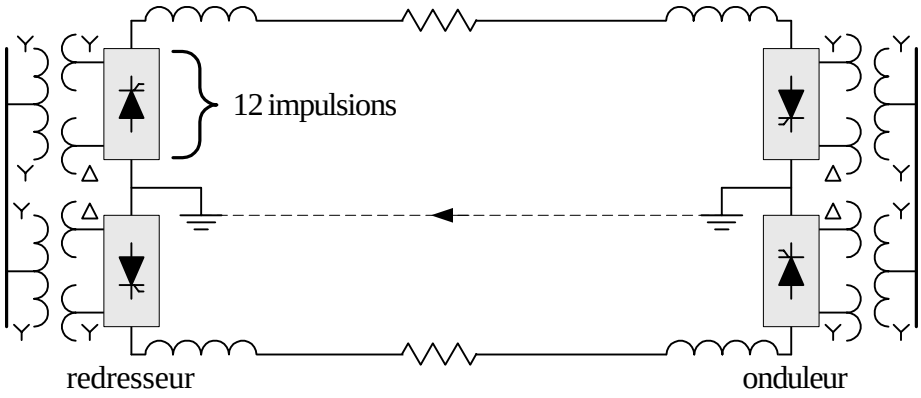


Figure 1.3 Lien HTCC homopolaire

Les liens ont les caractéristiques suivantes:

Lien monopolaire:
Ce lien utilise le retour de courant par la terre.
L'utilisation d'un conducteur métallique est optionnelle et permet de limiter les courants dans les structures métalliques enfouies.

Lien bipolaire:
Ce lien possède 2 polarités inverses.
Normalement le courant de terre est nul.
En cas de perte de ligne, il est possible de transmettre à une puissance réduite de moitié de la puissance nominale. Le courant de retour à la terre est alors égal au courant de ligne.
Un conducteur reliant les neutres est optionnel et peut être composé des fils de garde, d'un conducteur aérien supplémentaire ou de contrepoids. Ce conducteur de retour est utilisé en cas de perte d'une ligne, ou en cas de débalancement. Il permet également de réduire les surtensions excessives susceptibles d'apparaître dans un sol de résistivité élevée.

Lien homopolaire:
Ce type de lien peut être utilisé si le retour à la terre est une alternatique acceptable.
Le processus d'isolation d'une ligne en cas de défaut, et de reconnection est plus simple pour ce type de lien que pour un lien bipolaire.

1.2 Composantes des liens HTCC

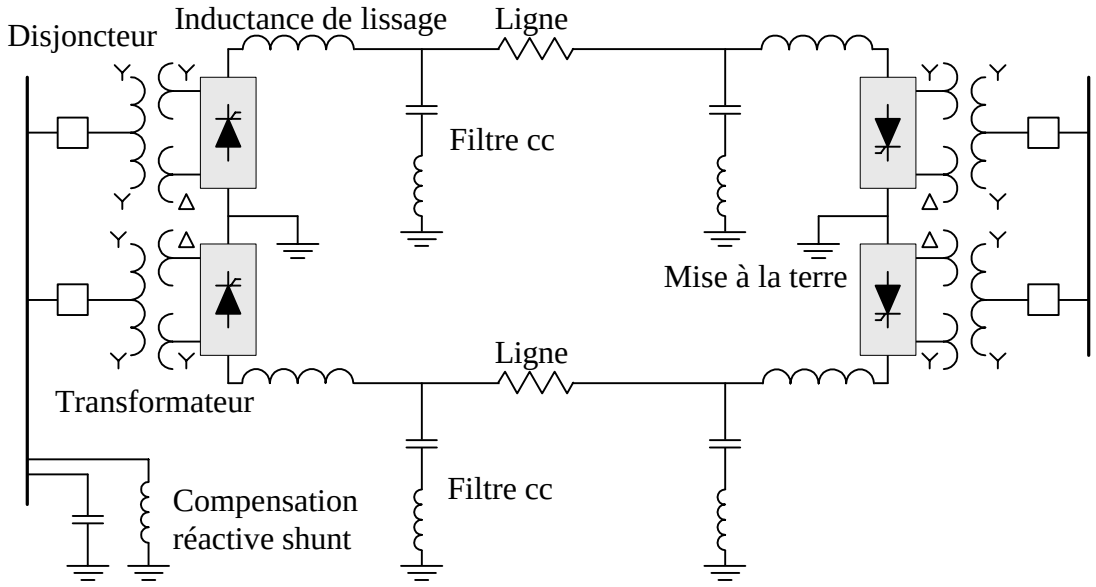


Figure 1.4 Composantes d'un lien HTCC

Les composantes suivantes peuvent être retrouvées dans un lien à courant continu:

Pont convertisseur: Le pont redresseur effectue la conversion ca/cc.
Le pont onduleur effectue la conversion cc/ca.
Les convertisseurs sont composés de ponts à 6 ou 12 impulsions.

Thyristor: Une tension à la gâchette contrôle le moment d'enclenchement du thyristor. Un thyristor en conduction demeure enclenché jusqu'à ce que le courant devienne nul.
Le courant du thyristor peut atteindre 2.5 à 3 kA (en 1970).
La tension continue en mode inverse peut atteindre 3 à 5 kV crête.
Le refroidissement peut être effectué à l'aide des substances suivantes: air, huile, eau, fréon, SF6.
Le thyristor peut être utilisé à l'intérieur ou à l'extérieur.

Thyristor

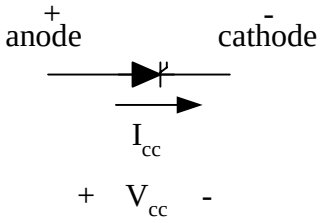


Figure 1.5 Thyristor

Inductance de lissage:	Inductance série pouvant atteindre 1 (H). Diminue les harmonique de tension et de courant sur la ligne cc. Prévient les ratés de commutation. Prévient les discontinuités de courant à faible charge. Limite le courant de court circuit.
Filtres:	Réduisent les harmoniques causées par les convertisseurs du coté cc et ca. Limitent les pertes dues aux harmoniques. Limitent les harmoniques électromagnétiques.
Compensation réactive	Réduisent les harmoniques causées par les convertisseurs du coté cc et ca. Fournissent la puissance réactive aux convertisseurs. Les convertisseurs absorbent de la puissance réactive. Le facteur de puissance doit être corrigé à l'aide de la compensation réactive.
Électrodes:	Les électrode de terre sont utilisées pour permettre le retour de courant et facilite le passage du courant du réseau cc à la terre. Limitent les surtensions de terre. Limitent l'élévation de température du sol. Limitent le gradient de tension. Un conducteur de terre additionnel peut être utilisé pour limiter le courant de terre.
Ligne cc:	Lignes aériennes ou câbles. 2 conducteurs requis au lieu de 3. Construction similaire aux lignes ca.
Disjoncteur:	Permet d'isoler le circuit en cas de défaut au transformateur. Permet d'isoler les réseaux cc et ca. Les convertisseurs peuvent également être utilisés pour isoler un défaut sur le lien cc.

1.3 Pont convertisseur à 6 impulsions

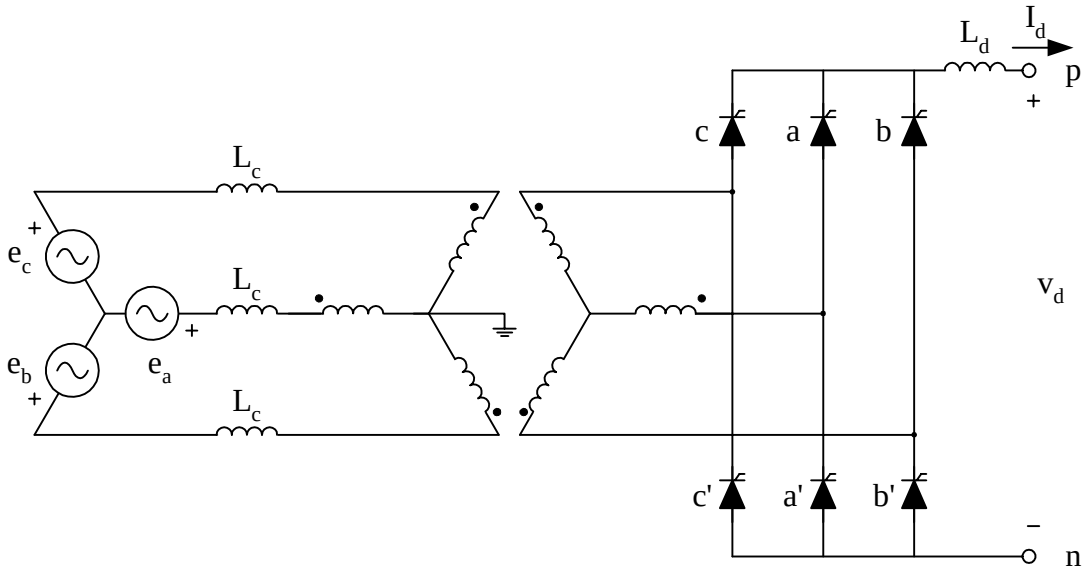


Figure 1.6 Pont convertisseur à 6 impulsions

L'analyse des convertisseurs est effectuée à partir des hypothèses suivantes:
Le réseau ca est représenté par une source de tension idéale en série avec une inductance.
Le courant du lien à courant continu est constant ou de façon équivalente l'inductance de lissage L_d est suffisamment grande pour pouvoir négliger les fluctuations de I_d.
Le thyristor se comporte comme un interrupteur idéal à résistance nulle en état de conduction et à résistance infinie en état de non conduction.
Soit

$$
\begin{aligned}
e_a &= E_m \cos(\omega t) \\
e_b &= E_m \cos(\omega t - 120°) \\
e_c &= E_m \cos(\omega t + 120°) \\
e_{ab} &= e_a - e_b = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 30°) \\
e_{bc} &= e_b - e_c = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90°) \\
e_{ca} &= e_c - e_a = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 150°)
\end{aligned}
\qquad (1.1)
$$

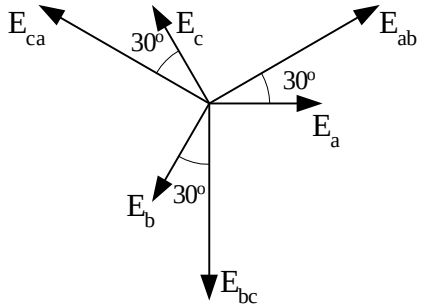


Figure 1.7 Phaseur de tension

Alors les thyristors sont enclenchés dans l'ordre suivant:

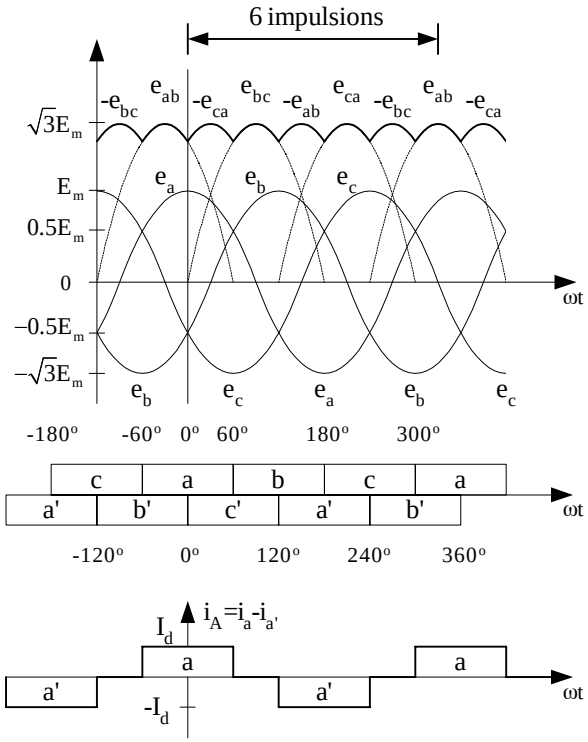


Figure 1.8 Ordre d'enclenchement des thyristors

Le thyristor “a” est enclenché lorsque ωt est compris entre [-60°, 60°]. La tension à la source de la phase a est alors égale ou supérieure à $E_m/2$. Le thyristor “b' ” est enclenché lorsque ωt est compris entre [-120°, 0°]. La tension aux bornes du lien cc lorsque ωt est compris entre [-60°, 0°] est égale à la tension ligne-ligne entre les phases “a” et “b”. La tension moyenne sur cette période est obtenue par l'expression suivante:

$$\begin{aligned} V_{d0} &= \frac{1}{T}\int_{-T}^{0} e_{ab}(\omega t)\, d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi/3}\int_{-\pi/3}^{0} \sqrt{3}E_m \cos(\omega t + 30°)\, d(\omega t) \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \\ &= 1.65\, E_m \end{aligned} \tag{1.2}$$

Soit

$$E_{LN} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad E_{LL} = \sqrt{\frac{3}{2}} E_m \tag{1.3}$$

Alors
$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} = 2.34\ E_{LN} \tag{1.4}$$

et
$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} = 1.35\ E_{LL} \tag{1.5}$$

1.4 Délai d'enclenchement

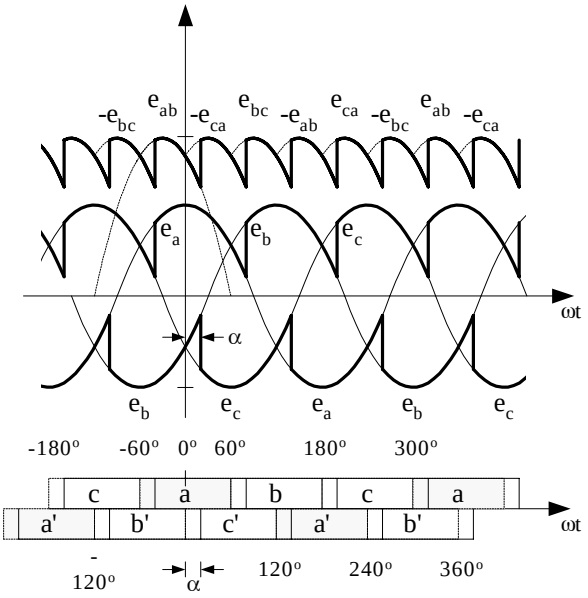


Figure 1.9 Délai d'enclenchement

Dans le cas où le thyristor est enclenché avec un délai de α degré, la tension moyenne du lien cc est obtenu par la moyenne de la tension ligne-ligne durant la période de conduction des 2 thyristors:

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha-\pi/3}^{\alpha} e_{ab}(t)\ d(\omega t) \\ &= \frac{3}{\pi} \int_{\alpha-\pi/3}^{\alpha} \sqrt{3} E_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t) \\ &= \frac{3\sqrt{3} E_m}{\pi} \cos(\alpha) \end{aligned} \tag{1.6}$$

et
$$V_d = V_{d0} \cos(\alpha) \quad \text{où} \quad \alpha \in [0°, 180°] \tag{1.7}$$

1.5 Relation courant-phase

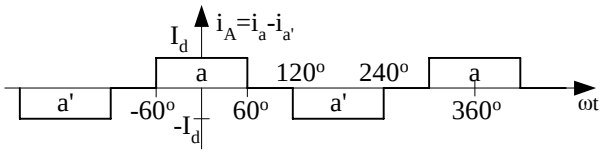


Figure 1.10 Courant dans la phase "a" du réseau ca

En décomposant le courant dans la phase "a" du réseau ca en terme des harmoniques, nous obtenons la série suivante:

$$i_A(t) = i_{ca}(t) = I_{m1}\cos\omega t + I_{m3}\cos 3\omega t + I_{m5}\cos 5\omega t + \ldots \tag{1.8}$$

Nous pouvons déduire l'amplitude de la fondamentale en multipliant l'expression du courant ca par cos ωt et en intégrant de -π/2 à π/2:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} i_{ca}(t)\cos\omega t \; d(\omega t) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_{m1}\cos^2\omega t \; d(\omega t)$$

$$\int_{-\pi/3}^{\pi/3} I_d \cos\omega t \; d(\omega t) = I_{m1}\frac{\pi}{2} \tag{1.9}$$

$$I_d\sqrt{3} = I_{m1}\frac{\pi}{2}$$

et

$$I_{m1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \tag{1.10}$$

En terme de valeur efficace, nous avons:

$$I_{aRMS} = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \tag{1.11}$$

En négligeant les pertes dans le convertisseur, les transits de puissance du réseau ca et du réseau cc doivent être égale:

$$P_{ca} = P_{cc}$$

$$3E_{LN} I_{aRMS}\cos\phi = V_d I_d$$

$$3E_{LN}\left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d\right)\cos\phi = V_{d0}\cos\alpha \; I_d \tag{1.12}$$

$$3E_{LN}\left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d\right)\cos\phi = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN}\right)\cos\alpha \; I_d$$

En simplifiant, nous obtenons:

$$\cos\phi = \cos\alpha \qquad (1.13)$$

et

$$\phi = \alpha \qquad (1.14)$$

où ϕ:Angle entre la tension ca et le courant ca.
α:Délai d'enclenchement du thyristor.

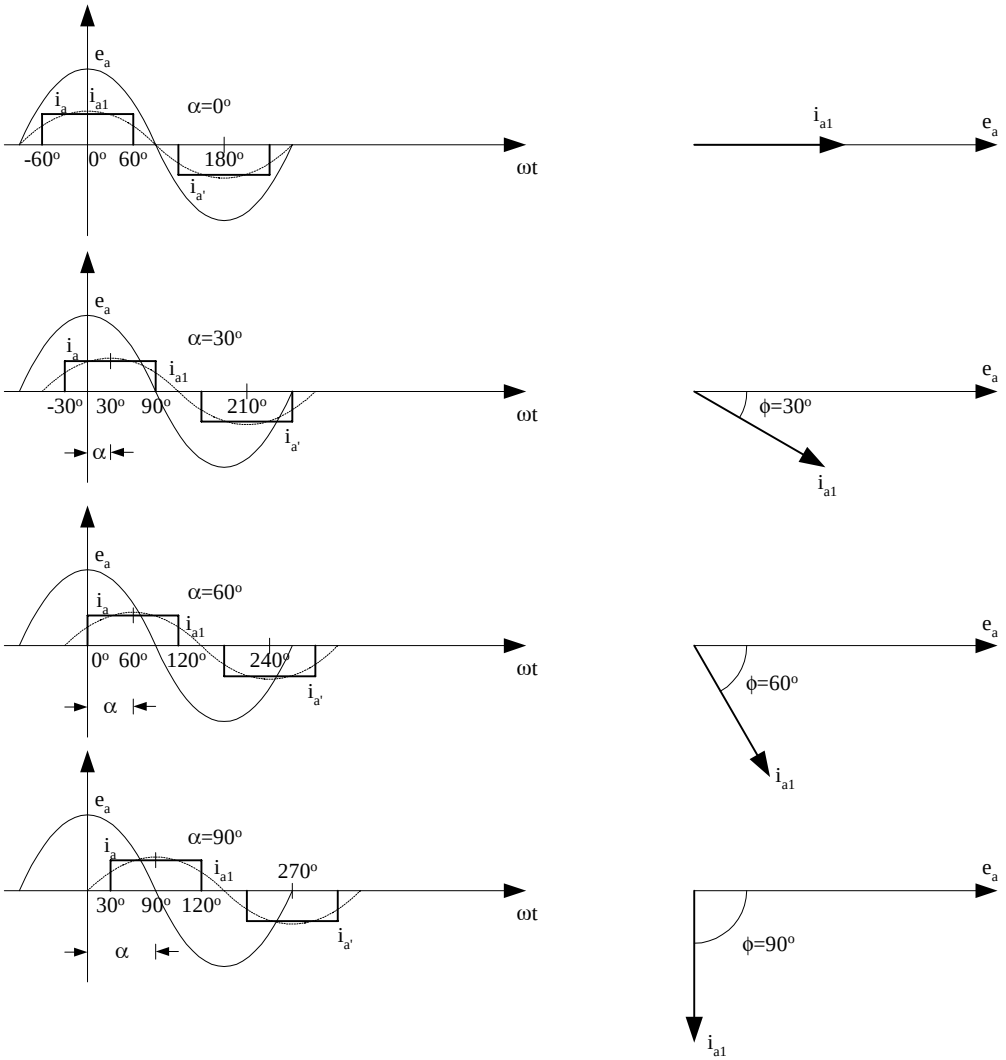


Figure 1.11 Effet du délai d'enclenchement sur le réseau ca

1.6 Délai de commutation

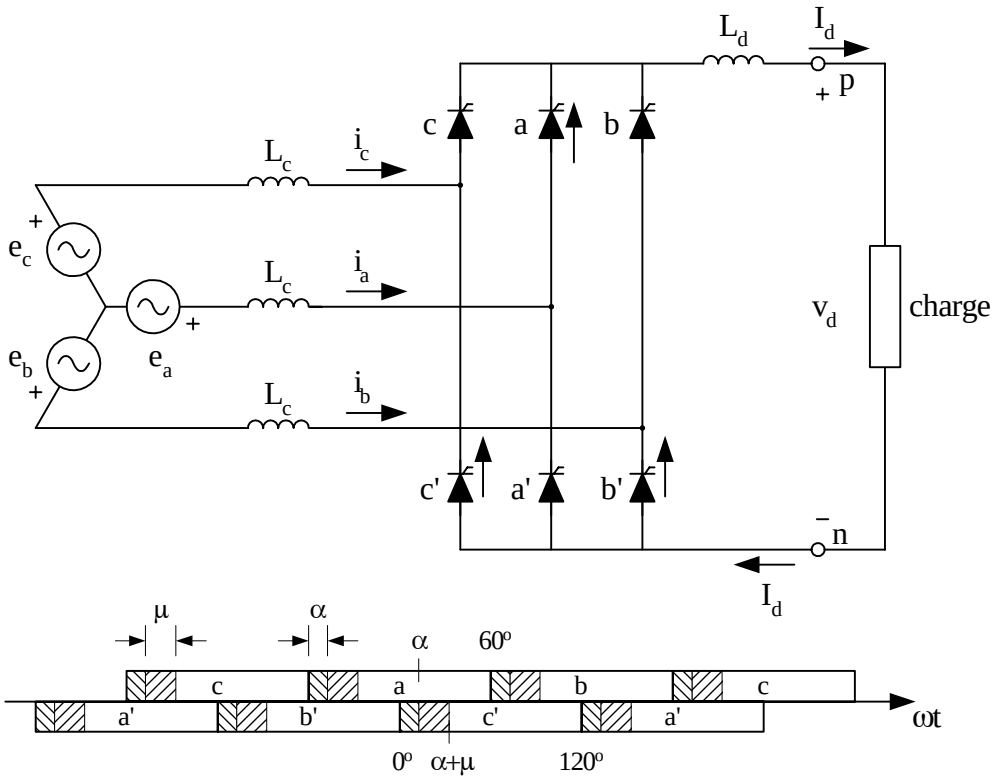


Figure 1.12 Effet du délai de commutation sur la tension du lien cc

Lorsque ωt est égal à α, le thyristor “b' ” cesse de conduire et le thyristor “c' ” entre en état de conduction. Le courant de la phase i_b ne peut changer instantanément à cause de l'inductance L_c et le transfert de courant d'une phase à l'autre exige un certain temps. Soit μ le temps de commutation requis pour le transfert de courant d'une phase à l'autre. Durant la commutation, 3 thyristors conduisent simultanément:

Au début de la commutation	$\omega t=\alpha$,	$i_a = I_d$	$i_b = -I_d$	$i_c = 0$
À la fin de la commutation	$\omega t=\alpha+\mu$,	$i_a = I_d$	$i_b = 0$	$i_c = -I_d$

On définit l'angle d'extinction δ par la somme de l'angle d'allumage et de l'angle de commutation:

$$\delta = \alpha + \mu \tag{1.15}$$

α	:	Angle d'allumage (ou angle de retard du redresseur) (deg)
μ	:	Angle de commutation dû à L_c (deg)
δ	:	Angle d'extinction (deg)

L'angle de commutation doit être inférieur à 60^o sinon 4 thyristors conduiront en même temps. En pratique μ est compris entre 15^o et 25^o. Le calcul de l'angle de commutation est effectué en considérant que les thyristors "b'" et "c'" sont en état de conduction pour ωt compris entre α et $\alpha+\mu$ et forment une maille avec les sources e_b et e_c:

$$\begin{aligned} e_b(t) - e_c(t) &= L_c \frac{di_b}{dt} - L_c \frac{di_c}{dt} = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90°) \\ i_b(t) + i_c(t) &= -I_d \end{aligned} \tag{1.16}$$

En solutionnant pour le courant $i_b(t)$, on obtient:

$$e_n(t) = \frac{e_b(t) + e_c(t)}{2} \tag{1.17}$$

$$\begin{aligned} \int_{-I_d}^{0} di_b &= \frac{1}{2L_c} \int_{\alpha/\omega}^{(\alpha+\mu)/\omega} \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90°)\, dt \\ \cos(\alpha+\mu) &= \cos(\alpha) - \frac{2L_c \omega I_d}{\sqrt{3} E_m} \end{aligned} \tag{1.18}$$

On obtient également la relation suivante entre L_c et μ:

$$L_c \omega I_d = \frac{\sqrt{3} E_m}{2} \left(\cos(\alpha) - \cos(\alpha+\mu) \right) = \frac{\sqrt{3} E_m}{2} \left(\cos(\alpha) - \cos(\delta) \right) \tag{1.19}$$

Pendant la commutation, on obtient:

$$\begin{aligned} \int_{-I_d}^{i_b(t)} di_b &= \frac{1}{2L_c} \int_{\alpha/\omega}^{t} \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90°)\, dt \\ i_b(t) &= \frac{\sqrt{3} E_m}{2 L_c \omega} \left(\cos(\alpha) - \cos(\omega t) \right) - I_d \end{aligned} \tag{1.20}$$

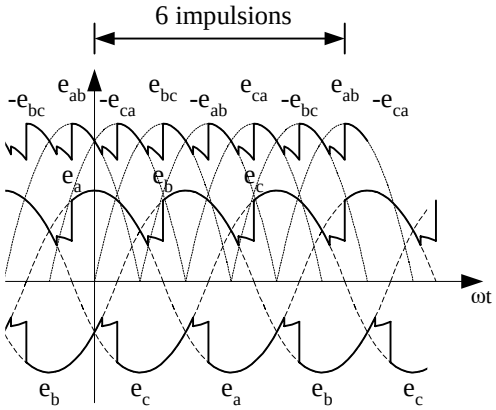


Figure 1.13 Effet de la commutation sur la tension du lien cc

1.7 Circuit équivalent du redresseur

La tension moyenne aux bornes du lien cc est donnée par la relation suivante:

$$V_d = \frac{1}{\pi/3}\left[\int_0^{\alpha/\omega} e_{ab}(t)\,d(\omega t) + \int_{\alpha/\omega}^{\delta/\omega}\left(e_a(t) - \frac{e_b(t)+e_c(t)}{2}\right)d(\omega t) + \int_{\delta/\omega}^{\pi/3} -e_{ca}(t)\,d(\omega t)\right] \quad (1.21)$$

$$V_d = \frac{3}{\pi}\left[\begin{array}{l}\int_0^{\alpha/\omega}\sqrt{3}E_m\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d(\omega t)\\ +\int_{\alpha/\omega}^{\delta/\omega}\left(\frac{3}{2}E_m\cos(\omega t)\right)d(\omega t)\\ +\int_{\delta/\omega}^{\pi/3}\sqrt{3}E_m\cos\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)d(\omega t)\end{array}\right]$$

$$= \frac{3\sqrt{3}E_m}{\pi}\cos(\alpha) - \frac{3}{\pi}\frac{\sqrt{3}E_m}{2}\left(\cos(\alpha)-\cos(\delta)\right)$$

À partir des relations développées précédemment, nous trouvons:

$$\begin{aligned} V_d &= V_{d0}\cos(\alpha) - \frac{3}{\pi}L_c\omega I_d \\ &= V_{d0}\cos(\alpha) - R_c I_d \end{aligned} \quad (1.22)$$

où on définit la résistance de commutation équivalente par l'expression suivante:

$$R_c = \frac{3}{\pi}L_c\omega = \frac{3X_c}{\pi} \quad (1.23)$$

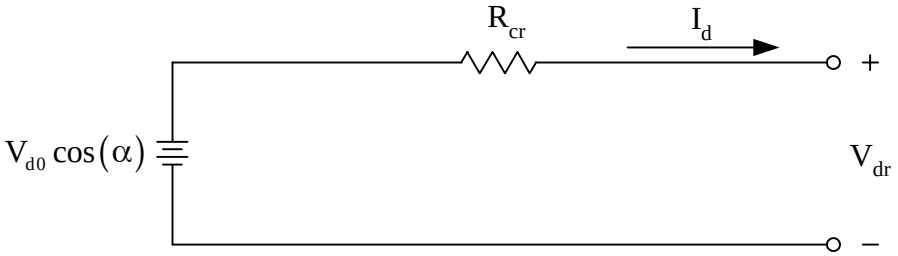


Figure 1.14 Circuit équivalent du redresseur

1.8 Relation entre les courants des réseaux cc et ca

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - \Delta V_d$$

Nous avons que

$$= V_{d0}\frac{(\cos\alpha + \cos\delta)}{2} \qquad (1.24)$$

$$= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN}\frac{(\cos\alpha + \cos\delta)}{2}$$

À partir des équations de la puissance, on trouve

$$P_{ca} = P_{cc}$$

$$3E_{LN}I_L\cos\phi = V_d I_d \qquad (1.25)$$

$$= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN}\frac{(\cos\alpha + \cos\delta)}{2} I_d$$

En simplifiant, on obtient:

$$I_L\cos\phi = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d\frac{(\cos\alpha + \cos\delta)}{2} \qquad (1.26)$$

Si μ=0 alors

$$\frac{(\cos\alpha + \cos\delta)}{2} = \cos\alpha \qquad (1.27)$$

et

$$I_L = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \qquad (1.28)$$

Si μ=30^o, alors l'approximation $\frac{(\cos\alpha + \cos\delta)}{2} \approx \cos\alpha$ produit une erreur de 6.7%

Si μ<30^o, alors l'approximation produit une erreur < 6.7%

1.9 Opération en mode inverse pour l'onduleur

Les relations suivantes ont été développées pour le redresseur:

$$\Delta V_d = \frac{V_{d0}}{2}(\cos\alpha - \cos\delta)$$

$$V_d = V_{d0} - \Delta V_d$$

$$= \frac{V_{d0}}{2}(\cos\alpha + \cos\delta)$$

Le passage de V_d de la valeur positive à négative est effectué lorsque:

$$\cos\alpha_t + \cos\delta_t = 0$$
$$\alpha_t = \pi - \delta_t = \pi - \alpha_t - \mu \qquad (1.29)$$
$$\alpha_t = \frac{\pi - \mu}{2}$$

Il est possible que le potentiel de l'anode du thyristor “a” devient négatif en autant que: $e_b > e_a$
La tension aux bornes du thyristor est négative après son extinction.

Pour l'onduleur, on définit les angles suivant:
Angle d'amorçage: $\beta = \pi - \alpha$
Angle d'extinction: $\gamma = \pi - \delta$

Le courant et la tension aux bornes de l'onduleur deviennent

$$I_d = \frac{\sqrt{3}E_m}{2L_c\omega}(\cos\alpha - \cos\delta) = \frac{\sqrt{3}E_m}{2L_c\omega}(-\cos\beta + \cos\gamma) \qquad (1.30)$$

$$V_d = V_{d0}\frac{(\cos\alpha + \cos\delta)}{2} = V_{d0}\frac{(-\cos\beta - \cos\gamma)}{2}$$
$$V_{di} = -V_d = V_{d0}\frac{(\cos\beta + \cos\gamma)}{2} \qquad (1.31)$$

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - R_c I_d$$
$$V_{di} = V_{d0}\cos\beta + R_c I_d \qquad (1.32)$$

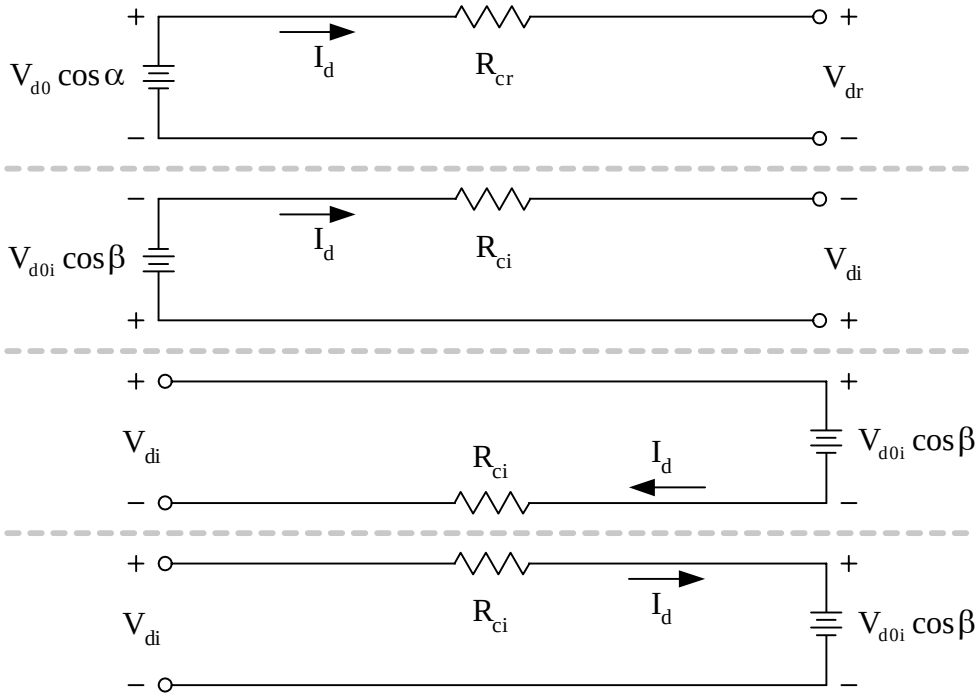


Figure 1.15 Circuit équivalent de l'onduleur

1.10 Analyse d'un lien cc

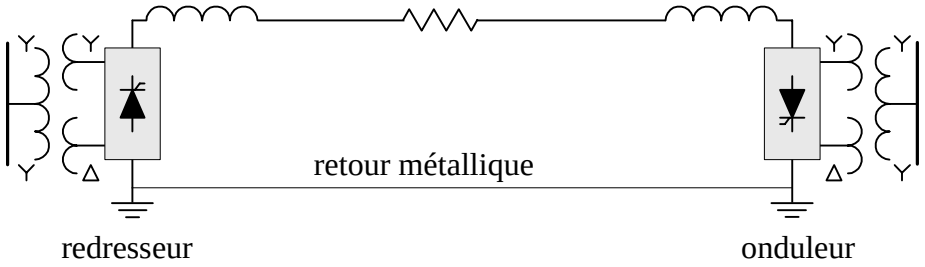


Figure 1.16 Lien HTCC monopolaire

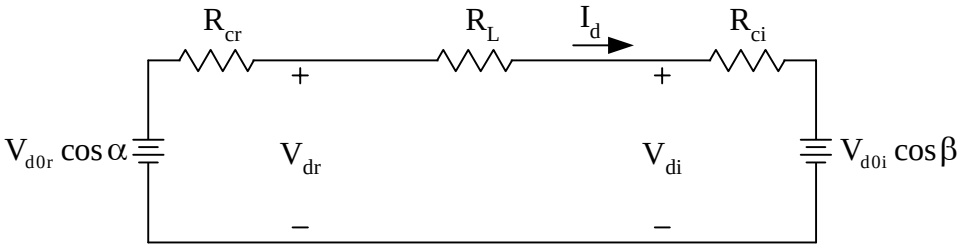


Figure 1.17 Circuit équivalent du lien HTCC monopolaire

Le courant du lien cc est donné comme suit:

$$I_d = \frac{V_{dr}\cos\alpha - V_{di}\cos\beta}{R_{cr} + R_L + R_{ci}} \tag{1.33}$$

La puissance fournie au lien cc aux bornes du redresseur est donnée par:

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \tag{1.34}$$

La puissance absorbée par l'onduleur est donnée par:

$$P_{di} = V_{di} I_d = P_{dr} - R_L I_d^2 \tag{1.35}$$

1.11 Lien cc à 12 impulsions

Un lien cc à 12 impulsions est composé de deux ponts convertisseurs en série.
Un pont a une connection YY au niveau des transformateurs triphasés.
Un autre pont a une connection YΔ.

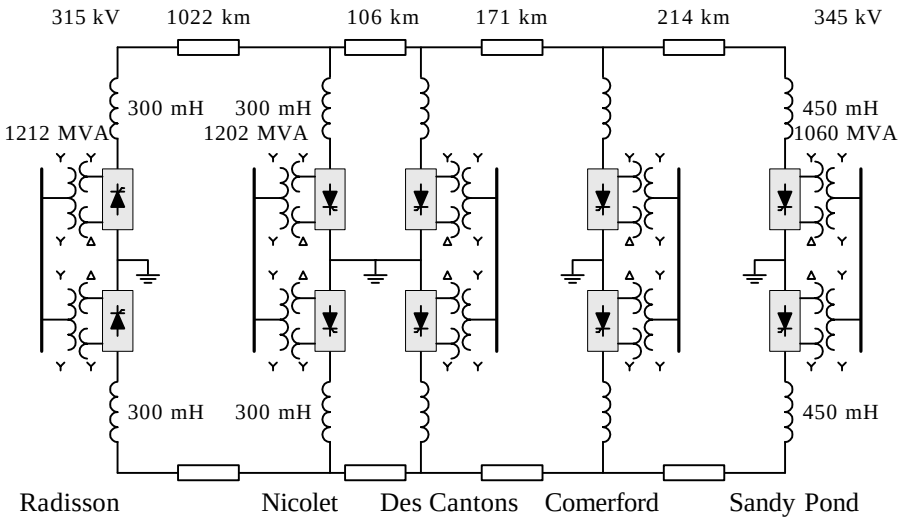


Figure 1.18 Lien cc multiterminal

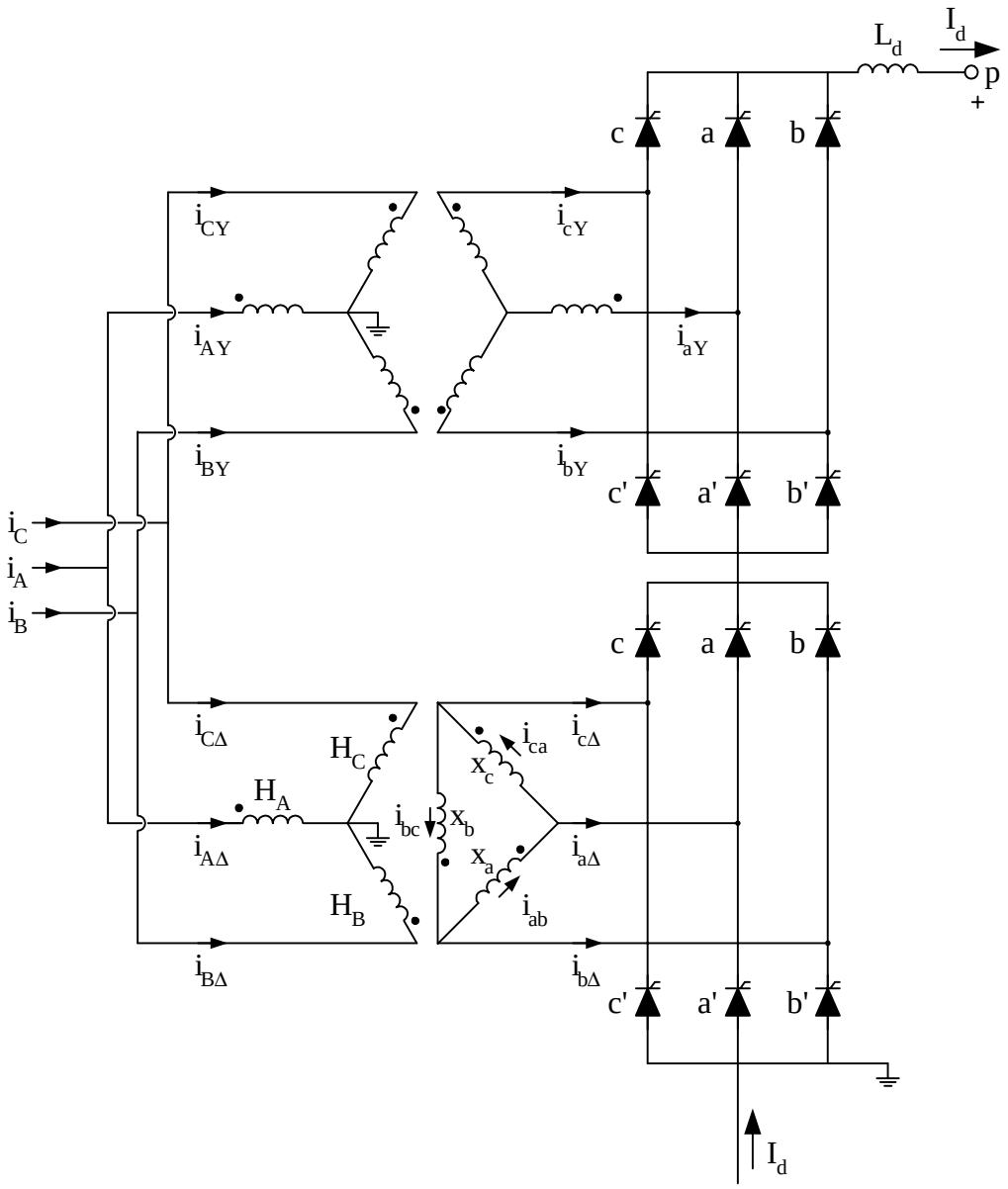


Figure 1.19 Pont convertisseur à 12 impulsions

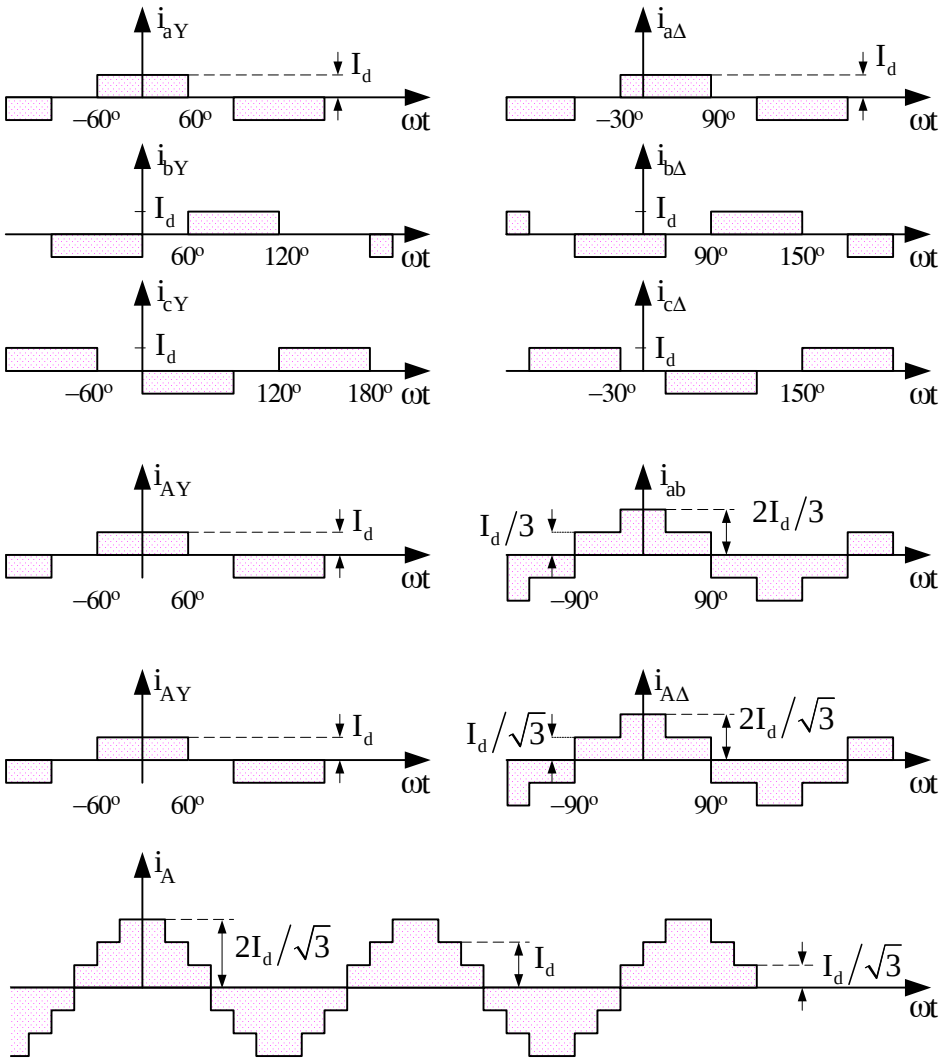


Figure 1.20 Courant dans les enroulements des transformateurs YY et YΔ

La forme du courant $i_{aY}(t)$ a été déterminée au début du chapître. Le courant $i_{a\Delta}(t)$ a la même forme sauf qu'il est décalé dans le temps de 30° dû au déphasage introduit par le transformateur Y-Δ.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les noeuds au secondaire du transformateur Y-Δ, on obtient:

$$\begin{aligned} i_{ab} &= i_{bc} - i_{b\Delta} \\ i_{bc} &= i_{bc} \\ i_{ca} &= i_{bc} + i_{c\Delta} \end{aligned} \tag{1.36}$$

Pour avoir un courant nul au neutre du transformateur YΔ, on doit avoir:

$$i_{ab} + i_{bc} + i_{ca} = 0 \tag{1.37}$$

Les courants dans les enroulements du transformateur delta peuvent être exprimés en fonction des courants de ligne.

$$\begin{aligned} i_{ab} &= i_{bc} - i_{b\Delta} = \frac{-2i_{b\Delta} - i_{c\Delta}}{3} = \frac{i_{a\Delta} - i_{b\Delta}}{3} \\ i_{bc} &= \frac{i_{b\Delta} - i_{c\Delta}}{3} \\ i_{ca} &= i_{bc} + i_{c\Delta} = \frac{i_{b\Delta} + 2i_{c\Delta}}{3} = \frac{i_{c\Delta} - i_{a\Delta}}{3} \end{aligned} \qquad (1.38)$$

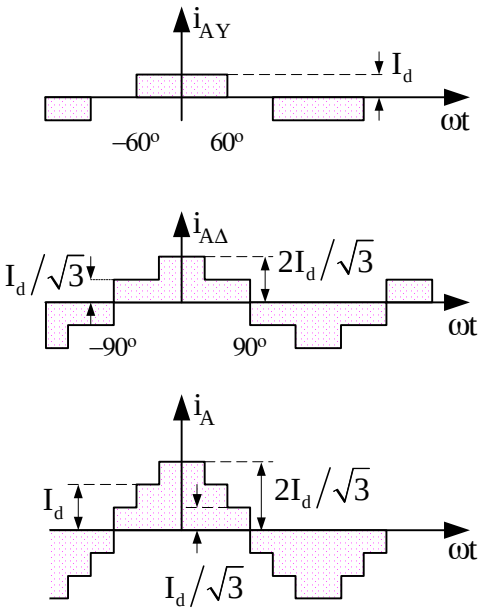
Un rapport de transformation $v_H / v_x = 1/\sqrt{3}$ tel que $i_{A\Delta} / i_{ab} = \sqrt{3}$ donnera la forme de courant à la figure précédente.

Le contenu harmonique des courants de ligne du réseau ca est obtenu à partir de la série de Fourier:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t \quad \text{où} \quad a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos n\omega t \, dt \qquad (1.39)$$

Pour les courants au primaire des transformateurs, on obtient:

$$\begin{aligned} i_{AY}(t) &= \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi}\left(\cos\omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \cdots\right) \\ i_{A\Delta}(t) &= \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi}\left(\cos\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t + \cdots\right) \\ i_A(t) &= i_{AY}(t) + i_{A\Delta}(t) \\ &= \frac{4\sqrt{3}I_d}{\pi}\left(\cos\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \frac{1}{23}\cos 23\omega t + \cdots\right) \end{aligned} \qquad (1.40)$$



$$i_{AY}(t) = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi}\left(\cos\omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \cdots\right)$$

$$i_{A\Delta}(t) = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi}\left(\cos\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t + \cdots\right)$$

$$i_A(t) = \frac{4\sqrt{3}I_d}{\pi}\left(\cos\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \frac{1}{23}\cos 23\omega t + \cdots\right)$$

Figure 1.21 Courant dans les enroulements des transformateurs YY et YΔ

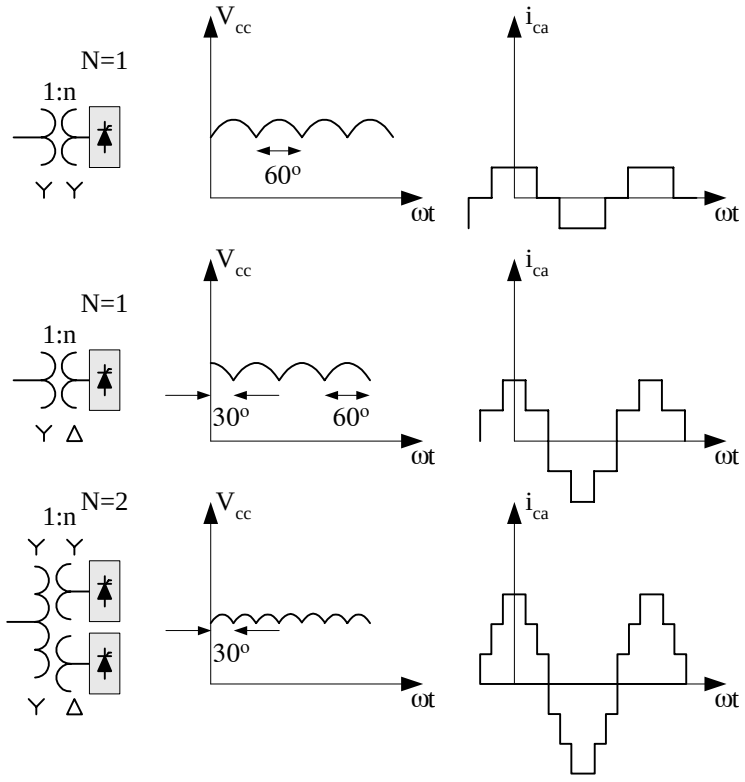


Figure 1.22 Forme d'ondes de la tension cc et du courant ca

Soit N : Nombre de convertisseurs en série
n : Rapport des transformateurs

Alors la tension du lien cc devient:

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - \frac{N3X_c}{\pi} I_d \tag{1.41}$$

où

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} NnE_{LL} \tag{1.42}$$

Le courant de ligne du réseau ca devient:

$$I_L = \frac{\sqrt{6}}{\pi} NnI_d \tag{1.43}$$

Exemple 1.1:
Un pont convertisseur redresseur ca/cc à 12 impulsions est alimenté par un transformateur triphasé 220kV/110kV. La tension au primaire est de 230kV et le rapport des transformateurs est de 0.48. Le courant cc fournie par le redresseur est de 2000 A.
Calculez:

a) La tension cc quand $\alpha=20^o$ et $\mu=18^o$
b) La réactance de commutation Xc
c) La composante fondamentale du courant ca
d) Le facteur de puissance
e) La puissance active et réactive du coté ca.

Solution:Un pont de 12 impulstion comprend 2 ponts de 6 impulsions en série.
On prendra N=2.

a) Tension cc sans charge

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} NnE_{LL} = 1.3505 \times 2 \times 0.48 \times 230 \text{ kV} = 298.18 \text{ kV}_{cc}$$

Angle d'extinction: $\delta=\alpha+\mu=20^o+18^o=38^o$

La réduction de la tension cc due à la commutation est donnée par:

$$\Delta V_d = V_{d0} \frac{(\cos\alpha - \cos\delta)}{2} = 298.18 \text{ kV} \times \frac{(\cos 20° - \cos 38°)}{2} = 22.61 \text{ kV}_{cc}$$

La tension cc à la sortie du pont convertisseur devient

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - \Delta V_d = 298.18 \times \cos 20° - 22.61 = 257.58 \text{ kV}_{cc}$$

b) $\Delta V_d = NR_cI_d$

La résistance de commutation est $R_c = \frac{\Delta V_d}{NI_d} = \frac{22.61 \text{ kV}}{2 \times 2 \text{ kA}} = 5.65 \ \Omega$

La réactance de commutation est $X_c = \frac{\pi R_c}{3} = 5.92 \ \Omega / \text{phase}$

c)

La composante fondamentale du courant ca est

$$I_L = \frac{\sqrt{6}}{\pi} NnI_d = 0.7797 \times 2 \times 0.48 \times 2 \text{ kA} = 1.497 \text{ kA}$$

d)

Le facteur de puissance est $\cos\phi = \frac{V_d}{V_{d0}} = \frac{257.58}{298.18} = 0.8638$

Le déphasage entre la tension et le courant ca est $\phi = \cos^{-1}(0.8638) = 30.25°$

e)

La puissance active est $P_{ca} = P_{cc} = V_dI_d = 257.58 \text{ kV}_{cc} \times 2 \text{ kA}_{cc} = 515.16 \text{ MW}$

La puissance réactive est $Q_{ca} = P_{ca}\tan\phi = 515.16 \text{ MW} \times \tan 30.25° = 300.43 \text{ MVar}$

1.12 Caractéristiques tension courant des ponts convertisseurs

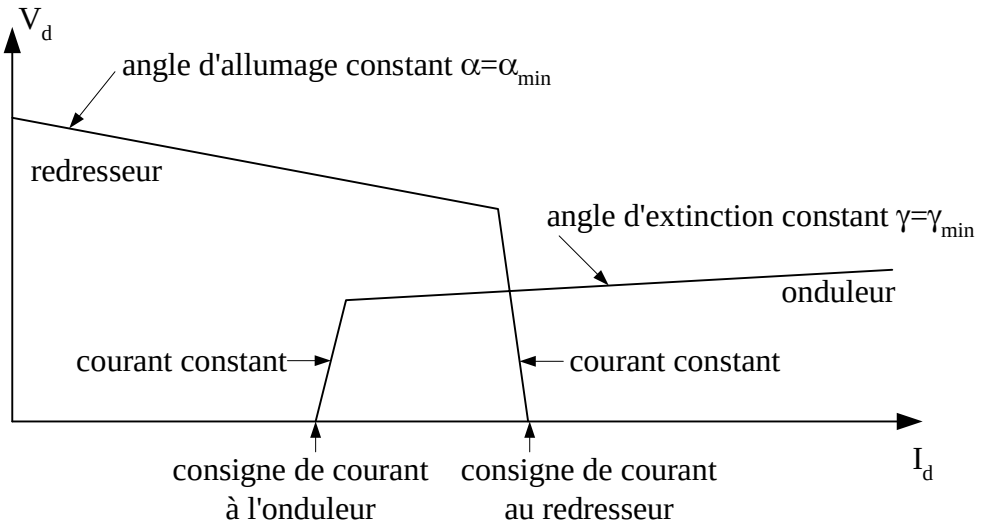


Figure 1.23 Caractéristique tension courant des ponts convertisseurs

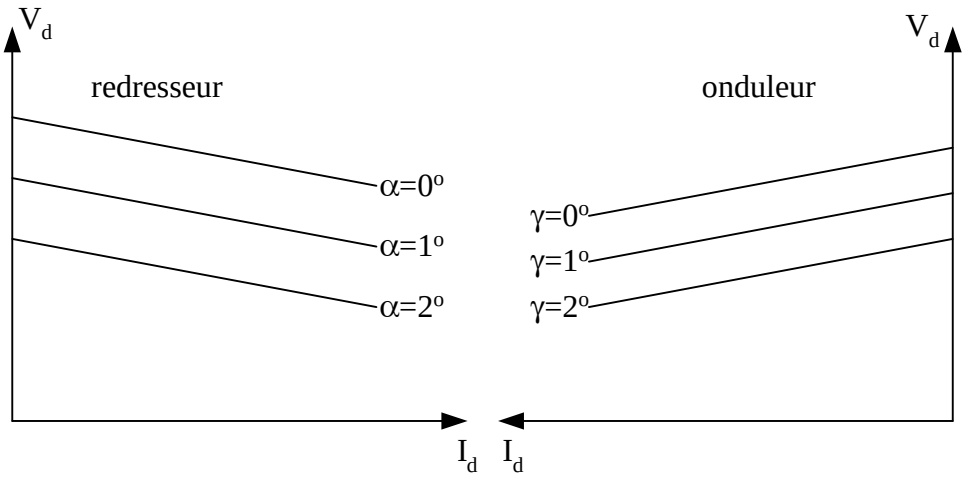


Figure 1.24 Effet des angles d'allumage sur les caractéristiques tension courant

Idéalement on veut:

- Minimiser les variations de la tension et du courant du lien cc
- Maintenir une tension V_d élevée et réduire le stress des thyristors en utilisant des faibles valeurs des tensions d'allumage.
- Maintenir un facteur de puissance élevé pour maximiser l'utilisation de la puissance nominale des transformateurs en puissance active et minimiser la puissance réactive.

2 Référence

[1] Kundur P. ,"Power system stability and control", McGraw-Hill, New York 1994, ISBN007035958X.

[2] Bergen, A. R. and V. Vittal (2000). "Power systems analysis". Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall.

[3] Wildi T., "Électrotechnique", Presses de l'Université Laval, 2000. ISBN 2-7637-7593-4.