
Electronique de puissance

Chapitre 2 *COMMUTATIONS SUR CHARGE INDUCTIVE*



T A B L E D E S M A T I E R E S

PAGE

2.	COMMUTATIONS SUR CHARGE INDUCTIVE	1
2.1	GÉNÉRALITÉS	1
2.2	RÉPONSE INDICIELLE.....	1
2.3	CIRCUIT DE COMMUTATION DE TENSION	2
2.3.1	<i>Montage</i>	2
2.3.2	<i>Évolution du courant dans la charge</i>	3
2.4	RÉGIME PERMANENT.....	8
2.4.1	<i>Calcul des grandeurs électriques caractéristiques</i>	8
2.4.2	<i>Synthèse des résultats</i>	9
2.4.3	<i>Approximation du 1^{er} ordre</i>	10
2.5	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	11
2.5.1	<i>Régime permanent</i>	11
2.5.2	<i>Régime dynamique (saut indiciel)</i>	12

2. COMMUTATIONS SUR CHARGE INDUCTIVE

2.1 GÉNÉRALITÉS

Dans ce chapitre, nous allons décrire de manière détaillée le comportement du courant traversant une charge inductive soumise à un train d'impulsions de tension de fréquence et de rapport cyclique fixe. Une démonstration mathématique aussi complète que possible va permettre de démontrer que dans certaines conditions, le système à étudier peut être remplacé par un modèle continu dans lequel les grandeurs électriques sont des valeurs moyennes. Il est alors possible de calculer de manière très simple les grandeurs moyennes ainsi que leur ondulation. Cette modélisation permet aussi bien de travailler en régime permanent qu'en régime transitoire.

2.2 RÉPONSE INDICIELLE

La réponse en courant d'une charge constituée d'une inductance et d'une résistance en série (Figure 2-1) soumise à un saut indiciel de tension fait appel aux équations différentielles du premier ordre à coefficients constants.

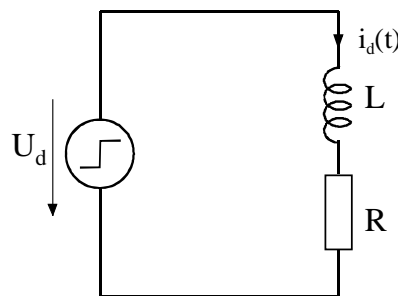


Figure 2-1 : Charge inductive

L'équation différentielle décrivant le comportement électrique du circuit de la Figure 2-1 est définie par la relation suivante

$$U_d = R \cdot i_d(t) + L \cdot \frac{di_d(t)}{dt} \quad 2.1$$

La solution d'une telle équation différentielle a été traitée sous forme générale et par un exemple en annexe du chapitre 1 (*Description des éléments de commutation et des phénomènes qui en découlent*)

$$i_d(t) = \frac{U_d}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + i_d(0) \cdot e^{-t/\tau} \quad 2.2$$

où τ représente la constante de temps électrique de la charge inductive

$$\tau = \frac{L}{R} \quad 2.3$$

2.3 CIRCUIT DE COMMUTATION DE TENSION

Dans cette section, nous allons étudier en détail l'évolution du courant dans une charge inductive soumise à un train d'impulsions carrées de tension de rapport cyclique fixe donné

2.3.1 Montage

Le montage le plus simple pour étudier les caractéristiques de la commutation est représenté à la Figure 2-2. L'interrupteur commandé S est fermé puis ouvert de manière cyclique. Un cycle dure un temps T_p appelé **Période de pulsation**.

Sur une période de pulsation, l'interrupteur est fermé pendant un temps t_e appelé **Temps d'enclenchement**, puis ouvert pour le restant de la période. Le temps d'ouverture t_d est appelé **Temps de déclenchement**.

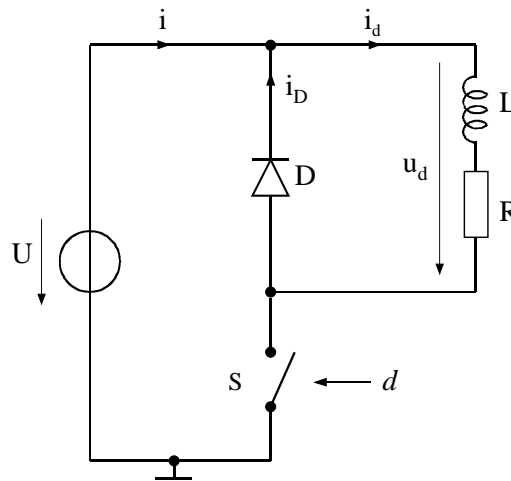


Figure 2-2 : Circuit de commutation sur charge inductive

Ce circuit peut être décomposé en deux topologies distinctes, ceci en fonction de l'état de l'interrupteur commandé. La Figure 2-2 correspond à l'état fermé de l'interrupteur

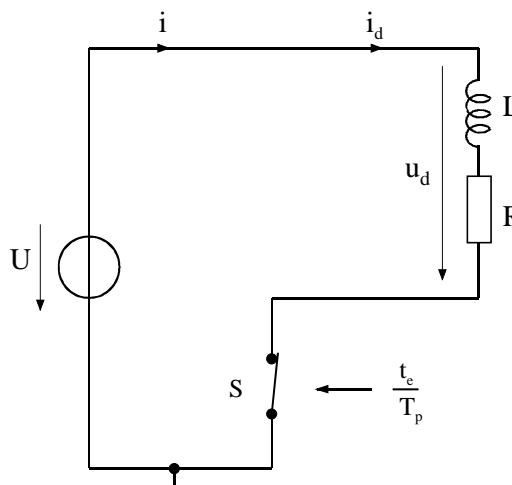


Figure 2-3 : Circuit équivalent lors de la fermeture de l'interrupteur commandé

La Figure 2-2 correspond à l'état ouvert de l'interrupteur.

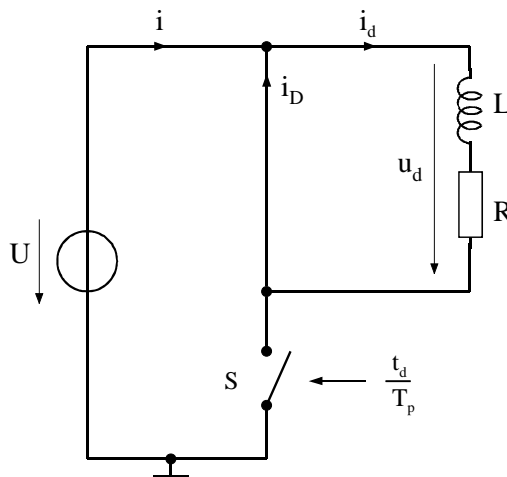


Figure 2-4 : Circuit équivalent lors de l'ouverture de l'interrupteur commandé

Dans la Figure 2-4, on voit la nécessité de la présence d'une diode dite de roue libre (freewheeling diode). C'est en effet grâce à cette dernière que le courant circulant dans l'inductance (source de courant) peut se refermer.

2.3.2 Évolution du courant dans la charge

Dans ce paragraphe nous allons analyser l'évolution du courant dans la charge lorsque l'interrupteur commandé est contrôlé à la fréquence de pulsation F_p , avec un temps d'enclenchement t_e .

La Figure 2-5 montre la forme de la tension apparaissant aux bornes de la charge.

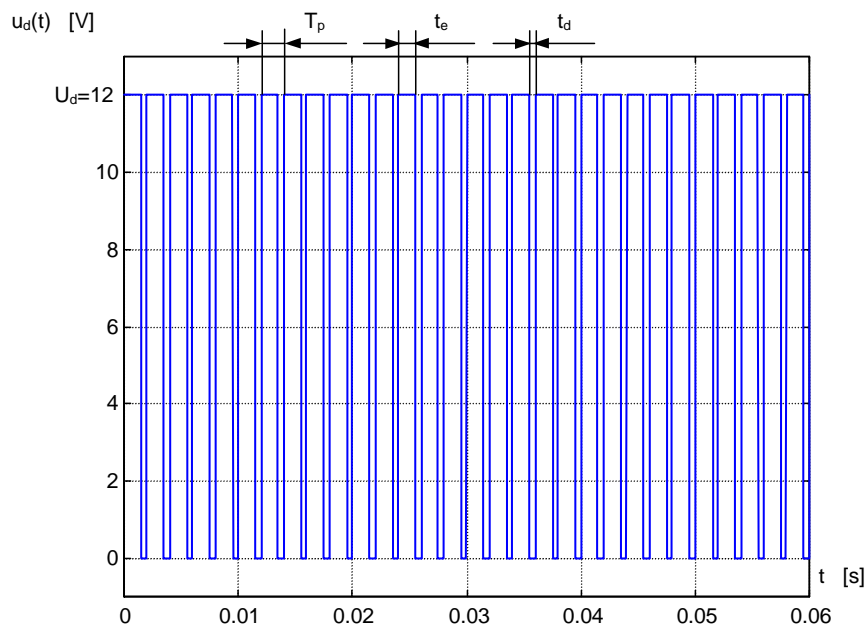


Figure 2-5 : Tension aux bornes de la charge

A l'aide de la relation 2.2, on se propose de décomposer l'évolution du courant selon une séquence définie par l'état de l'interrupteur commandé. Le but final étant d'obtenir, sous certaines conditions des relations simplifiées utilisables par la suite. Grâce à ces relations, il sera possible de définir un modèle pseudo continu et par conséquent une fonction de transfert dans l'espace de Laplace utilisable lors de la modélisation en vue d'un asservissement quelconque.

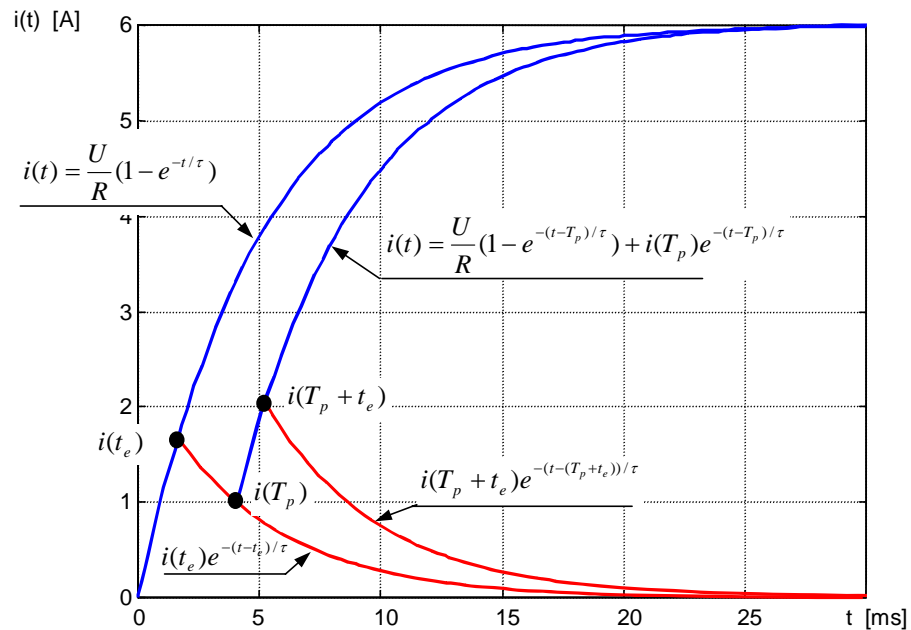


Figure 2-6 : Courant dans la charge

Première période de commutation $0 \leq t < T_p$	
Fermeture du commutateur : $0 \leq t < t_e$ Valeur initiale : $i(0) = 0$	Ouverture du commutateur : $t_e \leq t < T_p$ Valeur initiale : $i(t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau})$
Valeur finale : $i(t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau})$	Valeur finale : $i(T_p) = i(t_e) \cdot e^{-t_d/\tau} = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot e^{-t_d/\tau}$
Deuxième période de commutation $T_p \leq t < 2T_p$	
Fermeture du commutateur : $T_p \leq t < T_p + t_e$ Valeur initiale : $i(T_p) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot e^{-t_d/\tau}$	Ouverture du commutateur : $T_p + t_e \leq t < 2T_p$ Valeur initiale : $i(T_p + t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau})$
Valeur finale : $i(T_p + t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) + i(T_p) \cdot e^{-t_e/\tau}$ $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) + \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot e^{-t_d/\tau} \cdot e^{-t_e/\tau}$ $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau})$	Valeur finale : $i(2T_p) = i(T_p + t_e) \cdot e^{-t_d/\tau}$ $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau}) \cdot e^{-t_d/\tau}$

Troisième période de commutation $2T_p \leq t < 3T_p$	
<p>Fermeture du commutateur : $2T_p \leq t < 2T_p + t_e$</p> <p>Valeur initiale : $i(2T_p) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau}) \cdot e^{-t_d/\tau}$</p>	<p>Ouverture du commutateur : $2T_p + t_e \leq t < 3T_p$</p> <p>Valeur initiale : $i(2T_p + t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau} + e^{-2T_p/\tau})$</p>
<p>Valeur finale : $i(2T_p + t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) + i(2T_p) \cdot e^{-t_e/\tau}$</p> $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) + \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau}) \cdot e^{-t_d/\tau} \cdot e^{-t_e/\tau}$ $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau} + e^{-2T_p/\tau})$	<p>Valeur finale : $i(3T_p) = i(2T_p + t_e) \cdot e^{-t_d/\tau}$</p> $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot (1 + e^{-T_p/\tau} + e^{-2T_p/\tau}) \cdot e^{-t_d/\tau}$
N ^{ème} période de commutation $(N-1)T_p \leq t < NT_p$	
<p>Fermeture du commutateur : $(N-1)T_p \leq t < (N-1)T_p + t_e$</p> <p>Valeur initiale : $i((N-1)T_p) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \sum_{n=0}^{N-2} e^{-nT_p/\tau} \cdot e^{-t_d/\tau}$</p> $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-(N-1)T_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot e^{-t_d/\tau}$	<p>Ouverture du commutateur : $(N-1)T_p + t_e \leq t < NT_p$</p> <p>Valeur initiale : $i((N-1)T_p + t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}}$</p>
<p>Valeur finale : $i((N-1)T_p + t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) + i((N-1)T_p) \cdot e^{-t_e/\tau}$</p> $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{-nT_p/\tau}$ $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}}$	<p>Valeur finale : $i(NT_p) = i((N-1)T_p + t_e) \cdot e^{-t_d/\tau}$</p> $= \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot e^{-t_d/\tau}$

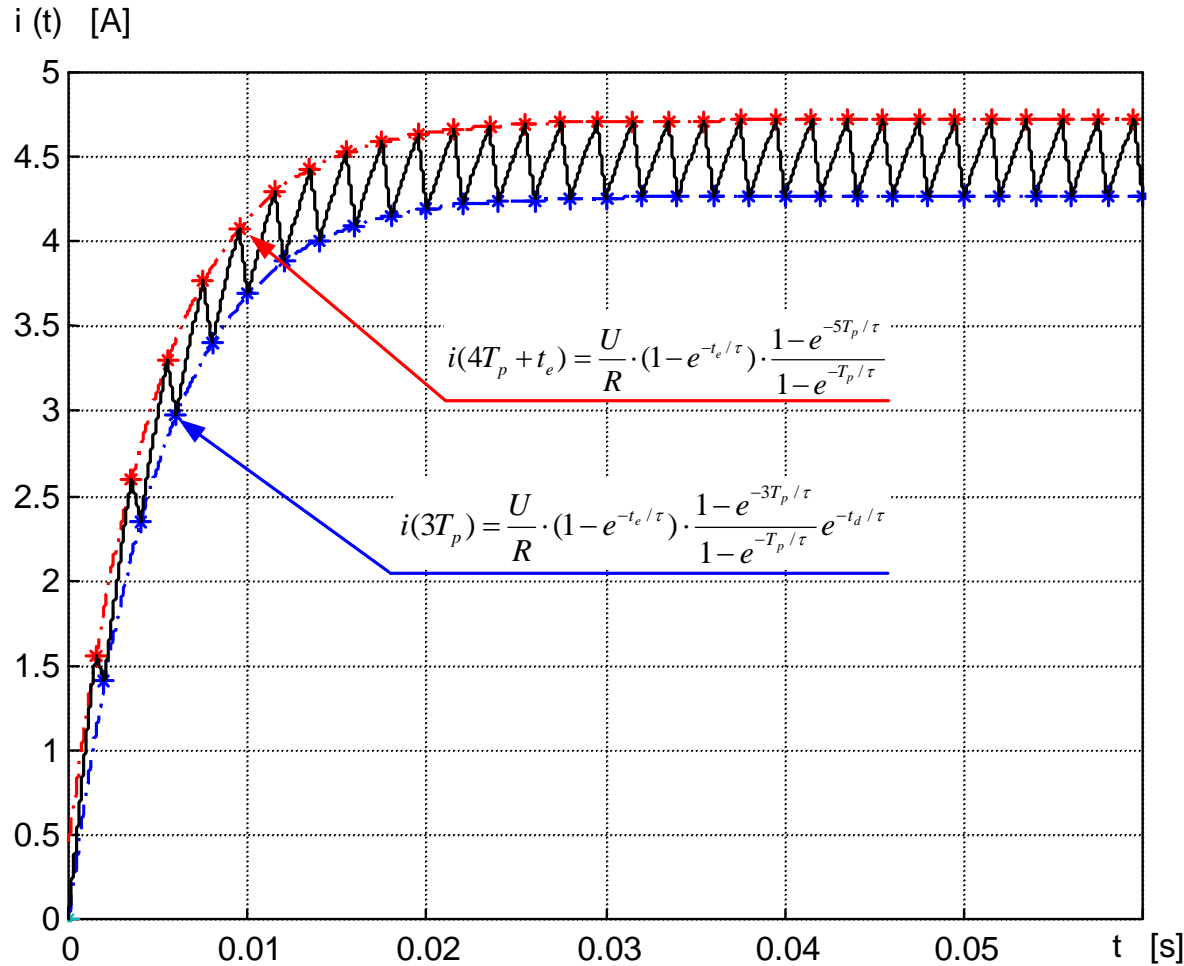


Figure 2-7 : Evolution du courant dans la charge

Exemple :

Caractéristique de l'alimentation

- Tension : $U = 12V$
- Période de pulsation : $T_p = 2ms$
- Rapport cyclique : $D = 75\%$

Caractéristique de la charge

- Inductance : $L = 10mH$
- Résistance : $R = 2\Omega$

En résumé :

$$i(NT_p) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot e^{-t_d/\tau}$$

$$i(NT_p + t_e) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-(N+1)T_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}}$$

2.4 RÉGIME PERMANENT

2.4.1 Calcul des grandeurs électriques caractéristiques

A partir des relations générales donnant le courant aux instants $NT_p + t_e$, il est possible de définir le courant maximum circulant dans la charge lorsque l'on se trouve en régime permanent. Le régime permanent apparaît lorsque la valeur moyenne glissante du courant sur une période de pulsation est constante.

$$\begin{aligned} I_{MAX} &= \lim_{N \rightarrow \infty} i((N-1)T_p + t_e) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} \right] \\ &= \frac{U}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-t_e/\tau})}{1 - e^{-T_p/\tau}} \end{aligned} \quad 2.4$$

A partir des relations générales donnant le courant aux instants NT_p , il est possible de définir le courant minimum circulant dans la charge lorsque l'on se trouve en régime permanent.

$$\begin{aligned} I_{MIN} &= \lim_{N \rightarrow \infty} i(NT_p) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot e^{-t_d/\tau} \right] \\ &= \frac{U}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-t_e/\tau})}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot e^{-t_d/\tau} \end{aligned} \quad 2.5$$

La moyenne glissante sur une période de pulsation du courant circulant dans la charge correspond au courant moyen. Cette moyenne glissante est définie par la relation suivante :

$$\begin{aligned} I(NT_p) &= \frac{1}{T_p} \int_{NT_p}^{(N+1)T_p} i(t) \cdot dt = \frac{1}{T_p} \left(\int_{NT_p}^{NT_p+t_e} i(t) \cdot dt + \int_{NT_p+t_e}^{(N+1)T_p} i(t) \cdot dt \right) \\ &= \frac{1}{T_p} \left(\int_{NT_p}^{NT_p+t_e} \left(\frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + I_{MIN} \cdot e^{-t_e/\tau} \right) \cdot dt + \int_{NT_p+t_e}^{(N+1)T_p} I_{MAX} \cdot e^{-t/\tau} \cdot dt \right) \end{aligned} \quad 2.6$$

En décomposant l'intégrale de la 2.6 en trois parties, on obtient pour chacune d'elle

$$\begin{aligned} \int_{NT_p}^{NT_p+t_e} \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \cdot dt &= \frac{U}{R} \left(t + \tau \cdot e^{-t/\tau} \right) \Big|_{NT_p}^{NT_p+t_e} \\ &= \frac{U}{R} \cdot \left(t_e - \tau \cdot e^{-NT_p/\tau} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \right) \end{aligned} \quad 2.7$$

$$\begin{aligned} \int_{NT_p}^{NT_p+t_e} I_{MIN} \cdot e^{-t/\tau} \cdot dt &= -I_{MIN} \cdot \tau \cdot e^{-t/\tau} \Big|_{NT_p}^{NT_p+t_e} = I_{MIN} \cdot \tau \cdot e^{-NT_p/\tau} (1 - e^{-t_e/\tau}) \\ &= \frac{U}{R} \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} (1 - e^{-t_e/\tau})^2 \cdot e^{-t_d/\tau} \tau \cdot e^{-NT_p/\tau} \end{aligned} \quad 2.8$$

$$\begin{aligned}
 \int_{NT_p+t_e}^{(N+1)T_p} I_{MAX} \cdot e^{-t/\tau} \cdot dt &= -I_{MAX} \cdot \tau \cdot e^{-t/\tau} \Big|_{NT_p+t_e}^{(N+1)T_p} = -I_{MAX} \cdot \tau \cdot e^{-(N+1)T_p/\tau} (1 - e^{t_d/\tau}) \\
 &= -\frac{U}{R} \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \tau \cdot e^{-(N+1)T_p/\tau} (1 - e^{t_d/\tau})
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Finalement le courant moyen sur une période de pulsation est donnée par la relation suivante

$$\begin{aligned}
 I(NT_p) &= \frac{1}{T_p} \int_{NT_p}^{(N+1)T_p} i(t) \cdot dt \\
 &= \frac{1}{T_p} \cdot \frac{U}{R} \left(t_e - \tau \cdot e^{-NT_p/\tau} \cdot (1 - e^{-t_e/\tau}) \right) \\
 &\quad + \frac{1}{T_p} \cdot \frac{U}{R} \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} (1 - e^{-t_e/\tau})^2 \cdot e^{-t_d/\tau} \tau \cdot e^{-NT_p/\tau} \\
 &\quad - \frac{1}{T_p} \cdot \frac{U}{R} \cdot \frac{1 - e^{-NT_p/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} (1 - e^{-t_e/\tau}) \cdot \tau \cdot e^{-(N+1)T_p/\tau} (1 - e^{t_d/\tau})
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

En régime permanent ($N \rightarrow \infty$), on peut écrire pour le courant moyen

$$I = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{T_p} \int_{NT_p}^{(N+1)T_p} i(t) \cdot dt = \frac{t_e}{T_p} \cdot \frac{U}{R} \tag{2.11}$$

De la Figure 2-5, on peut calculer la moyenne glissante de la tension aux bornes de la charge.

$$U_{di} = \frac{1}{T_p} \int_{t_0}^{t_0+T_p} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T_p} \int_{NT_p}^{NT_p+t_e} U \cdot dt + \int_{NT_p+t_e}^{(N+1)T_p} 0 \cdot dt = U \cdot \frac{t_e}{T_p} \tag{2.12}$$

2.4.2 Synthèse des résultats

– Courant maximum :

$$I_{MAX} = \frac{U}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-t_e/\tau})}{1 - e^{-T_p/\tau}} \tag{2.13}$$

– Courant minimum :

$$I_{MIN} = \frac{U}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-t_e/\tau})}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot e^{-t_d/\tau} \tag{2.14}$$

– Tension moyenne idéale :

$$U_{di} = \frac{1}{T_p} \int_{t_0}^{t_0+T_p} u_d(t) \cdot dt = U \cdot \frac{t_e}{T_p} \tag{2.15}$$

- Courant moyen :

$$I = \frac{1}{T_p} \int_{t_0}^{t_0+T_p} i(t) \cdot dt = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} = \frac{U_{di}}{R} \quad 2.16$$

- Ondulation de courant :

$$\Delta I = I_{MAX} - I_{MIN} = \frac{U}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-t_e/\tau})}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot (1 - e^{-t_d/\tau}) \quad 2.17$$

Des relations 2.15 et 2.16 on en déduit de manière mathématique formelle que la tension moyenne se trouve aux bornes de la résistance de charge. Cette tension moyenne et la résistance de charge définissent à elles seules le courant moyen.

En d'autres termes :

en régime permanent, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle.

2.4.3 Approximation du 1^{er} ordre

Sous certaines conditions, il est possible de simplifier les relations 2.13 à 2.17. En effet en général, on choisit une période de pulsation d'un ordre de grandeur au moins à la constante de temps électrique de la charge inductive : $T_p \ll \tau = \frac{L}{R}$

2.4.3.1 Développement de e^x en série de Taylor

La série de Taylor de la fonction e^x est donnée par la relation suivante ;

$$e^x \cong 1 + x + \underbrace{\frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots}_{=0} \quad 2.18$$

Dans notre cas, nous en déduisons

$$e^{-t_e/\tau} \cong 1 - \frac{t_e}{\tau} \quad 2.19$$

2.4.3.2 Régime permanent

$$I_{MAX} = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} \quad 2.20$$

$$I_{MIN} = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} \cdot \left(1 - \frac{t_d}{\tau}\right) \quad 2.21$$

$$I = \frac{1}{T_p} \int_{t_0}^{t_0+T_p} i(t) \cdot dt = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} \quad 2.22$$

$$\Delta I = I_{MAX} - I_{MIN} = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e \cdot t_d}{T_p} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{U}{L} \cdot \frac{t_e \cdot (T_p - t_e)}{T_p} = \frac{U \cdot T_p}{L} \cdot \frac{t_e}{T_p} \cdot \left(1 - \frac{t_e}{T_p}\right) \quad 2.23$$

Rectification des valeurs I_{MAX} et I_{MIN}

$$I_{MAX} = I + \frac{1}{2} \Delta I = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \frac{t_e}{T_p} \cdot (T_p - t_e) = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} \left(1 + \frac{(T_p - t_e)}{2\tau}\right) \quad 2.24$$

$$I_{MIN} = I - \frac{1}{2} \Delta I = \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} \left(1 - \frac{(T_p - t_e)}{2\tau}\right) \quad 2.25$$

2.4.3.3 En régime dynamique (saut indiciel)

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{i_{MAX}(t) + i_{MIN}(t)}{2} = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \cdot \frac{1 - e^{-t_d/\tau}}{1 - e^{-T_p/\tau}} \cdot \frac{(1 + e^{-t_d/\tau})}{2} \\ &\cong \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} \cdot \underbrace{\frac{2 - t_d}{\tau}}_{t_d \ll \tau \rightarrow \frac{t_d}{\tau} \ll 2} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \\ &\cong \frac{U}{R} \cdot \frac{t_e}{T_p} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) = I \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \end{aligned} \quad 2.26$$

2.5 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Si les valeurs moyennes du courant et de la tension ne sont pas modifiées par les approximations du 1^{er} ordre, il n'en est pas de même pour l'ondulation de courant et les valeurs extrêmes de ce dernier.

2.5.1 Régime permanent

En régime permanent, toutes les grandeurs sont exprimées en fonction du rapport cyclique dont la définition est donnée par :

$$D = \frac{t_e}{T_p} \quad 2.27$$

– Tension moyenne idéale aux bornes de la charge :

$$U_{di} = \frac{1}{T_p} \int_{t_0}^{t_0+T_p} u_d(t) \cdot dt = U \cdot D \quad 2.28$$

– Courant moyen dans la charge :

$$I_{di} = \frac{1}{T_p} \int_{t_0}^{t_0+T_p} i(t) \cdot dt = \frac{U \cdot D}{R} = \frac{U_{di}}{R} \quad 2.29$$

- Ondulation de courant :

$$\Delta I = I_{MAX} - I_{MIN} = \frac{U \cdot T_p}{L} \cdot D \cdot (1 - D) \quad 2.30$$

- Courant maximum (valeur supérieure de l'ondulation) :

$$I_{MAX} = \frac{U}{R} \cdot D \cdot \left(1 + \frac{T_p}{2\tau} (1 - D) \right) \quad 2.31$$

- Courant minimum (valeur minimale de l'ondulation) :

$$I_{MIN} = \frac{U}{R} \cdot D \cdot \left(1 - \frac{T_p}{2\tau} (1 - D) \right) \quad 2.32$$

2.5.2 Régime dynamique (saut indiciel)

Le saut indiciel est identique au cas où la tension serait abaissée à la valeur moyenne selon la relation 2.28

$$i(t) = \frac{U \cdot D}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) = \frac{U_{di}}{R} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) = I \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad 2.33$$

Dans ce cas on parle de courant pseudo-continu.

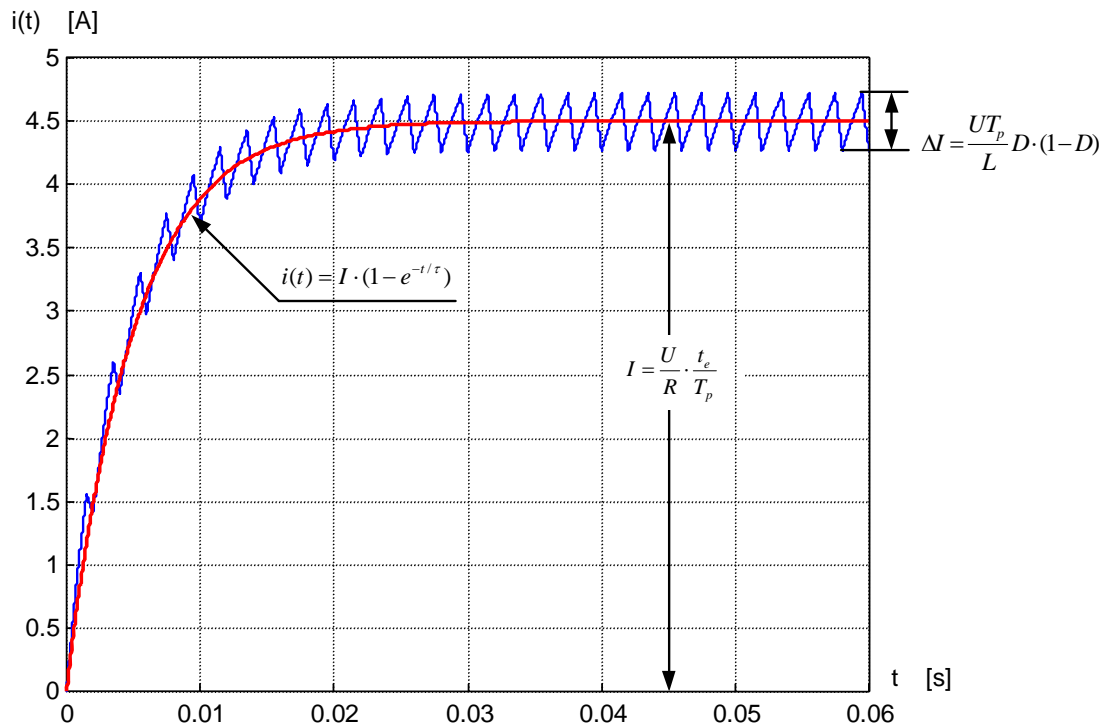


Figure 2-8 : Evolution du courant réel et du courant pseudo-continu dans la charge