TABLE DES MATIERES

Bibliographie : alimentions à découpage / convertisseurs à résonance
Auteurs : JP Ferrieux / F Forest Edition Masson Collection technologies

1) DEFINITION

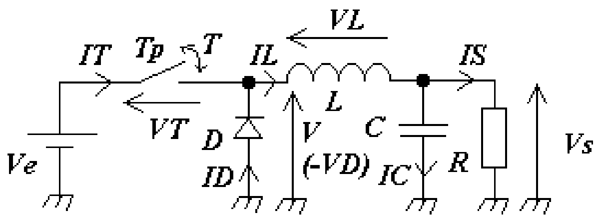
Dans un alimentation traditionnelle, le transistor ballast fonctionne en linéaire. Il dissipe de la puissance $\lfloor\ (V_E - V_S.) \times I_S\ \rfloor$.IL faut alors le refroidir. Les alimentations sont encombrantes, lourdes et chères.
Dans une alimentation à découpage, on utilise un hacheur. Le transistor hacheur fonctionne en commutation. Les problèmes d'échauffement sont beaucoup moins importants. On peut alors faire de petites alimentations délivrant une forte puissance.
L'élément de commutation est soumis à des contraintes. Pour les chiffrer, on utilise le facteur de dimensionnement F_d qui est le rapport entre la puissance apparente commutée par l'interrupteur (produit des contraintes maximales supportées par celui-ci) et la puissance de l'alimentation. Cela permet de discuter du bon choix du commutateur.

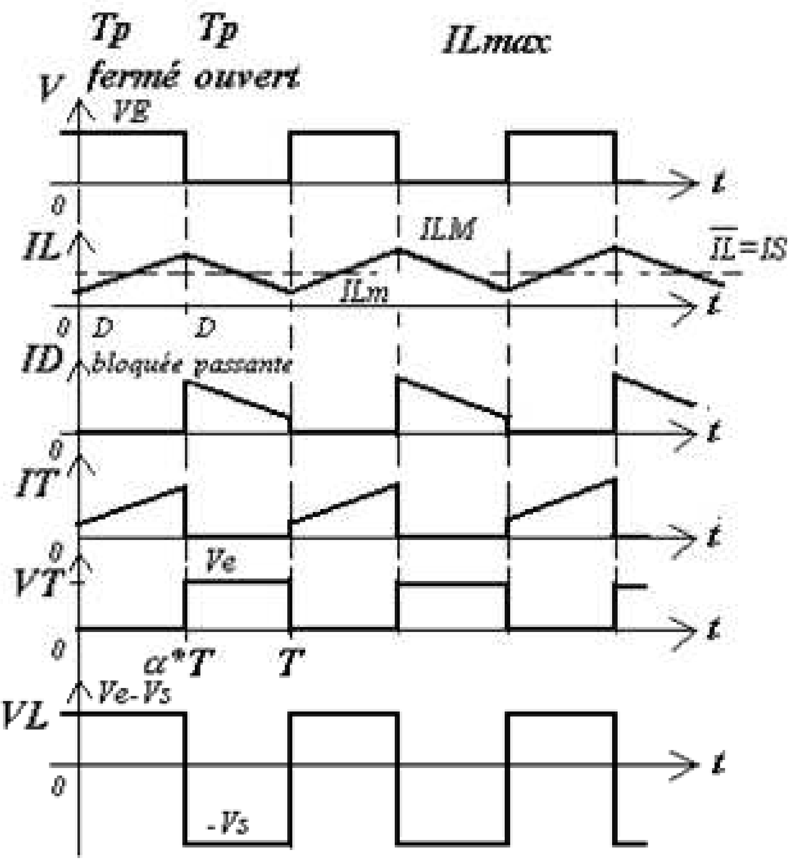
$$\boxed{Fd = \frac{V_{K\max} \times I_{K\max}}{P}}$$

2) DIFFERENTS TYPES DE HACHEUR

2.1) HACHEUR SERIE (TYPE BUCK OU STEP DOWN OU ABAISSEUR DE TENSION)

2.1.1) Présentation





L'interrupteur *Tp* se ferme et s'ouvre à une période *T*.
Il est fermé du temps *0* au temps $\alpha \times T$: la diode est bloquée, la source primaire fournit de l'énergie à l'inductance *L* et à la résistance *R*.
Il est ouvert du temps $\alpha \times T$ au temps T : la diode est passante et assure la continuité du courant et la décharge de *L*.
Les formes de courant et tension en conduction continue sont les suivantes.

$$\overline{VL} = \frac{1}{T} \times \int_0^T vL(t)dt = \frac{L}{T} \times \left[iL(t)\right]_0^T$$

En moyenne : $\overline{VL} = IL(T) - IL(0) = 0$.
D'après le graphe de vL
$(Ve - Vs) \times \alpha \times T - Vs \times (1-\alpha) \times T = 0$
d'où $\boxed{Vs \approx \alpha \times Ve}$

$\boxed{0 \le \alpha \le 1 \Rightarrow Vs \le Ve}$

Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$ inter fermé

Diode bloquée. On suppose Vs constante (ondulation négligée)

$Ve(t) = vL(t) + Vs(t)$

$$vL(t) = L \times \frac{diL(t)}{dt} = Ve - Vs$$

Donc $\boxed{iL(t) = \frac{1}{L} \times (Ve - Vs) \times t + iLm}$ **(1)**

A $t = 0$, $iL(0) = iLm$

A $t = \alpha \times T$,

$$iL(\alpha \times T) = iLM = \frac{1}{L} \times (Ve - Vs) \times \alpha \times T + iLm$$

$\boxed{\Delta IL = iLM - iLm = \frac{1}{L} \times (Ve - Vs) \times \alpha \times T}$ **(1a)**

or $Vs = \alpha \times Ve$

donc $\boxed{\Delta IL = \frac{\alpha \times (1-\alpha)}{L \times f} \times Ve}$ **(2)**

$$\frac{d\Delta IL}{d\alpha} = \frac{Ve}{L \times f} \times (1 - 2 \times \alpha) = 0 \Rightarrow \alpha = 0,5$$

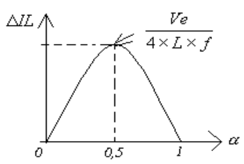
Quand $\alpha = 0,5$, $\boxed{\Delta IL = \Delta IL \max = \frac{Ve}{4 \times L \times f}}$ **(3)**

<u>Remarque</u>

D'après **(1a)** et $\alpha = \frac{Vs}{Ve}$

$$\Delta IL = \frac{Ve - Vs}{L \times f} \times \frac{Vs}{Ve}$$

Si $\Delta IL = k \times Is$, alors



$\boxed{L = \frac{Ve - Vs}{k \times Is \times f} \times \frac{Vs}{Ve}}$ **(3a)**

Lorsque $\alpha \times T \le t \le T$ inter ouvert

Diode passante

On suppose Vs constante (ondulation négligée)

$vL(t) + Vs(t) = 0$

$$Vs = -L \times \frac{diL(t)}{dt}$$

$$iL(t) = -\frac{1}{L} \times Vs \times t + K$$

A $t = \alpha \times T$, $iL(\alpha \times T) = iLM$

Donc $K = \frac{1}{L} \times Vs \times \alpha \times T + iLM$

$\boxed{\Rightarrow iL(t) = -\frac{1}{L} \times Vs \times (t - \alpha \times T) + iLM}$ **(4)**

A $t = T$,

$$iL(T) = iLm = -\frac{1}{L} \times Vs \times T \times (1-\alpha) + iLM$$

$\boxed{\Delta IL = iLM - iLm = \frac{1-\alpha}{L \times f} \times Vs}$ **(5)**

De (2) et (5) $\boxed{Vs = \alpha \times Ve}$ **(6)**

<u>2.1.2) Calcul de L</u>

D'après **(2)** $L = \frac{\alpha \times (1-\alpha) \times Ve}{\Delta IL \times f}$ La limite du discontinu impose $\Delta IL_{MAX} = 2 \times \overline{IL} = 2 \times Is$

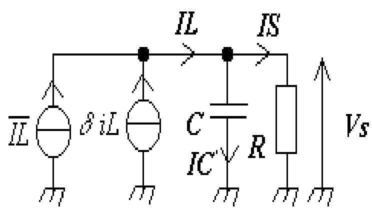
Donc $\boxed{L_{MIN} = \frac{\alpha \times (1-\alpha) \times Ve}{2 \times Is \times f} = \frac{Ve - Vs}{2 \times Is \times f} \times \frac{Vs}{Ve}}$ **(7)** sinon discontinu

<u>2.1.3) Calcul de C</u>

En réalité, *vs(t)* ondule

$vs(t) = \overline{Vs} + \delta vs$

Cette ondulation est liée à l'ondulation de *iL(t)*



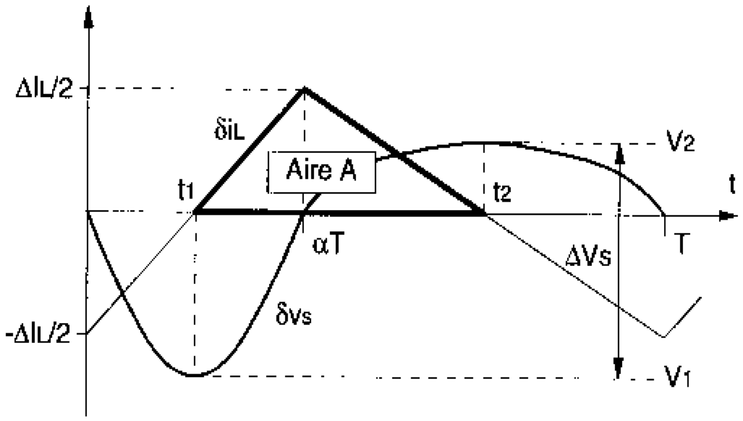
$$iL(t) = iC(t) + is(t) \Rightarrow \overline{IL} + \delta \ iL = ic(t) + Is$$

or $Is = \overline{IL}$ donc $ic(t) = \delta iL = C \times \frac{d(\delta vs)}{dt}$

$$\delta vs = \frac{1}{C} \times \int \delta iL \ dt$$

δvs est déphasée de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à δiL

appelée $\delta\ iL$.



$$\Delta Vs = V2 - V1 = \frac{1}{C} \times \int_{t1}^{t2} \delta iL(t)\ dt$$

donc $\Delta Vs = \frac{1}{C} \times A$

$$A = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta IL}{2} \times (t2 - t1)$$

$$A = \frac{\Delta IL}{4} \times (\underbrace{\alpha \times T + (\frac{T - \alpha \times T}{2})}_{t2} - \underbrace{\frac{\alpha \times T}{2}}_{t1})$$

$$A = \frac{\Delta IL \times T}{8}$$

donc $\boxed{\Delta Vs = \frac{\Delta IL}{8 \times C \times f}}$ **(7a)**

D'après **(2)** et **(7a),** $\Delta IL = \frac{\alpha \times (1 - \alpha)}{L \times f} \times Ve$ donc $\boxed{\Delta Vs = \frac{\alpha \times (1 - \alpha)}{8 \times L \times C \times f^2} \times Ve}$ **(8)**

D'après **(8)** et $\alpha = \frac{Vs}{Ve}$ $\boxed{\Delta Vs = \frac{(Vs - Ve)}{8 \times L \times C \times f^2} \times \frac{Vs}{Ve}}$ **(8a)**

ΔVs est maximale quand $\alpha = 0{,}5$ d'où $\Delta Vs\max = \frac{Ve}{32 \times L \times C \times f^2}$

$\boxed{C = \frac{Ve}{32 \times L \times f^2 \times \Delta Vs\max}}$ **(9) (**pour $\alpha = 0{,}5$)

<u>Remarque</u> : d'après les chronogrammes, $\overline{IT} = \alpha \times \overline{IL}$

$$Pe = Ps \Rightarrow Ve \times \overline{IT} = Vs \times Is \Rightarrow Is = \frac{Ve}{Vs} \times \overline{IT} = \frac{1}{\alpha} \times \alpha \times \overline{IL}$$

donc $\boxed{Is = \overline{IL}}$ **(9a)**

2.1.4) Contraintes

* <u>Interrupteur</u> : $VT\max = Ve$ $IT\max = ILM = Is + \frac{\Delta IL}{2}$

* <u>Diode</u> : $V\max = Ve$ $ID\max = ILM = Is + \frac{\Delta IL}{2}$ $\overline{ID} = (1 - \alpha) \times Is$

* <u>Facteur de dimensionnement de l'interrupteur</u> :

on néglige l'ondulation de courant ΔIL $Fd = \frac{VT\max \times IT\max}{Ps} = \frac{Ve \times Is}{Vs \times Is}$ donc $Fd = \frac{1}{\alpha}$

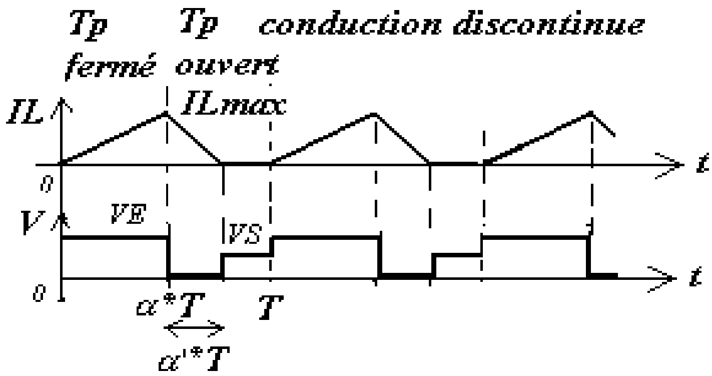
* <u>Facteur de dimensionnement de la diode</u> :

on néglige l'ondulation de courant ΔIL

$$Fd = \frac{V\max \times ID\max}{Ps} = \frac{Ve \times \overline{ID}}{Vs \times Is} = \frac{Ve \times (1 - \alpha) \times Is}{\alpha \times Ve \times Is}$$ donc $Fd = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$

2.1.5) Fonctionnement en discontinu

Dans ce cas, le courant *IL* s'annule durant la période *T*. Cela se produit quand le courant moyen absorbé par la charge est inférieur à $\frac{\Delta IL}{2}$.



$\alpha' \times T$ est le temps de décroissance de iL(t)

* Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$

$iL(t) = \frac{1}{L} \times (Ve - Vs) \times t$ $\boxed{iL(\alpha \times T) = iLM = \frac{Ve - Vs}{L} \times \alpha \times T}$ ***(9b)***

* Lorsque $\alpha \times T \le t \le T$ (origine en $\alpha \times T$)

$\Rightarrow iL(t) = -\frac{1}{L} \times Vs \times t + iLM$ $iL(\alpha' \times T) = 0 \Rightarrow iLM = \frac{Vs \times \alpha' \times T}{L}$

donc $\frac{Ve - Vs}{L} \times \alpha \times T = \frac{Vs \times \alpha' \times T}{L} \Rightarrow \frac{Vs}{Ve} = \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}$ $\boxed{\Rightarrow \alpha' = \alpha \times \frac{Ve - Vs}{Vs}}$ ***(9c)***

D'autre part, $Is = \overline{IL}$ donc $Is = \frac{1}{T} \times (\frac{1}{2} \times ILM \times \alpha \times T + \frac{1}{2} \times ILM \times \alpha' \times T)$

$\boxed{\Rightarrow Is = \frac{1}{2} \times ILM \times (\alpha + \alpha')}$ ***(9d)***

A l'aide de ***(9b), (9c)*** et ***(9d),*** on obtient :

$Is = \frac{Ve - Vs}{2 \times L \times f} \times \alpha \times (\alpha + \alpha \times \frac{Ve - Vs}{Vs})$ $\boxed{\Rightarrow Is = \frac{\alpha^2}{2 \times L \times f} \times \frac{Ve}{Vs} \times (Ve - Vs)}$ ***(9e)***

d'où $\boxed{Vs = Ve \times \frac{1}{1 + \frac{2 \times L \times f \times Is}{\alpha^2 \times Ve}}}$ ***(9f)***

La limite de fonctionnement continu-discontinu est $\alpha' = 1 - \alpha$

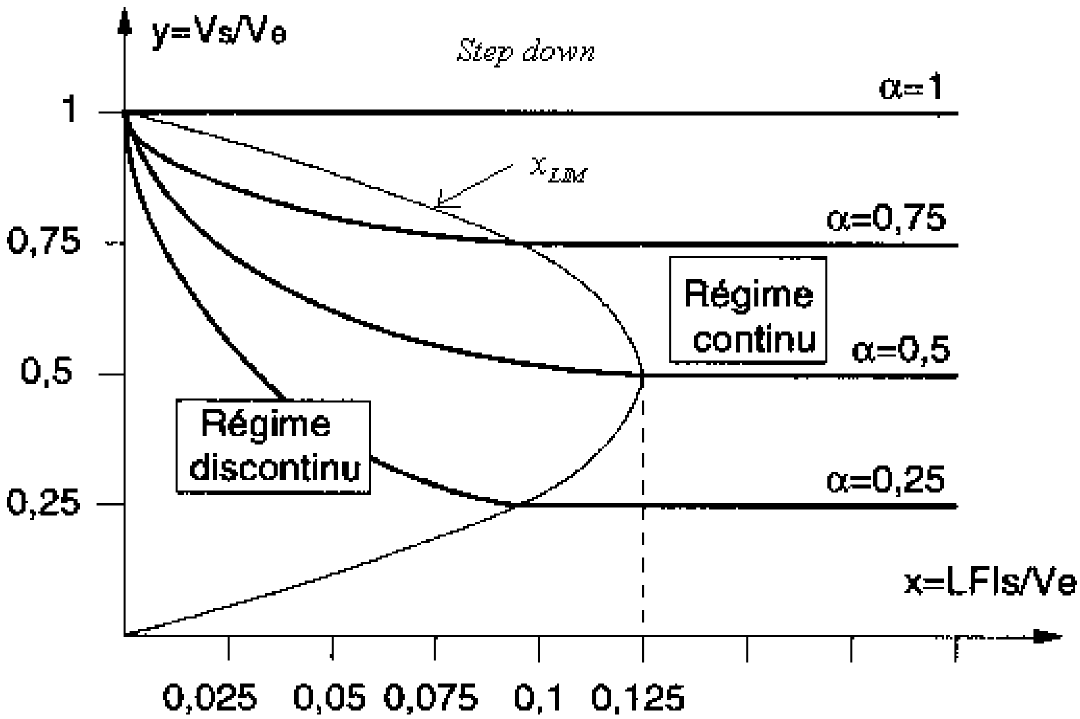
D'après ***(9d),*** cette limite est $\boxed{Is_{LIM} = \frac{ILM}{2} = \frac{\Delta IL}{2}}$ ***(9g)*** avec $Vs = \alpha \times Ve$

D'après ***(9e),*** $Is_{LIM} = \frac{\alpha^2}{2 \times L \times f} \times \frac{Ve}{Vs} \times Vs \times (\frac{1}{\alpha} - 1)$ $\boxed{Is_{LIM} = \frac{\alpha \times (1 - \alpha) \times Ve}{2 \times L \times f}}$ ***(9h)***

En posant que tension normalisée = $y = \frac{Vs}{Ve}$ et courant normalisé = $x = \frac{L \times f \times Is}{Ve}$, on obtient

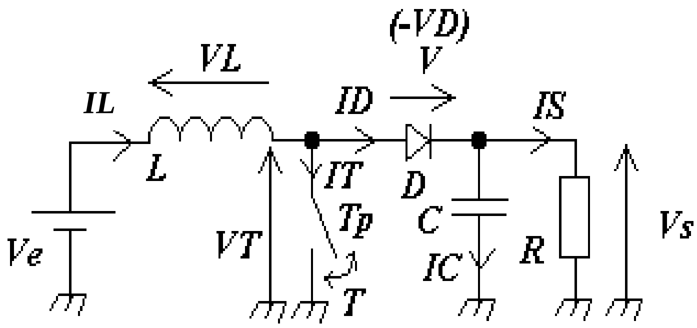
$y = \alpha$ en continu et $y = \dfrac{1}{1+\dfrac{2\times x}{\alpha^2}}$ en discontinu (d'après ***(9f)***)

De plus, $x_{LIM} = \dfrac{L\times f\times Is_{LIM}}{Ve} = \dfrac{\alpha\times(1-\alpha)}{2}$ mais $\alpha = \dfrac{Vs}{Ve} = y$ donc $\boxed{x_{LIM} = \dfrac{y\times(1-y)}{2}}$ ***(9i)***



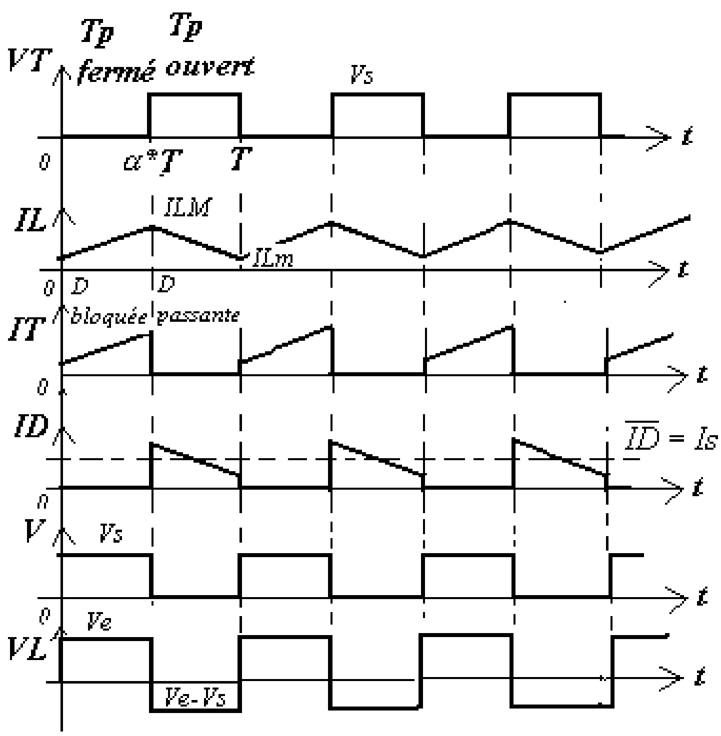
2.2) HACHEUR PARALLELE (TYPE BOOST OU STEP UP OU ELEVATEUR DE TENSION)

2.2.1) Présentation



L'interrupteur *Tp* se ferme et s'ouvre à une période *T*.
Il est fermé du temps *0* au temps $\alpha \times T$: la diode est bloquée, la source primaire fournit de l'énergie à l'inductance *L*

Il est ouvert du temps $\alpha \times T$ au temps T : la diode est passante et assure la décharge de *L* dans *R*.
Cette décharge n'est possible que si Vs>Ve
Les formes de courant et tension en conduction continue sont les suivantes.



En moyenne : $\overline{VL} = 0$.
D'après le graphe de vL
$Ve \times \alpha \times T + (Ve - Vs) \times (1 - \alpha) \times T = 0$

d'où $\boxed{Vs \approx \dfrac{Ve}{1-\alpha}}$

$\boxed{0 \le \alpha \le 1 \Rightarrow Vs \ge Ve}$

Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$ inter fermé
Diode bloquée
On suppose Vs constante
(ondulation négligée)

$$Ve(t) = vL(t) = L \times \frac{diL(t)}{dt}$$

Donc $\boxed{iL(t) = \frac{Ve}{L} \times t + iLm}$ **(10)**

A $t = 0$, $iL(0) = iLm$

A $t = \alpha \times T$,

$$iL(\alpha \times T) = iLM = \frac{Ve}{L} \times \alpha \times T + iLm$$

$$\Delta IL = iLM - iLm = \frac{Ve}{L} \times \alpha \times T$$

donc $\boxed{\Delta IL = \frac{\alpha \times Ve}{L \times f}}$ **(11)**

$$\frac{d\Delta IL}{d\alpha} = \frac{Ve}{L \times f} \neq 0$$

Quand $\alpha = 1$, $\boxed{\Delta IL = \Delta IL\max = \frac{Ve}{L \times f}}$ **(12)**

Avec **(15)** et **(11)** $\boxed{\Delta IL = \frac{(Vs - Ve) \times Ve}{L \times f \times Vs}}$ **(12a)**

Lorsque $\alpha \times T \le t \le T$ inter ouvert
Diode passante
On suppose Vs constante
(ondulation négligée)

$$ve(t) = vL(t) + Vs(t)$$

$$vL(t) = L \times \frac{diL(t)}{dt}$$

$$iL(t) = \frac{Ve - Vs}{L} \times t + K$$

A $t = \alpha \times T$, $iL(\alpha \times T) = iLM$

Donc $K = -\frac{Ve - Vs}{L} \times \alpha \times T + iLM$

$\boxed{\Rightarrow iL(t) = \frac{Ve - Vs}{L} \times (t - \alpha \times T) + iLM}$ **(13)**

A $t = T$,

$$iL(T) = iLm = \frac{Ve - Vs}{L} \times T \times (1 - \alpha) + iLM$$

$\boxed{\Delta IL = iLM - iLm = \frac{Vs - Ve}{L} \times T \times (1 - \alpha)}$ **(14)**

De (11) et (14) $\boxed{Vs = \frac{Ve}{1 - \alpha}}$ **(15)**

Si $\Delta IL = k \times Is$, alors avec **(12a)**

$\boxed{L = \frac{Vs - Ve}{k \times Is \times f} \times \frac{Ve}{Vs}}$ **(15a)**

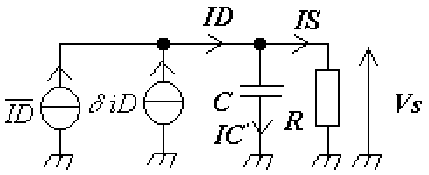
2.2.2) Calcul de L

D'après (11) $L = \frac{\alpha \times Ve}{\Delta IL \times f}$ La limite du discontinu impose $\Delta IL_{MAX} = 2 \times \overline{IL} = \frac{2 \times Is}{1 - \alpha}$

Donc $\boxed{L_{MIN} = \frac{\alpha \times (1 - \alpha) \times Ve}{2 \times Is \times f} = \frac{Vs - Ve}{2 \times Is \times f} \times \frac{Ve^2}{Vs^2}}$ **(16)** sinon discontinu

2.2.3) Calcul de C

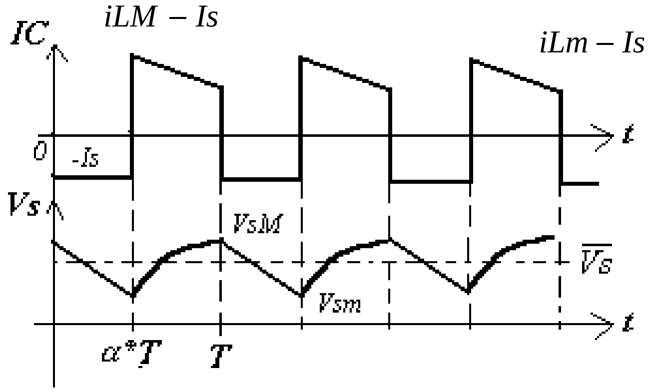
En réalité, *vs(t)* ondule ($vs(t) = \overline{Vs} + \delta vs$). Cette ondulation est liée à l'ondulation de *iD(t)* appelée $\delta\ iD$.



$$iD(t) = iC(t) + is(t) \Rightarrow \overline{ID} + \delta\ iD = ic(t) + Is$$

or $Is = \overline{ID}$ donc $ic(t) = \delta iD = C \times \frac{d(\delta vs)}{dt}$

$$\delta vs = \frac{1}{C} \times \int_{t1}^{t2} \delta iD\ dt$$



$\Delta Vs = VsM - Vsm$

Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$

$Vs(t) = \dfrac{1}{C} \times \int_0^{\alpha \times T} ic(t)dt = -\dfrac{Is}{C} \times t + K$

$Vs(0) = VsM \Rightarrow K = VsM$

donc $Vs(t) = -\dfrac{Is}{C} \times t + VsM$

$Vs(\alpha \times T) = Vsm = -\dfrac{Is}{C} \times \alpha \times T + VsM$

$\boxed{\Rightarrow \Delta Vs = \dfrac{Is \times \alpha \times T}{C}}$ **(16a)**

$Is = \dfrac{Vs}{R}$ donc $\boxed{\Delta Vs = \dfrac{Vs \times \alpha \times T}{R \times C}}$ **(16b)** or $Vs = \dfrac{Ve}{1-\alpha}$ donc $\boxed{\Delta Vs = \dfrac{\alpha \times Ve}{(1-\alpha) \times R \times C \times f}}$ **(17)**

or $\Delta IL = \dfrac{\alpha \times Ve}{L \times f}$ donc $\boxed{\Delta Vs = \dfrac{L \times \Delta IL}{(1-\alpha) \times R \times C}}$ **(18)**

avec $\alpha = 1 - \dfrac{Ve}{Vs}$ et **(16a)** $\boxed{\Rightarrow \Delta Vs = \dfrac{(Vs - Ve) \times Is}{C \times f \times Vs}}$ **(18bis)**

<u>Remarque1</u> : si $\alpha = 1$ alors $\Delta IL = \Delta IL \max$ et $\Delta Vs = \infty$

<u>Remarque2</u> : Lorsque $\alpha \times T \le t \le T$, $iL = iC + Is \Rightarrow iC = iL - Is$

$$\overline{IC} = \frac{1}{T} \times [(-Is) \times \alpha \times T + [(iLm - Is) + \frac{1}{2} \times (iLM - iLm)] \times (T - \alpha \times T)]$$

$$\overline{IC} = (-Is) \times \alpha \times -Is \times (1-\alpha) + \frac{1}{2} \times (iLM + iLm) \times (1-\alpha)$$

or $\overline{IL} = \dfrac{1}{2} \times (iLM + iLm)$ donc $\overline{IC} = -Is + \overline{IL} \times (1-\alpha)$

Le régime est établi donc $\overline{IC} = 0$ donc $\boxed{Is = (1-\alpha) \times \overline{IL} = \overline{I_D}}$ **(18a)**

<u>Remarque3</u> : $Pe = Ps \Rightarrow Ve \times \overline{IL} = Vs \times Is \Rightarrow Is = \dfrac{Ve}{Vs} \times \overline{IL}$ $\boxed{\Rightarrow Is = (1-\alpha) \times \overline{IL} == \overline{I_D}}$ **(18a)**

<u>2.2.4) Contraintes</u>

* <u>Interrupteur</u> : $VT \max = Vs$ $IT \max = iLM = \overline{IL} + \dfrac{\Delta IL}{2} = \dfrac{Is}{1-\alpha} + \dfrac{\Delta IL}{2}$

* <u>Diode</u> : $V \max = Vs$ $ID \max = Is + \dfrac{\Delta IL}{2}$ $\overline{ID} = Is$

* <u>Facteur de dimensionnement de l'interrupteur</u> :

on néglige l'ondulation de courant ΔIL

$$Fd = \frac{VT \max \times IT \max}{Ps} = \frac{\dfrac{Vs \times Is}{1-\alpha}}{Vs \times Is} \quad \text{donc} \quad Fd = \frac{1}{1-\alpha}$$

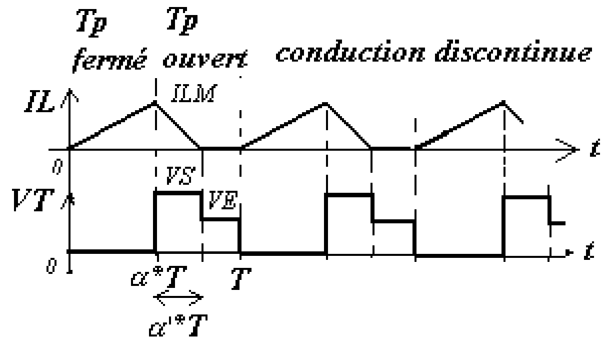
* <u>Facteur de dimensionnement de la diode</u> :

on néglige l'ondulation de courant ΔIL

$$Fd = \frac{V\max \times ID\max}{Ps} = \frac{Vs \times \overline{ID}}{Vs \times Is} = \frac{Vs \times Is}{Vs \times Is} \qquad \text{donc } Fd = 1$$

2.2.5) Fonctionnement en discontinu

Dans ce cas, le courant *IL* s'annule durant la période *T*. Cela se produit quand le courant moyen absorbé par la charge est inférieur à $\frac{\Delta IL}{2}$.



* Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$

$$iL(t) = \frac{1}{L} \times Ve \times t \qquad \boxed{iL(\alpha \times T) = iLM = \frac{Ve}{L} \times \alpha \times T} \qquad \textbf{\textit{(18b)}}$$

* Lorsque $\alpha \times T \le t \le T$ (origine en $\alpha \times T$)

$$\Rightarrow iL(t) = -\frac{1}{L} \times (Ve - Vs) \times t + iLM \qquad iL(\alpha' \times T) = 0 \Rightarrow iLM = \frac{(Vs - Ve) \times \alpha' \times T}{L}$$

donc $\frac{Ve}{L} \times \alpha \times T = \frac{(Vs - Ve) \times \alpha' \times T}{L}$ $\boxed{\Rightarrow \alpha' = \alpha \times \frac{Ve}{Vs - Ve}}$ ***(18c)***

D'autre part, $Is = \overline{ID}$ donc $Is = \frac{1}{T} \times (\frac{1}{2} \times ILM \times \alpha' \times T)$ $\boxed{\Rightarrow Is = \frac{1}{2} \times ILM \times \alpha'}$ ***(18d)***

A l'aide de ***(18b), (18c)*** et ***(18d),*** on obtient :

$$Is = \frac{\alpha \times Ve}{2 \times L \times f} \times \alpha \times \frac{Ve}{Vs - Ve} \qquad \boxed{\Rightarrow Is = \frac{\alpha^2 \times Ve^2}{2 \times L \times f \times (Vs - Ve)}} \qquad \textbf{\textit{(18e)}}$$

d'où $\boxed{Vs = Ve + \frac{\alpha^2 \times Ve^2}{2 \times L \times f \times Is}}$ ***(18f)***

La limite de fonctionnement continu-discontinu est $\alpha' = 1 - \alpha$

D'après ***(18d)*** et avec $Vs = \frac{Ve}{1-\alpha}$**,** cette limite est $\boxed{Is_{LIM} = \frac{ILM}{2} \times \alpha' = \frac{\Delta IL}{2} \times (1 - \alpha)}$ ***(18g)***

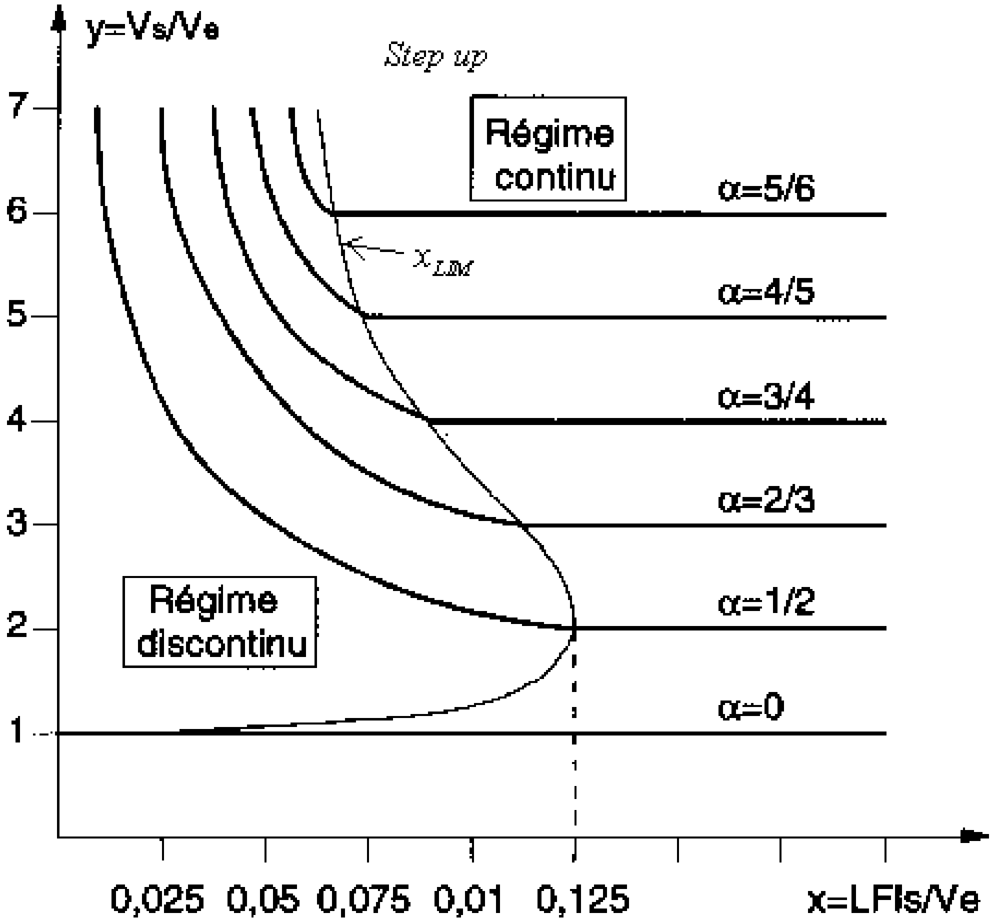
$$Is_{LIM} = \frac{ILM}{2} \times \alpha' = \frac{1}{2} \times \frac{\alpha \times Ve}{L \times f} \times \alpha' = \frac{1}{2} \times \frac{Ve}{L \times f} \times (1 - \alpha) \times \alpha$$

$$\boxed{\Rightarrow Is_{LIM} = \frac{1}{2} \times \frac{Ve}{L \times f} \times \frac{Ve}{Vs} \times (1 - \frac{Ve}{Vs})} \qquad \textbf{\textit{(19)}}$$

En posant que tension normalisée = $y = \dfrac{Vs}{Ve}$ et courant normalisé = $x = \dfrac{L \times f \times Is}{Ve}$, on obtient

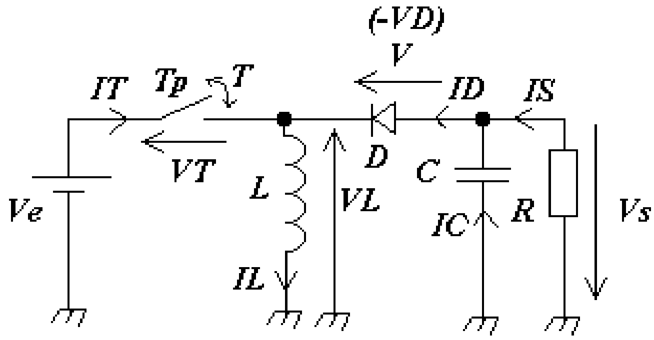
$y = \dfrac{1}{1-\alpha}$ en continu et $y = 1 + \dfrac{\alpha^2}{2 \times x}$ en discontinu (d'après ***(18f)***)

De plus, $x_{LIM} = \dfrac{L \times f \times Is_{LIM}}{Ve} = \dfrac{1}{2} \times \dfrac{Ve}{Vs} \times (1 - \dfrac{Ve}{Vs}) = \dfrac{1}{2} \times \dfrac{1}{y} \times (1 - \dfrac{1}{y})$ $\boxed{\Rightarrow x_{LIM} = \dfrac{y-1}{2 \times y^2}}$ ***(19a)***



2.3) HACHEUR A STOCKAGE INDUCTIF (TYPE BUCK-BOOST OU INVERSEUR DE TENSION)

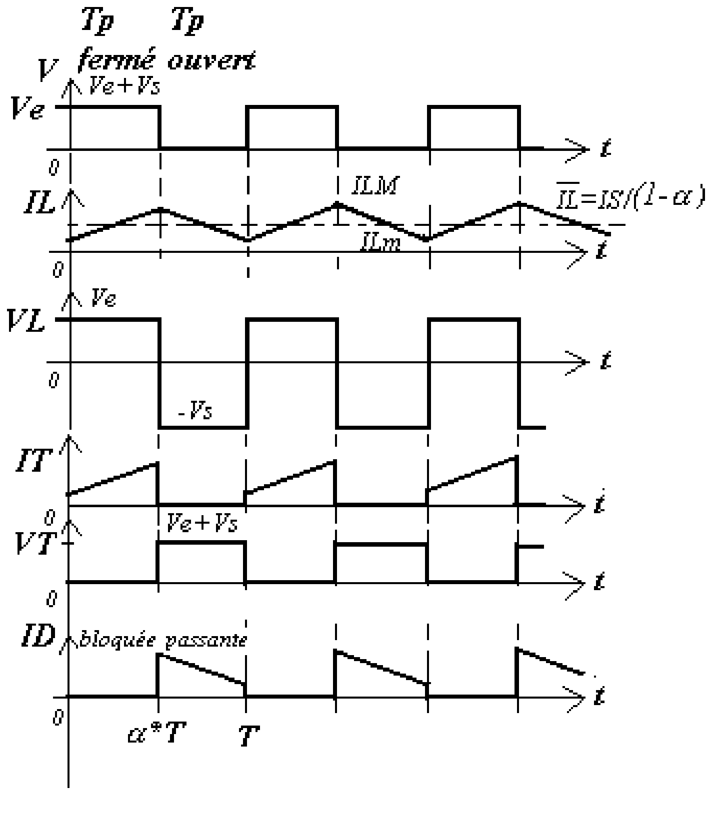
2.3.1) Présentation



L'interrupteur *Tp* se ferme et s'ouvre à une période *T*.
Il est fermé du temps *0* au temps $\alpha \times T$:
La source primaire fournit de l'énergie à l'inductance *L* et la tension de sortie est négative par rapport au point commun ; la diode est bloquée.

Il est ouvert du temps $\alpha \times T$ au temps T :
la diode est passante et assure la décharge de *L* dans *R*.

Les formes de courant et tension en conduction continue sont les suivantes.



En moyenne : $\overline{VL} = 0$.
D'après le graphe de vL :
$ve \times \alpha \times T - Vs \times (1-\alpha) \times T = 0$

d'où $\boxed{Vs = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times Ve}$

Vs est réellement dans le sens du schéma
***Vs* est négative par rapport à la masse**

$\boxed{0 \le \alpha \le 1 \Rightarrow Vs \le Ve \ \ ou \ \ Vs \ge Ve}$

Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$ inter fermé
Diode bloquée
On suppose Vs constante
(ondulation négligée)

$$Ve(t) = vL(t) = L \times \frac{diL(t)}{dt}$$

Donc $\boxed{iL(t) = \frac{Ve}{L} \times t + iLm}$ **(20)**

A $t = 0$, $iL(0) = iLm$

A $t = \alpha \times T$,

$$iL(\alpha \times T) = iLM = \frac{Ve}{L} \times \alpha \times T + iLm$$

$$\Delta IL = iLM - iLm = \frac{Ve}{L} \times \alpha \times T$$

donc $\boxed{\Delta IL = \frac{\alpha \times Ve}{L \times f}}$ **(21)**

$$\frac{d\Delta IL}{d\alpha} = \frac{Ve}{L \times f} \neq 0$$

Quand $\alpha = 1$, $\boxed{\Delta IL = \Delta IL\max = \frac{Ve}{L \times f}}$ **(22)**

Avec **(25)** et **(21)** $\boxed{\Delta IL = \frac{Vs \times Ve}{L \times f \times (Vs + Ve)}}$ **(22a)**

Lorsque $\alpha \times T \le t \le T$ inter ouvert
Diode passante
On suppose Vs constante
(ondulation négligée)

$$vL(t) = v(t) - Vs(t) = -Vs(t)$$

$$vL(t) = L \times \frac{diL(t)}{dt}$$

$$iL(t) = -\frac{Vs}{L} \times t + K$$

A $t = \alpha \times T$, $iL(\alpha \times T) = iLM$

Donc $K = +\frac{Vs}{L} \times \alpha \times T + iLM$

$\boxed{\Rightarrow iL(t) = -\frac{Vs}{L} \times (t - \alpha \times T) + iLM}$ **(23)**

A $t = T$,

$$iL(T) = iLm = -\frac{Vs}{L} \times T \times (1 - \alpha) + iLM$$

$\boxed{\Delta IL = iLM - iLm = \frac{Vs}{L} \times T \times (1 - \alpha)}$ **(24)**

De (21) et (24) $\boxed{Vs = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times Ve}$ **(25)**

Si $\Delta IL = k \times Is$, alors avec **(22a)**

$\boxed{L = \frac{Vs \times Ve}{k \times Is \times f \times (Vs + Ve)}}$ **(25a)**

<u>2.3.2) Calcul de L</u>

D'après (21) $L = \frac{\alpha \times Ve}{\Delta IL \times f}$ La limite du discontinu impose $\Delta IL_{MAX} = 2 \times \overline{IL} = \frac{2 \times Is}{1 - \alpha}$

Avec $\alpha = \frac{Vs}{Ve + Vs}$ $\boxed{L_{MIN} = \frac{\alpha \times (1 - \alpha) \times Ve}{2 \times Is \times f} = \frac{Vs \times Ve^2}{2 \times Is \times f \times (Vs + Ve)^2}}$ **(26)** sinon discontinu

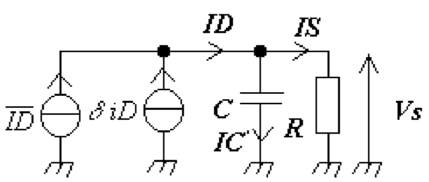
<u>2.3.3) Calcul de C</u>

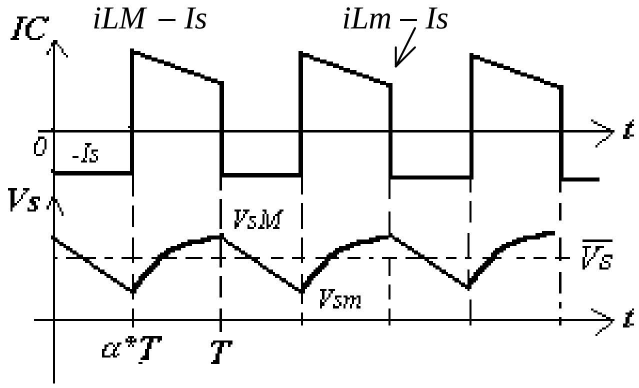
En réalité, *vs(t)* ondule ($vs(t) = \overline{Vs} + \delta vs$). Cette ondulation est liée à l'ondulation de *iD(t)* appelée $\delta\ iD$.

$$iD(t) = iC(t) + is(t) \Rightarrow \overline{ID} + \delta\ iD = ic(t) + Is$$

or $Is = \overline{ID}$ donc $ic(t) = \delta iD = C \times \frac{d(\delta vs)}{dt}$

$$\delta vs = \frac{1}{C} \times \int \delta iD\ dt$$





$\Delta Vs = VsM - Vsm$

Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$

$Vs(t) = \dfrac{1}{C} \times \int_0^{\alpha \times T} ic(t)dt = -\dfrac{Is}{C} \times t + K$

$Vs(0) = VsM \Rightarrow K = VsM$

donc $Vs(t) = -\dfrac{Is}{C} \times t + VsM$

$Vs(\alpha \times T) = Vsm = -\dfrac{Is}{C} \times \alpha \times T + VsM$

$\boxed{\Rightarrow \Delta Vs = VsM - Vsm = \dfrac{Is \times \alpha \times T}{C}}$ **(26a)**

$Is = \dfrac{Vs}{R}$ donc $\boxed{\Delta Vs = \dfrac{Vs \times \alpha \times T}{R \times C}}$ **(26b)** or $Vs = \dfrac{\alpha \times Ve}{1-\alpha}$ donc $\boxed{\Delta Vs = \dfrac{\alpha^2 \times Ve}{(1-\alpha) \times R \times C \times f}}$ **(27)**

or $\Delta IL = \dfrac{\alpha \times Ve}{L \times f}$ donc $\boxed{\Delta Vs = \dfrac{\alpha \times L \times \Delta IL}{(1-\alpha) \times R \times C}}$ **(28)**

avec $\alpha = \dfrac{Vs}{Ve + Vs}$ et **(26a)** $\boxed{\Rightarrow \Delta Vs = \dfrac{Vs \times Is}{C \times f \times (Vs + Ve)}}$ **(28bis)**

<u>Remarque 1</u> : si $\alpha = 1$ alors $\Delta IL = \Delta IL\max$ et $\Delta Vs = \infty$

<u>Remarque 2</u> : d'après les chronogrammes, $\overline{IT} = \alpha \times \overline{IL}$

$$Pe = Ps \Rightarrow Ve \times \overline{IT} = Vs \times Is \Rightarrow Is = \frac{Ve}{Vs} \times \overline{IT} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \times \alpha \times \overline{IL}$$

donc $\boxed{Is = (1-\alpha) \times \overline{IL}}$ **(28a)** d'après les chronogrammes, $\boxed{Is = \overline{ID}}$ **(28b)**

<u>2.3.4) Contraintes</u>

* <u>Interrupteur</u> : $VT\max = Ve + Vs$ $IT\max = iLM = \overline{IL} + \dfrac{\Delta IL}{2} = \dfrac{Is}{1-\alpha} + \dfrac{\Delta IL}{2}$

* <u>Diode</u> : $V\max = Ve + Vs$ $ID\max = \dfrac{Is}{1-\alpha} + \dfrac{\Delta IL}{2}$ $\overline{ID} = Is$

* <u>Facteur de dimensionnement de l'interrupteur</u> :

on néglige l'ondulation de courant ΔIL

$$Fd = \frac{VT\max \times IT\max}{Ps} = \frac{\dfrac{(Ve+Vs) \times Is}{1-\alpha}}{Vs \times Is} = \frac{\dfrac{1-\alpha}{\alpha} \times Vs + Vs}{(1-\alpha) \times Vs}$$ donc $Fd = \dfrac{1}{\alpha \times (1-\alpha)}$

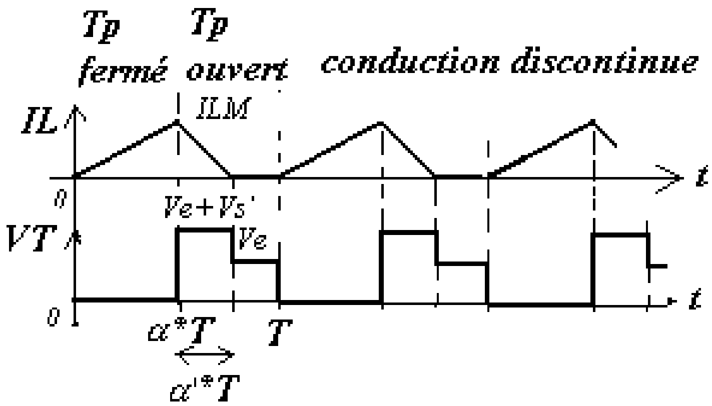
$\dfrac{dFd}{d\alpha} = -1 \times [\alpha \times (1-\alpha)]^{-2} \times (1 - 2 \times \alpha) = 0$ si $\alpha = 0{,}5$ donc Fd est minimale pour $\alpha = 0{,}5$

* <u>Facteur de dimensionnement de la diode</u> : on néglige l'ondulation de courant ΔIL

$$Fd = \frac{V\max \times ID\max}{Ps} = \frac{(Ve+Vs)\times \overline{ID}}{Vs\times Is} = \frac{(Ve+Vs)\times Is}{Vs\times Is} = \frac{\frac{1-\alpha}{\alpha}\times Vs + Vs}{Vs}$$ donc

$$Fd = \frac{1}{\alpha}$$

2.3.5) Fonctionnement en discontinu



* Lorsque $0 \le t \le \alpha\times T$

$$iL(t) = \frac{1}{L}\times Ve\times t \qquad \boxed{iL(\alpha\times T) = iLM = \frac{Ve}{L}\times\alpha\times T} \qquad \textbf{(28c)}$$

* Lorsque $\alpha\times T \le t \le T$ (origine en $\alpha\times T$)

$$\Rightarrow iL(t) = -\frac{1}{L}\times(-Vs)\times t + iLM \qquad iL(\alpha'\times T) = 0 \Rightarrow iLM = \frac{Vs\times\alpha'\times T}{L}$$

donc $\frac{Ve}{L}\times\alpha\times T = \frac{Vs\times\alpha'\times T}{L}$ $\boxed{\Rightarrow \alpha' = \frac{Ve}{Vs}\times\alpha}$ ***(28d)***

D'autre part, $Is = \overline{ID}$ donc $Is = \frac{1}{T}\times(\frac{1}{2}\times ILM\times\alpha'\times T)$ $\boxed{\Rightarrow Is = \frac{1}{2}\times ILM\times\alpha'}$ ***(28e)***

A l'aide de ***(28c), (28d)*** et ***(28e),*** on obtient :

$$Is = \frac{\alpha\times Ve}{2\times L\times f}\times\alpha\times(\frac{Ve}{Vs}) \qquad \boxed{\Rightarrow Is = \frac{\alpha^2\times Ve^2}{2\times L\times f\times Vs}} \quad \textbf{(28f)}$$

d'où $\boxed{Vs = \frac{\alpha^2\times Ve^2}{2\times L\times f\times Is}}$ ***(29)***

La limite de fonctionnement continu-discontinu est $\alpha' = 1-\alpha$

D'après ***(28e),*** cette limite est $\boxed{Is_{LIM} = \frac{ILM}{2}\times\alpha' = \frac{\Delta IL}{2}\times(1-\alpha)}$ avec $Vs = \frac{\alpha}{1-\alpha}\times Ve$ ***(29a)***

$$Is = \frac{ILM}{2}\times\alpha' = \frac{Vs\times\alpha'}{2\times L\times f}\times\alpha' = \frac{Vs\times(1-\alpha)}{2\times L\times f}\times(1-\alpha) = \frac{Vs\times(1-\alpha)^2}{2\times L\times f}$$

Or $Vs = \frac{\alpha}{1-\alpha}\times Ve \Rightarrow \alpha = \frac{Vs}{Vs+Ve}$ donc $Is_{LIM} = \frac{Vs\times(1-\frac{Vs}{Vs+Ve})^2}{2\times L\times f} = \frac{Vs\times(\frac{Ve}{Vs+Ve})^2}{2\times L\times f}$

$\boxed{Is_{LIM} = \frac{Vs\times Ve^2}{2\times L\times f\times(Vs+Ve)^2}}$ ***(29b)***

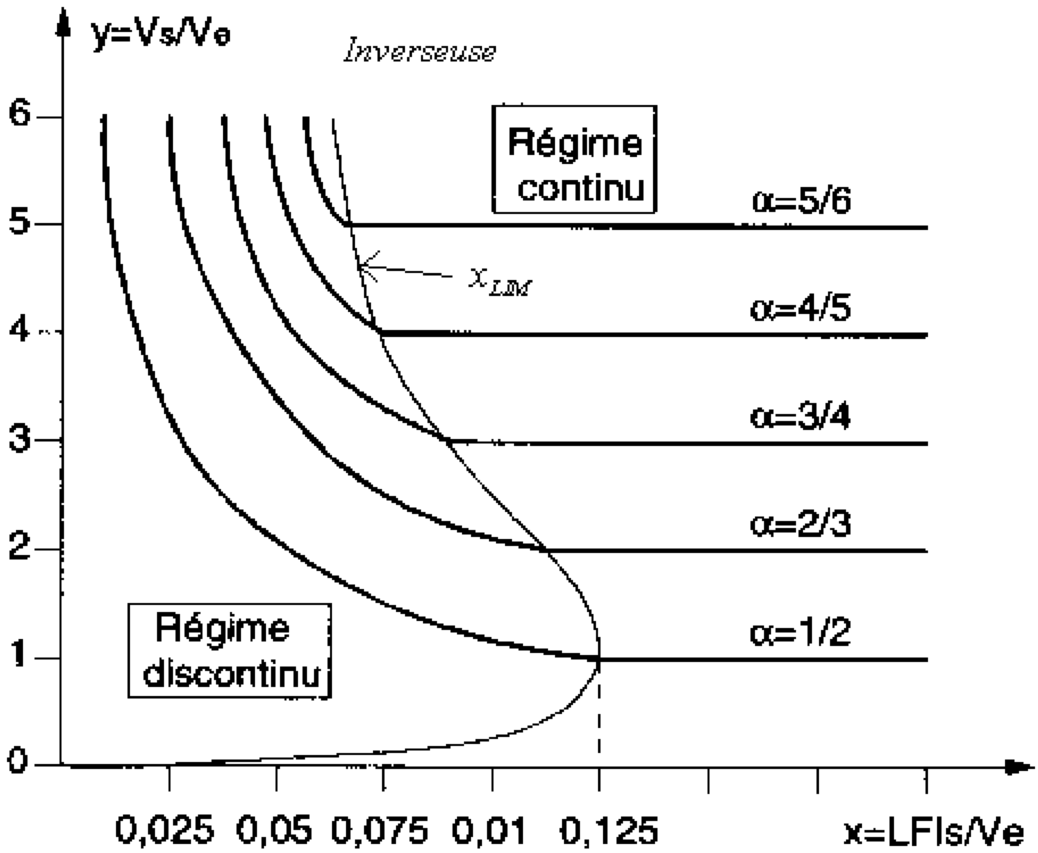
En posant que tension normalisée = $y = \frac{Vs}{Ve}$ et courant normalisé = $x = \frac{L \times f \times Is}{Ve}$, on obtient

$y = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ en continu et $y = \frac{\alpha^2}{2 \times x}$ en discontinu (d'après ***(29)***)

De plus,

$$x_{LIM} = \frac{L \times f \times Is_{LIM}}{Ve} = \frac{L \times f}{Ve} \times \frac{Vs \times Ve^2}{2 \times L \times f \times (Vs+Ve)^2} = \frac{Vs \times Ve}{2 \times (Vs+Ve)^2} = \frac{Vs \times Ve}{2 \times Ve^2 \times (\frac{Vs}{Ve}+1)^2}$$

$$\boxed{\Rightarrow x_{LIM} = \frac{y}{2 \times (1+y)^2}} \quad \textbf{\textit{(29c)}}$$



3) ALIMENTATIONS A DECOUPAGE ASYMETRIQUES

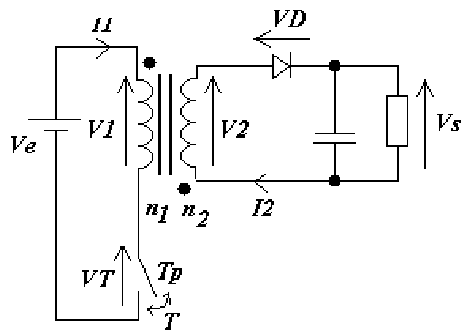
3.1) INTRODUCTION

Elles sont isolées galvaniquement. Le point de fonctionnement du circuit magnétique du transformateur n'évolue que dans un seul quadrant (B et H ne changent pas de signe).
Elles découlent directement des hacheurs étudiés (non réversibles).
Atout : un seul interrupteur de commande, simples, économiques.
Faible puissance ($\leq 150W$)

3.2) ALIMENTATION A DECOUPAGE FLYBACK

3.2.1) Présentation

Le montage est déduit du hacheur à stockage inductif dont l'inductance est doublée dans une structure magnétique couplée qui assure l'isolement galvanique mais dont le dimensionnement est celui d'une inductance..



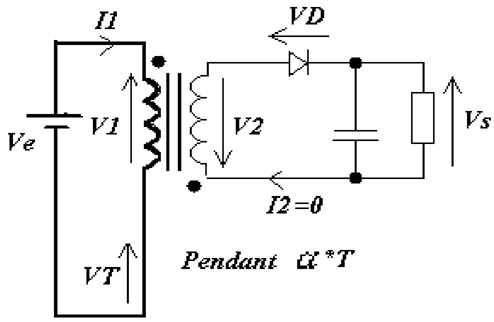
<u>Avantages</u>
Simple, économique

<u>Inconvénients</u>
Dimensionnement de l'interrupteur
(surtension due à l'inductance de fuite du transformateur) $\Rightarrow$ écrêteur
Couplage du transformateur
Filtrage (conduction discontinue)

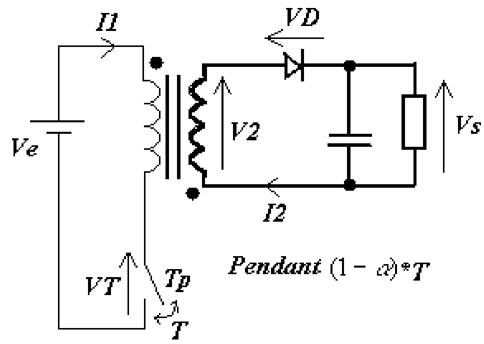
3.2.2) Principe de fonctionnement en mode continu

L'interrupteur *Tp* se ferme et s'ouvre à une période *T*.
Il est fermé du temps *0* au temps $\alpha \times T$:
L'énergie est stockée dans l'inductance primaire L1 et la diode est bloquée.
$V_D \max = -(m \times V_E + Vs) < 0$

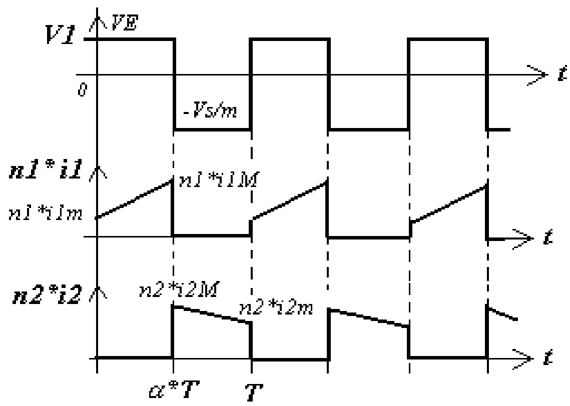
avec $m = \dfrac{n_2}{n_1}$



Il est ouvert du temps $\alpha \times T$ au temps T :
La continuité du flux magnétique ($n_2 \times i_{2M} = n_1 \times i_{1M}$) entraîne la mise en conduction de la diode.



Les deux enroulements ne sont pas parcourus simultanément par du courant. Le transformateur est donc, en fait, une association de deux inductances couplées. Cette caractéristique nécessite un circuit magnétique avec entrefer, le courant principal étant le courant magnétisant



Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$ inter fermé
Diode bloquée

$Ve(t) = v_1(t) = L_1 \times \dfrac{di_1(t)}{dt}$

$Ve(t) = cste = V_e$

Donc $\boxed{i_1(t) = \dfrac{Ve}{L_1} \times t + i_{1m}}$ **(30)**

A $t = 0$, $i_1(0) = i_{1m}$

A $t = \alpha \times T$,

$i_1(\alpha \times T) = i_{1M} = \dfrac{Ve}{L_1} \times \alpha \times T + I_{1m}$

$\Delta I_1 = I_{1M} - I_{1m} = \dfrac{Ve}{L_1} \times \alpha \times T$

donc $\boxed{\Delta I_1 = \dfrac{\alpha \times Ve}{L_1 \times f}}$ **(31)**

$\dfrac{d\Delta I_1}{d\alpha} = \dfrac{Ve}{L \times f} \ne 0$

Quand $\alpha = 1$, $\boxed{\Delta I_1 = \Delta I_1 \max = \dfrac{Ve}{L_1 \times f}}$ **(32)**

Lorsque $\alpha \times T \le t \le T$ inter ouvert
Diode passante
On suppose Vs constante
(ondulation négligée)

$v_2(t) = V_s(t) = cste = Vs$

$Vs = -L_2 \times \dfrac{di_2(t)}{dt}$

$i_2(t) = -\dfrac{Vs}{L_2} \times t + K$

A $t = \alpha \times T$, $i_2(\alpha \times T) = i_{2M}$

Donc $K = \dfrac{Vs}{L_2} \times \alpha \times T + i_{2M}$

$\boxed{\Rightarrow i_2(t) = -\dfrac{Vs}{L_2} \times (t - \alpha \times T) + i_{2M}}$ **(33)**

A $t = T$,

$i_2(T) = i_{2m} = -\dfrac{Vs}{L_2} \times T \times (1-\alpha) + i_{2M}$

$\boxed{\Delta I_2 = i_{2M} - i_{2m} = \dfrac{(1-\alpha) \times Vs}{L_2 \times f}}$ **(34)**

$\dfrac{d\Delta I_2}{d\alpha} = -\dfrac{Vs}{L_2 \times f} \ne 0$

Quand $\alpha = 0$, $\boxed{\Delta I_2 = \Delta I_2 \max = \dfrac{Vs}{L_2 \times f}}$ **(35)**

D'après le principe du transformateur, $n_2 \times i_2 = n_1 \times i_1 \Rightarrow n_2 \times \Delta I_2 = n_1 \times \Delta I_1$

Avec **(31) et (34),** on obtient $n_2 \times \dfrac{(1-\alpha) \times Vs}{L_2 \times f} = n_1 \times \dfrac{\alpha \times Ve}{L_1 \times f} \Rightarrow Vs = \dfrac{\alpha}{1-\alpha} \times \dfrac{L_2}{L_1} \times \dfrac{n_1}{n_2} \times Ve$

Donc $\boxed{Vs = m \times \dfrac{\alpha}{1-\alpha} \times Ve}$ **(36)** avec $m = \dfrac{n_2}{n_1}$

$\boxed{\overline{I_2} = I_S}$

$\overline{P_1} = \overline{P_2} \Rightarrow Ve \times \overline{I_1} = Vs \times \overline{I_2} \Rightarrow \overline{I_1} = \dfrac{Vs}{Ve} \times \overline{I_2}$ donc $\boxed{\overline{I_1} = m \times \dfrac{\alpha}{1-\alpha} \times Is}$

En réalité, Vs ondule $\boxed{\Delta Vs = \dfrac{\alpha^2 \times m \times Ve}{(1-\alpha) \times R \times C \times f}}$

3.2.3) Contraintes

* Diode : $V\max = m \times Ve + Vs$ $\overline{ID} = Is$

* Interrupteur : $VT\max = Ve + \dfrac{Vs}{m}$

$$IT\max = i_{1M} = \overline{I_1} + \frac{\Delta IL}{2} = \frac{m \times \alpha \times Is}{1-\alpha} + \frac{\alpha \times Ve}{2 \times L_1 \times f}$$

* Facteur de dimensionnement de l'interrupteur :

on néglige l'ondulation de courant ΔIL

$$Fd = \frac{VT\max \times IT\max}{Ps} = \frac{(Ve + \frac{Vs}{m}) \times \frac{\alpha \times m \times Is}{1-\alpha}}{Vs \times Is}$$

$$= \frac{(\frac{1-\alpha}{m \times \alpha} \times Vs + \frac{Vs}{m}) \times \frac{m}{1-\alpha}}{Vs} = \frac{\frac{V_S}{m \times \alpha} \times (\frac{m}{1-\alpha})}{Vs}$$ donc $\boxed{Fd = \dfrac{1}{\alpha \times (1-\alpha)}}$

Fd est minimale pour $\alpha = 0{,}5$

* Facteur de dimensionnement de la diode :

on néglige l'ondulation de courant ΔIL

$$Fd = \frac{V\max \times ID\max}{Ps} = \frac{(m \times Ve + Vs) \times \overline{ID}}{Vs \times Is} = \frac{(m \times Ve + Vs) \times Is}{Vs \times Is} = \frac{\frac{1-\alpha}{m \times \alpha} \times Vs + Vs}{Vs}$$

donc $\boxed{Fd = 1 + \dfrac{1-\alpha}{m \times \alpha}}$

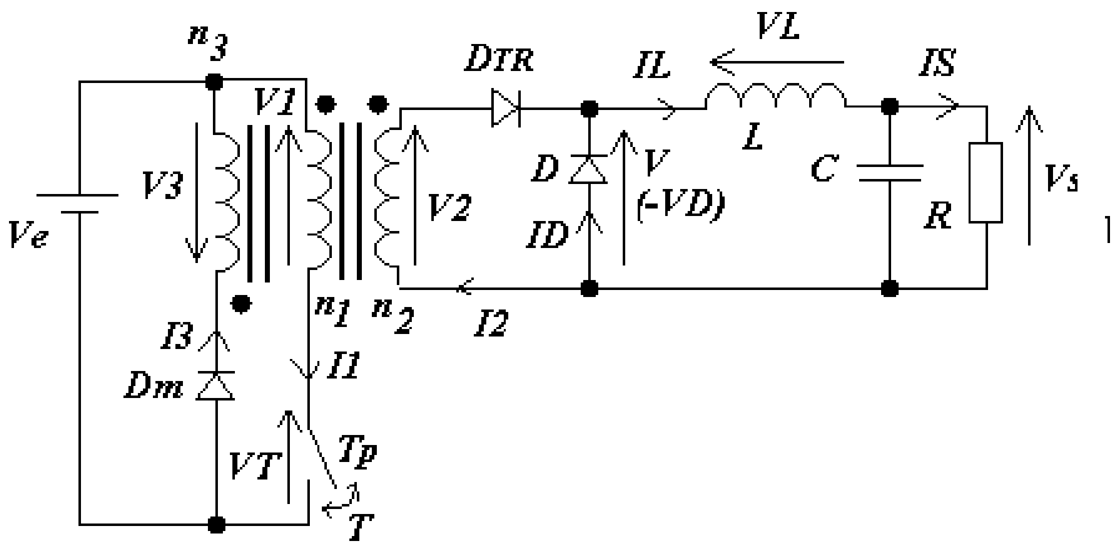
3.3) ALIMENTATION A DECOUPAGE FORWARD

3.3.1) Présentation

Le montage est déduit du hacheur série
La nécessité de générer une tension purement alternative aux bornes du transformateur entraîne la présence de composants supplémentaires :

Dm qui associée à *E3* va permettre la démagnétisation du transformateur à la suite de la conduction de *Tp*.

D_{TR} dont la fonction est d'isoler l'étage de sortie constitué de la diode de roue libre et du filtre lorsque apparaît aux bornes du transformateur l'inévitable tension négative correspondant à la démagnétisation par *Dm et E3.*



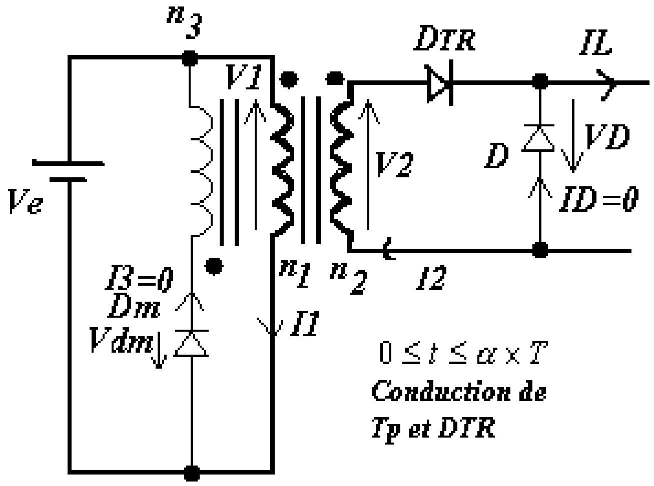
3.3.2) Principe de fonctionnement en mode continu

Soit $\Re$, la réluctance du noyau (comportement magnétique linéaire, pas de saturation)
Soit ϕ, le flux commun dans le noyau.

$$n_1 \times i_1 - n_2 \times i_2 + n_3 \times i_3 = \Re \times \phi \qquad v_1 = n_1 \times \frac{d\phi}{dt} \qquad \text{et } \frac{1}{\Re} = \frac{L_1}{n_1^2} = \frac{L_2}{n_2^2} = \frac{L_3}{n_3^2}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = m \qquad \frac{n_3}{n_1} = m'$$

3.3.2.1) Pendant la fermeture de Tp ($0 \le t \le \alpha \times T$)



$v_1 = Ve \Rightarrow v_2 = \frac{n_2}{n_1} \times Ve = m \times Ve$

$Vd = -m \times Ve$

$Vdm = -Ve - \frac{n_3}{n_1} \times Ve = -(1 + m') \times Ve$

$i_3 = 0, \; i_2 = i_L$

$n_1 \times i_1 - n_2 \times i_L = \Re \times \phi$

$v_1 = n_1 \times \frac{d\phi}{dt} = Ve \Rightarrow \phi = \frac{Ve}{n_1} \times t$

(démagnétisation complète)
donc

$i_1 = \frac{n_2}{n_1} \times i_L + \frac{\Re \times \phi}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} \times i_L + \frac{\Re \times Ve}{n_1{}^2} \times t$

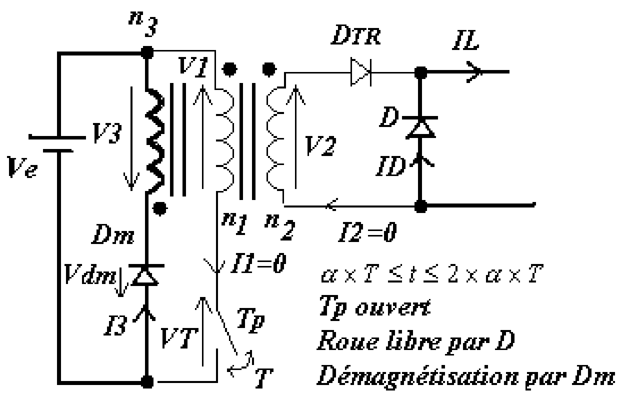
Le courant i_1 contient une composante due à la charge (transfert direct) et une composante magnétisante due à la présence du transformateur.

$$\boxed{i_1 = m \times i_L + \frac{Ve}{L_1} \times t = m \times i_L + i_{1MAG}}$$

A la fin de la phase de conduction,

$\phi = \phi_{MAX} = \frac{Ve \times \alpha \times T}{n_1}$

3.3.2.2) Phase de démagnétisation pendant l'ouverture de Tp ($\alpha \times T \le t \le 2 \times \alpha \times T$)



A l'ouverture de *Tp*, la continuité des ampére×tours est assurée par la mise en conduction de l'enroulement E3 par la diode *Dm*.

$v_3 = -Ve$ donc $v_1 = \frac{v_3}{m'} = -\frac{Ve}{m'}$

$v_T = Ve - v_1 = (1 + \frac{1}{m'}) \times Ve$

$v_2 = m \times v_1 = -\frac{m}{m'} \times Ve$

$i_1 = i_2 = 0$ donc $n_3 \times i_3 = \Re \times \phi$

$v_1 = n_1 \times \frac{d\phi}{dt} = -\frac{Ve}{m'}$ donc

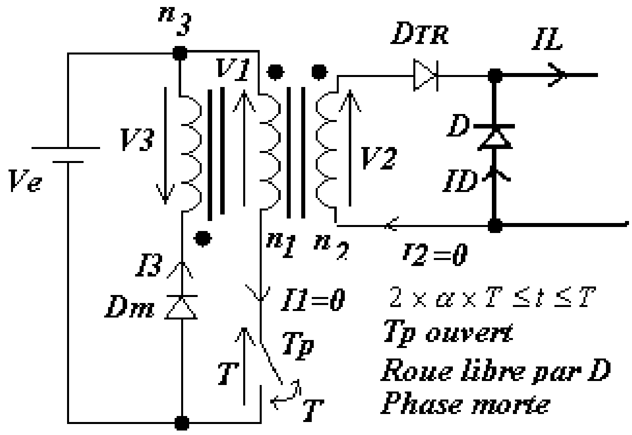
$\phi = \phi_{MAX} - \frac{Ve}{n_1 \times m'} \times t = \phi_{MAX} - \frac{Ve}{n_3} \times t$ et

$n_3 \times i_3 = \Re \times \phi = \Re \times \phi_{MAX} - \frac{\Re \times Ve}{n_3} \times t$

donc $\boxed{i_3 = \Re \times \phi = \frac{\Re \times \phi_{MAX}}{n_3} - \frac{Ve}{L_3} \times t}$

Par l'intermédiaire de l'enroulement E3,
L'énergie emmagasinée pendant le temps $\alpha \times T$ est restituée a la source.
Le courant i_3 décroît jusqu'à s'annuler si le dimensionnement est correct.
La diode *Dm* se bloque.
La démagnétisation est terminée.

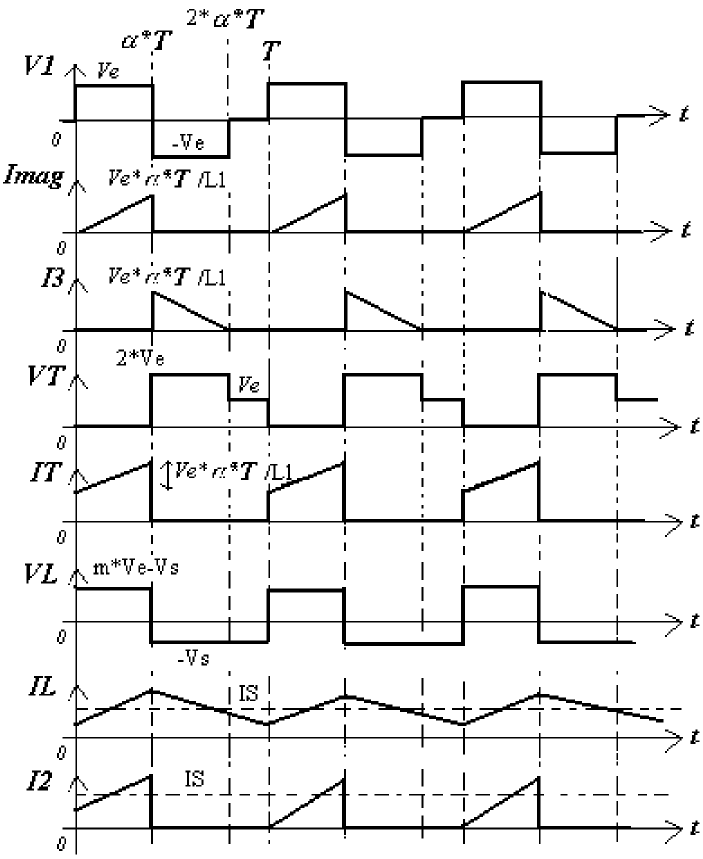
3.3.2.3) Phase morte pendant l'ouverture de Tp ($2 \times \alpha \times T \le t \le T$)



Seule la diode de roue libre D est passante.
Le transformateur est donc virtuellement déconnecté et les tensions aux bornes de ces enroulements sont nulles.

Remarque :
Afin d'éviter la saturation du noyau, le courant I_3 doit s'annuler avant le fin de la période, ce qui correspond à l'application d'une tension aux bornes du transformateur d'une tension dont la valeur moyenne est nulle.
Le rapport cyclique est donc limité par valeur supérieure et la conduction limite de bon fonctionnement est $\alpha_{MAX} \times Ve = (1 - \alpha_{MAX}) \times \frac{Ve}{m'}$ donc $\boxed{\alpha_{MAX} = \frac{1}{1+m'}}$

3.3.2.4) Forme d'onde pour $\frac{n_3}{n_1} = m' = 1$



$\overline{V_L} = 0$

$\Rightarrow (m \times Ve - Vs) \times \alpha \times T = Vs \times (1 - \alpha) \times T$

$\boxed{\Rightarrow Vs = m \times \alpha \times Ve}$ **(37)**

Pendant $\alpha \times T$

$VL(t) = v2 - Vs = m \times Ve - Vs$

donc $IL(t) = \frac{m \times Ve - Vs}{L} \times t + ILm$

$IL(\alpha \times T) = ILM = \frac{m \times Ve - Vs}{L} \times \alpha \times T + ILm$

$\Delta IL = \frac{m \times Ve - m \times \alpha \times Ve}{L} \times \alpha \times T$

$$\boxed{\Delta IL = \alpha \times (1 - \alpha) \times \frac{m \times Ve}{L \times f}} \quad \textbf{(38)}$$

$$\boxed{\Delta Vs = \alpha \times (1 - \alpha) \times \frac{m \times Ve}{8 \times L \times C \times f^2}} \quad \textbf{(39)}$$

* <u>Diodes</u> : diode D_{TR} $V_{DTR\ MAX} = m \times Ve$ $\overline{IDTR} = \alpha \times Is$

diode D $V_{D\ MAX} = m \times Ve$ $\overline{ID} = (1-\alpha) \times Is$

* <u>Interrupteurs</u> : $VT\max = \dfrac{1}{1+m'} \times Ve$

$$IT\max = m \times [Is + \underbrace{\alpha \times (1-\alpha) \times \frac{m \times Ve}{2 \times L \times f}}_{\frac{\Delta IL}{2}}] + \frac{Ve \times \alpha \times T}{L_1}$$

* <u>Diode Dm :</u> $V_{Dm}\max = (1+m') \times Ve$

* <u>Facteur de dimensionnement de l'interrupteur:</u>

$$Fd = \frac{VT\max \times IT\max}{Ps} = \frac{(1+\frac{1}{m'}) \times Ve \times m \times Is}{Vs \times Is} = \frac{(1+\frac{1}{m'}) \times Ve \times m \times Is}{m \times \alpha \times Ve \times Is} = \frac{(1+\frac{1}{m'})}{\alpha}$$

donc $\boxed{Fd = \dfrac{(1+\frac{1}{m'})}{\alpha}}$

En prenant $\alpha = \alpha_{MAX} = \dfrac{1}{1+m'}$ car $\dfrac{1}{m'} = \dfrac{\alpha_{MAX}}{1-\alpha_{MAX}}$, on obtient

$$Fdn = \frac{1+\frac{\alpha_{MAX}}{1-\alpha_{MAX}}}{\alpha_{MAX}}$$ donc $\boxed{Fdn = \dfrac{1}{\alpha_{MAX} \times (1-\alpha_{MAX})}}$

$$\frac{dFdn}{\alpha_{MAX}} = -1 \times [\alpha_{MAX} \times (1-\alpha_{MAX})]^{-2} \times (1 - 2 \times \alpha_{MAX})$$

Fdn est minimale pour $\alpha_{MAX} = 0{,}5$.

Dans ce cas, $\boxed{m' = \dfrac{1}{\alpha_{MAX}} - 1 = \dfrac{1-\alpha_{MAX}}{\alpha_{MAX}} = 1}$

4) RECAPITULATIF

	Hacheur série (BUCK)	Hacheur // (BOOST)	Hacheur à accumulation Inductive (BUCK-BOOST)
$y = Vs / Ve$	α (abaisseur)	$\frac{1}{1-\alpha}$ (élévateur)	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$ (inverseur)
ΔIL	$\frac{\alpha\times(1-\alpha)}{L\times f}\times Ve$ max à $\alpha = 0{,}5$	$\frac{\alpha\times Ve}{L\times f}$ max à $\alpha = 1$	$\frac{\alpha\times Ve}{L\times f}$ max à $\alpha = 1$
VTmax	Ve	Vs	$Ve + Vs$
ITmax	$Is + \frac{\Delta IL}{2}$	$\frac{Is}{1-\alpha} + \frac{\Delta IL}{2}$	$\frac{Is}{1-\alpha} + \frac{\Delta IL}{2}$
Fd de l'inter	$\frac{1}{\alpha}$	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{1}{\alpha\times(1-\alpha)}$
VDmax	Ve	Vs	$Ve + Vs$
IDmax	$Is + \frac{\Delta IL}{2}$	$Is + \frac{\Delta IL}{2}$	$\frac{Is}{1-\alpha} + \frac{\Delta IL}{2}$
$\overline{ID}$	$(1-\alpha)\times Is$	Is	Is
Fd de la Diode	$\frac{1-\alpha}{\alpha}$	1	$\frac{1}{\alpha}$
ymax	$\frac{R}{R + R_L}$	$\frac{1}{2}\times\sqrt{\frac{R}{R_L}}$	$1-\sqrt{\frac{R_L}{R_L + R}} \Big/ 2\times\sqrt{\frac{R_L}{R_L + R}}$
α max à ymax	1	$1-\sqrt{\frac{R_L}{R}}$	$1-\sqrt{\frac{R_L}{R_L + R}} \Big/ 1-\frac{R_L}{R_L + R}$
ΔVs	$\frac{\alpha\times(1-\alpha)}{8\times L\times C\times f^2}\times Ve$ max à $\alpha = 0{,}5$	$\frac{\alpha\times Ve}{(1-\alpha)\times R\times C\times f}$ max à $\alpha = 1$	$\Delta Vs = \frac{\alpha^2\times Ve}{(1-\alpha)\times R\times C\times f}$ max à $\alpha = 1$
Ie(t)	Discontinu	Continu	Discontinu
Iceff	Faible	fort	fort

Choix du rapport cyclique (influence des résistances parasites)

Exemple1 : hacheur parallèle (on tient compte de R_L : résistance de la diode)

$Ve = \overline{V_T} + R_L \times \overline{I_L} + Vs$ avec $\overline{I_L} = Is = \frac{Vs}{R}$ et $\overline{V_T} = (1-\alpha)\times Ve$

donc $Ve = (1-\alpha)\times Ve + R_L \times \frac{Vs}{R} + Vs \Rightarrow \alpha\times Ve = Vs\times\frac{R_L + R}{R}$

donc $\boxed{y = \frac{Vs}{Ve} = \alpha\times\frac{R}{R_L + R}}$

$y = y_{MAX} = \frac{R}{R_L + R}$ quand $\alpha = \alpha_{MAX} = 1$

Exemple2 : hacheur parallèle (on tient compte de R_L : résistance de la diode)

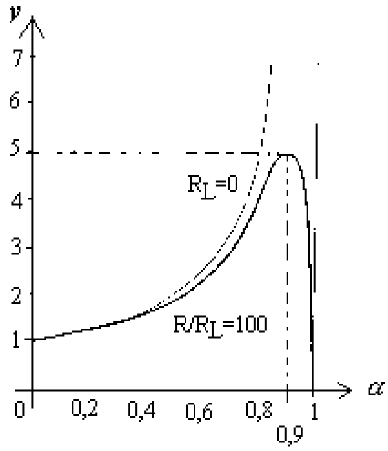
$Ve = R_L \times \overline{I_L} + \overline{V_T}$ avec

$\overline{IL} = \dfrac{Is}{1-\alpha} = \dfrac{Vs}{R \times (1-\alpha)}$ et $\overline{VT} = (1-\alpha) \times Vs$

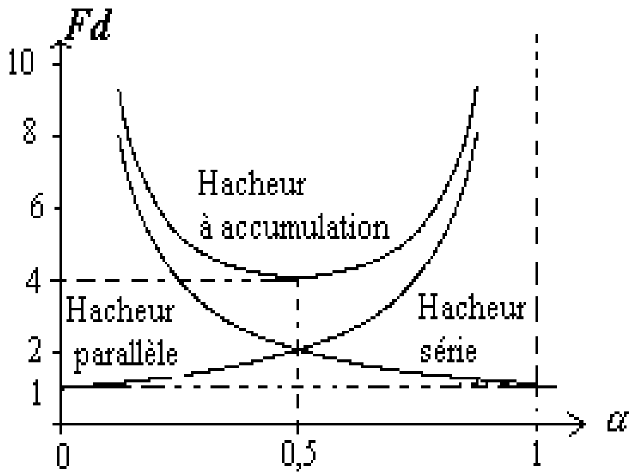
donc $Ve = R_L \times \dfrac{Vs}{R \times (1-\alpha)} + (1-\alpha) \times Vs$

donc $$\boxed{y = \frac{Vs}{Ve} = \frac{1}{(1-\alpha) \times [1 + \frac{R_L}{R} \times \frac{1}{(1-\alpha)^2}]}}$$

$y = y_{MAX} = \dfrac{1}{2} \times \sqrt{\dfrac{R}{R_L}}$ quand $\alpha = \alpha_{MAX} = 1 - \sqrt{\dfrac{R_L}{R}}$

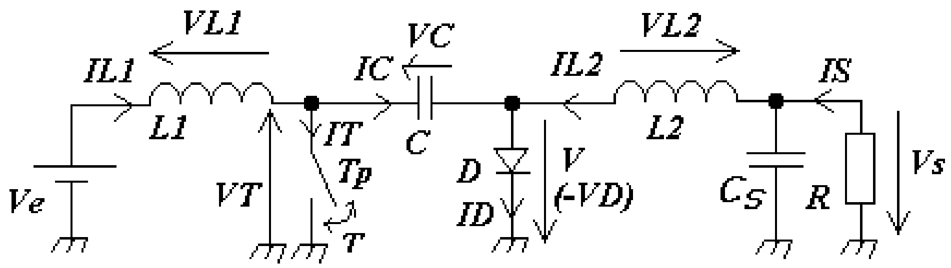


Evolution du facteur de dimensionnement en fonction de α



2.4) HACHEUR A STOCKAGE CAPACITIF (HACHEUR DE CUK)

2.4.1) Présentation



L'interrupteur *Tp* se ferme et s'ouvre à une période *T*.
Il est fermé du temps *0* au temps $\alpha \times T$:
La source primaire fournit de l'énergie à l'inductance *L1*.
Transfert d'énergie de *C* vers *L2* et *R*.
la tension de sortie est négative par rapport au point commun ; la diode est bloquée.

Il est ouvert du temps $\alpha \times T$ au temps T :
la diode est passante. La source Ve fournit de l'énergie au condensateur C.
Les formes de courant et tension en conduction continue sont les suivantes.

En moyenne : $\overline{VL1} = \overline{VL2} = 0$.
D'après le graphe de vL :
$ve \times \alpha \times T - Vs \times (1-\alpha) \times T = 0$

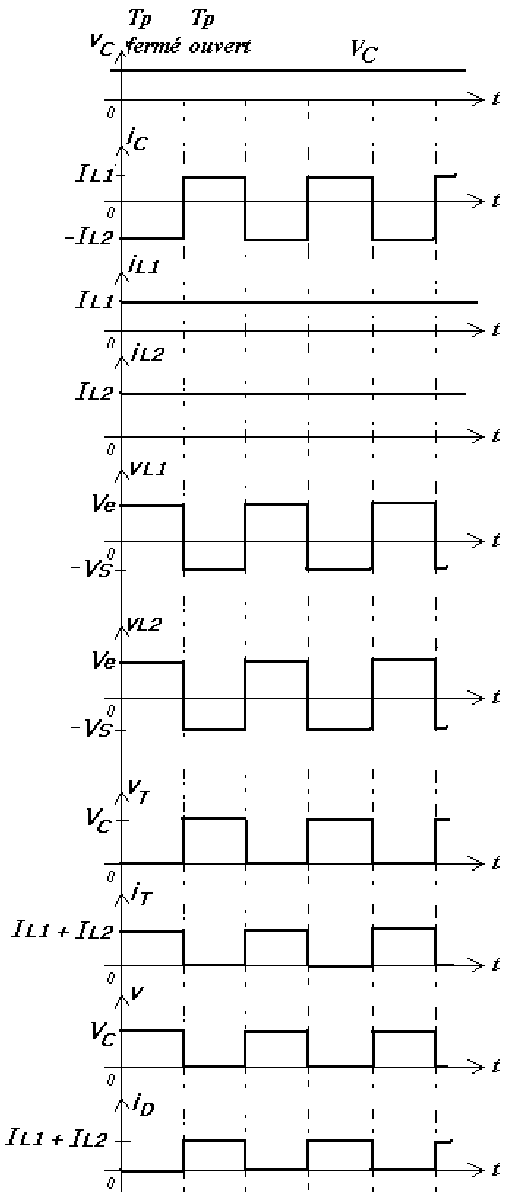
d'où $\boxed{Vs = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times Ve}$ $\boxed{y = \frac{Vs}{Ve} = \frac{\alpha}{1-\alpha}}$

Vs est réellement dans le sens du schéma
***Vs* est négative par rapport à la masse**

$\boxed{0 \le \alpha \le 1 \Rightarrow Vs \le Ve \;\; ou \;\; Vs \ge Ve}$

$\boxed{\overline{V} = \alpha \times V_C}$

$\boxed{\overline{V_T} = (1-\alpha) \times V_C}$

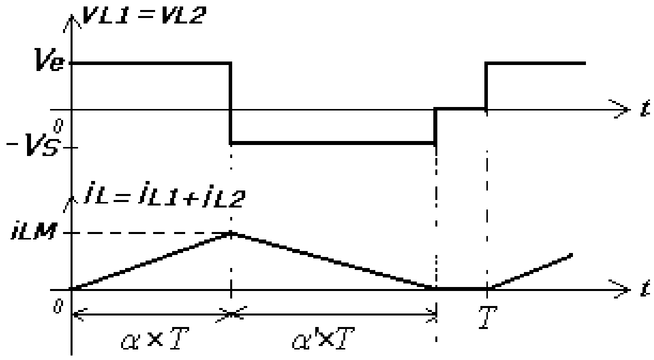


2.4.2) Fonctionnements en conduction discontinue

Il existe ici deux possibilités de régime discontinu, qui sont respectivement liées aux formes des courants dans LI et L2 et de la tension aux bornes de C.
La prise en compte de ces deux possibilités nécessite de retenir des hypothèses simplificatrices pour éviter une démarche extrêmement lourde. Ces hypothèses consistent à négliger l'ondulation de tension aux bornes de C, lorsque l'on s'intéressera aux ondulations de courant et inversement, à négliger les ondulations de courant dans le cas du calcul de l'ondulation de tension.
Ces simplifications sont justifiées par le fait que les deux mécanismes sont bien découplés, le régime discontinu en tension intervenant à forte charge (faibles ondulations relatives de courant), le régime discontinu en courant intervenant à faible charge (faible ondulation relative de tension).

2.4.2.1) Régime discontinu de courant

Ce régime est atteint lorsque le courant dans la diode s'annule avant la fin de la période de découpage. Ceci se produit lorsque la valeur moyenne du courant $iL = iL1 + iL2$ devient inférieure à la demi-ondulation crête-à-crête de ce même courant (figure ci-dessous). Si le schéma est plus compliqué, on constate donc que ce mécanisme demeure similaire à ce que nous avons précédemment observé.



Lorsque $0 \le t \le \alpha \times T$ inter fermé, diode bloquée

$$ve(t) = vL1(t) = L1 \times \frac{diL1(t)}{dt} \text{ donc } \boxed{iL1(t) = \frac{Ve}{L1} \times t}$$

$$v_C(t) - vs(t) = vL2(t) = L2 \times \frac{diL2(t)}{dt}$$

$$\text{donc } \boxed{iL2(t) = \frac{V_C - Vs}{L2} \times t = \frac{Ve}{L2} \times t}$$

$$iL(t) = iL1(t) + iL2(t) = Ve \times (\frac{1}{L1} + \frac{1}{L2}) \times t \ \Rightarrow iL(t) = Ve \times \frac{1}{Leq} \times t \text{ avec } Leq = \frac{L1 \times L2}{L1 + L2}$$

D'où $iLM = \dfrac{\alpha \times Ve}{Leq \times f}$ et $\boxed{\overline{iL} = \dfrac{\alpha \times Ve}{2 \times Leq \times f} \times (\alpha + \alpha')}$ **(40)**

D'autre part, $\overline{VL1} = \overline{VL2} = 0 \Rightarrow \alpha \times Ve = \alpha' \times Vs$ donc $\boxed{\overline{iL} = \dfrac{\alpha^2 \times Ve}{2 \times Leq \times f} \times (1 + \dfrac{Ve}{Vs})}$ **(41)**

D'autre part, on remarque que $\overline{iL2} = Is$ donc $\overline{iL} = \overline{iL1} + Is$

$Pe = Ps$ donc $Ve \times \overline{iL1} = Vs \times Is$

Donc $\boxed{\overline{iL} = (\frac{Vs}{Ve} + 1) \times Is}$ **(42)** mais $\overline{iL} = \frac{\alpha^2 \times Ve}{2 \times Leq \times f} \times (1 + \frac{Ve}{Vs})$

$$\Rightarrow \frac{\frac{Vs}{Ve} + 1}{1 + \frac{Ve}{Vs}} = \frac{\alpha^2 \times Ve}{2 \times Leq \times f \times Is} \quad \text{donc} \quad \boxed{\Rightarrow \frac{Vs}{Ve} = \frac{\alpha^2 \times Ve}{2 \times Leq \times f \times Is}} \; \textbf{(43)}$$

$$\boxed{y = \frac{Vs}{Ve} = \frac{\alpha^2}{2 \times x}} \; \textbf{(44)} \quad \text{avec} \quad x = \frac{Leq \times f \times Is}{Ve}$$

La limite de fonctionnement continu-discontinu est $\alpha' = 1 - \alpha$

D'après ***(42),*** $Is = \frac{\overline{iL}}{1 + \frac{Vs}{Ve}}$. Cette limite est $Is_{LIM} = \frac{\overline{iL_{LIM}}}{1 + \frac{Vs}{Ve}}$

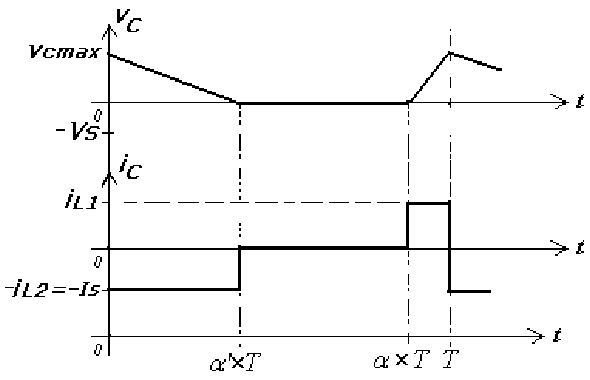
D'après **(41)**, $Is_{LIM} = \frac{1}{1 + \frac{Vs}{Ve}} \times \frac{\alpha^2 \times Ve}{2 \times Leq \times f} \times (1 + \frac{Ve}{Vs})$ donc $Is_{LIM} = \frac{\alpha^2 \times Ve}{2 \times Leq \times f} \times \frac{Ve}{Vs}$

avec $Vs = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times Ve$, on obtient $\alpha = \frac{\frac{Vs}{Ve}}{1 + \frac{Vs}{Ve}} = \frac{y}{1 + y}$ donc $Is_{LIM} = \frac{y}{(1 + y)^2} \times \frac{Ve}{2 \times Leq \times f}$

avec $x_{LIM} = \frac{Leq \times f \times Is_{LIM}}{Ve}$ et $y = \frac{Vs}{Ve} = \frac{\alpha^2}{2 \times x}$, on obtient $\boxed{x_{LIM} = \frac{y}{2 \times (1 + y)^2}}$

2.4.2.2) Régime discontinu de tension

Nous abordons maintenant l'étude du régime de conduction discontinue associé à la tension aux bornes de C qui, contrairement aux hacheurs étudiés précédemment, est atteint en pleine charge. En effet, l'ondulation de tension aux bornes du condensateur de stockage est proportionnelle au courant de charge Is (figure ci-dessous).



Lorsque $0 \le t \le \alpha' \times T$ inter fermé, diode bloquée

$$ic(t) = C\times\frac{dvc}{dt} \Rightarrow vc = \frac{1}{C}\int ic(t)dt \Rightarrow vc(t) = -\frac{1}{C}\times Is\times t + Vc\max$$

à $t = \alpha'\times T$, $vc(t) = 0$ $\Rightarrow \frac{Is}{C} = \frac{Vc\max}{\alpha'\times T}$ **(45)**

$Vs = \overline{Vc} \Rightarrow Vs = \frac{Vc\max}{2}\times\alpha'$ **(46)**

Lorsque $\alpha\times T \le t \le T$ inter ouvert, diode passante

$\Rightarrow \overline{Vt} = Ve = \frac{Vc\max}{2}\times(1-\alpha)$ **(47)**

De **(46)** et **(47)**, on tire $\boxed{Vs = \frac{\alpha'}{1-\alpha}\times Ve}$ **(48)**

Avec **(45)**, on obtient $Vs = \frac{\frac{C\times f\times Vc\max}{Is}}{1-\alpha}\times Ve$

Avec **(47)**, on obtient $\boxed{Vs = \frac{2\times C\times f\times Ve^2}{(1-\alpha)^2\times Is}}$ **(49)** donc $y = \frac{Vs}{Ve} = \frac{2\times C\times f\times Ve}{(1-\alpha)^2\times Is}$

$\boxed{y = \frac{Vs}{Ve} = \frac{2\times Leq\times C\times f^2}{(1-\alpha)^2}\times\frac{1}{x}}$ **(50)** avec $x = \frac{Leq\times f\times Is}{Ve}$

Ces caractéristiques sont hyperboliques. La condition correspondant à la limite de passage entre les deux régimes est : $(\frac{\Delta Vc}{2})_{LIM} = \overline{Vc}$ ($\alpha' = \alpha$)

Avec **(45)**, on obtient $\frac{Is_{LIM}\times\alpha\times T}{C} = Vc\max$

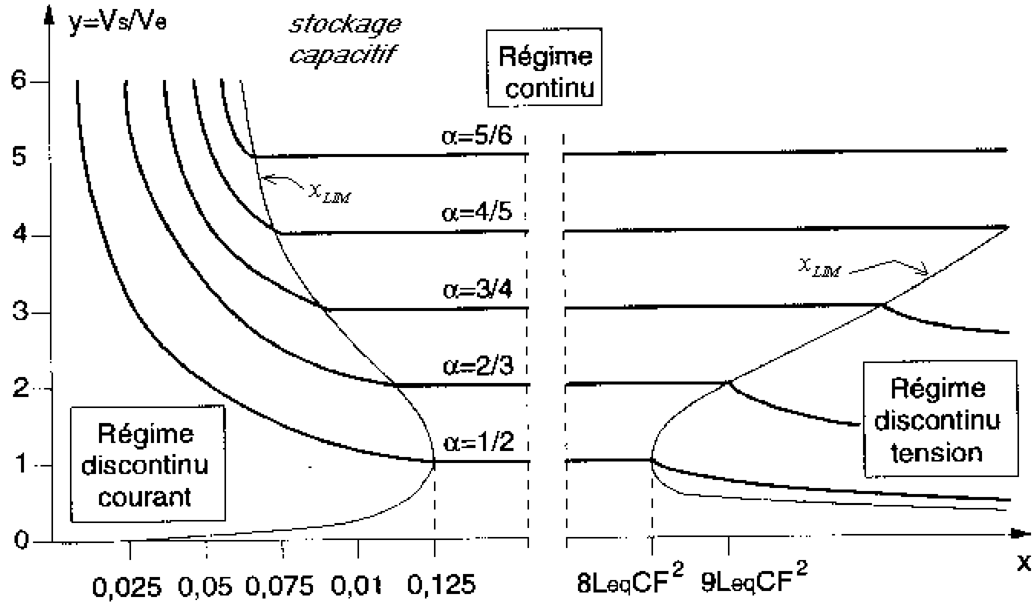
En utilisant **(47)**, on obtient $Is_{LIM} = \frac{C\times f}{\alpha}\times\frac{2\times Ve}{1-\alpha}$

avec $Vs = \frac{\alpha}{1-\alpha}\times Ve$, on obtient $\alpha = \frac{\frac{Vs}{Ve}}{1+\frac{Vs}{Ve}} = \frac{y}{1+y}$ donc

$$Is_{LIM} = \frac{C\times f}{\frac{y}{1+y}}\times\frac{2\times Ve}{1-\frac{y}{1+y}} = \frac{C\times f}{\frac{y}{1+y}}\times\frac{2\times Ve}{\frac{1}{1+y}} \qquad Is_{LIM} = \frac{2\times C\times f(1+y)^2\times Ve}{y}$$

$$x_{LIM} = \frac{Leq\times f\times Is_{LIM}}{Ve} \qquad \text{donc } x_{LIM} = \frac{2\times Leq\times C\times f^2\times(1+y)^2}{y}$$

x_{LIM} est minimal pour y = 1, ce qui correspond à une valeur minimale du courant limite qui est (Is_{LIM})$_{MINI}$ = $8\times Ve\times C\times f$. Les caractéristiques de sortie globales peuvent alors être représentées conformément à la figure ci dessous:



De cette analyse, nous déduisons la valeur minimale du condensateur C qui permet de rester en régime continu jusqu'au courant maximal, Ismax, délivré par le convertisseur :

$$\boxed{C_{MAX} = \frac{Is_{MAX}}{8 \times Ve \times f}}$$

2.4.3) Contraintes et relations sur les composants

2.4.3.1) Contraintes

* Interrupteur : $VT\max = \frac{Ve}{1-\alpha} + \frac{\alpha \times Is}{2 \times C \times f}$ $IT\max = \frac{Is}{1-\alpha} + \frac{\alpha \times Ve}{2 \times L1 \times f}$

* Diode : $V\max = \frac{Ve}{1-\alpha} + \frac{\alpha \times Is}{2 \times C \times f}$ $ID\max = \frac{Is}{1-\alpha} + \frac{\alpha \times Ve}{2 \times L2 \times f}$

2.4.3.2) Facteurs de dimensionnement:

de l'interrupteur $Fd = \frac{VT\max \times IT\max}{Ps} = \frac{1}{\alpha \times (1-\alpha)}$

$\frac{dFd}{d\alpha} = -1 \times [\alpha \times (1-\alpha)]^{-2} \times (1 - 2 \times \alpha) = 0$ si $\alpha = 0{,}5$ donc Fd est minimale pour $\alpha = 0{,}5$

de la diode :

$Fd = \frac{V\max \times ID\max}{Ps} = \frac{1}{\alpha}$ $Fd = \frac{1}{\alpha}$

2.4.3.3) Ondulation:

Tension du condensateur : $\Delta Vc = \dfrac{\alpha^2 \times Ve}{(1-\alpha)\times R \times C \times f}$

Tension de sortie : $\Delta Vs = \dfrac{\alpha \times Ve}{8 \times L2 \times C_S \times f^2}$

Courant d'entrée inductif : $\Delta iL1 = \dfrac{\alpha \times Ve}{L1 \times f}$

Courant de sortie inductif : $\Delta iL2 = \dfrac{\alpha \times Ve}{L2 \times f}$

2.4.4) Couplage magnétique des inductances

L'observation des tensions vL1 et vL2 nous montre que celles-ci sont égales quel que soit l'instant de la période. En effet:

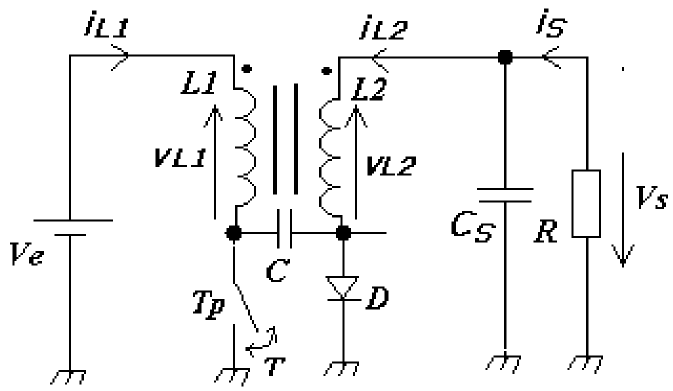
Pendant $\alpha \times T$ $\quad vL1(t) = Ve$

$vL2(t) = Vc - Vs = (1-\alpha)\times Vc = Ve$

Pendant $(1-\alpha)\times T$ $\quad vL1(t) = Ve - Vc = \dfrac{\alpha \times Ve}{1-\alpha} = -Vs$

$vL2(t) = -Vs$

Il est donc possible de coupler ces deux inductances sur un même noyau magnétique en respectant un rapport de transformation unitaire (figure ci-dessous)



Les équations (à travers la transformée de Laplace) du circuit couplé ainsi obtenu, relatives aux composantes alternatives des courants (δi_{L1} et δi_{L2}), sont:

$VL1(p) = L1 \times p \times \delta i_{L1}(p) + M \times p \times \delta i_{L2}(p)$

$VL2(p) = L2 \times p \times \delta i_{L2}(p) + M \times p \times \delta i_{L1}(p) = VL1(p)$

On déduit $\delta i_{L1}(p) = \dfrac{VL1(p)\times(L2-M)}{p\times(L1\times L2 - M^2)}$ et $\delta i_{L2}(p) = \dfrac{VL1(p)\times(L1-M)}{p\times(L1\times L2 - M^2)}$

On pose $k = \dfrac{M}{\sqrt{L1 \times L2}}$ = coefficient de couplage et $m = \sqrt{\dfrac{L1}{L2}} = \dfrac{n_2}{n_1}$ = rapport de transformation

On obtient $\delta i_{L1}(p) = \dfrac{VL1(p)\times(1-\frac{k}{m})}{p\times L1\times(\times 1-k^2)}$ et $\delta i_{L2}(p) = \dfrac{VL1(p)\times(1-k\times m)}{p\times L2\times(\times 1-k^2)}$

Il est possible d'annuler totalement l'ondulation du courant d'entrée ou l'ondulation du courant de sortie en agissant sur k et m :

- k = m entraîne $Ii_{L1}(p)=0$, ce qui correspond à $i1$ parfaitement continu,
- k = 1/m entraîne $Ii_{L2}(p)=0$, ce qui correspond à $i2$ parfaitement continu.

Cette dernière propriété permet de réduire considérablement la valeur du condensateur de sortie Cs, tout en diminuant l'encombrement du montage.