

ALIMENTATION POUR SYSTÈMES

Toulouse & Bordeaux Juin 2013 - JPaul NATALE - www.transfomaniac.com

Le LC et LLC et LLLC

Introduction :

Pour augmenter les densités W/kg et W/dm^3 des alimentations à découpage , il faut réduire les tailles des composants passifs (inductances , transformateurs et capacités) .

Travailler à des fréquences plus élevées permet de réduire conséquemment les dimensions et poids composants constituant et donc des alimentations.

Néanmoins , les pertes par commutations des semi-conducteurs et autre composants "actifs" est un obstacle pour travailler à des fréquences très hautes.

Pour réduire d'une manière importante les pertes par commutations à des fréquences très élevées , il faut développer des systèmes dit "résonnants" ainsi les composants actifs seront commutés d'une manière "douce" .

La réduction d'une manière importante les pertes par commutations permet entre autre d'augmenter considérablement le rendements des alimentations et en conséquence d'en réduire directement les échauffements.

La réduction des échauffements au sein d'un convertisseur garanti entre autre un niveau de fiabilité supérieur comparé à un système au rendement plus faible.

D'une manière générale , la commutation "douce" des semi-conducteurs permet de réduire fortement les problèmes de "bruits" de CEM.

Le LC et LLC et LLLC

Les différences fondamentales :

Le LC série:

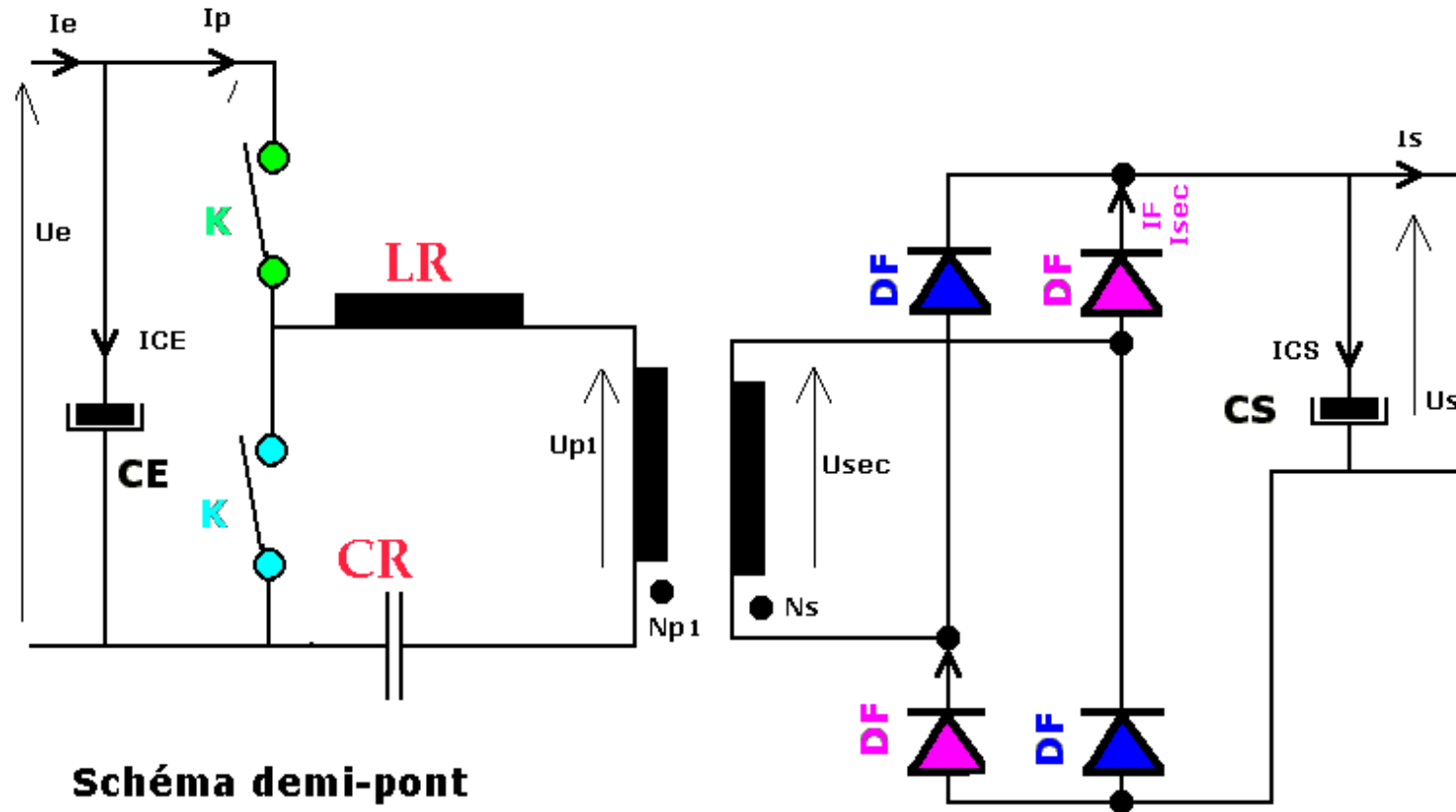


Schéma demi-pont

Schéma avec pont complet à diodes en redressement

$U_{sec} = \text{environ } U_s$

$V_{R_diode} = \text{environ } U_s$

Optimisation du transformateur

$f_r = 1 / (2 \times \pi \times \text{Racine} (L_R \times C_R))$

Le LC série:

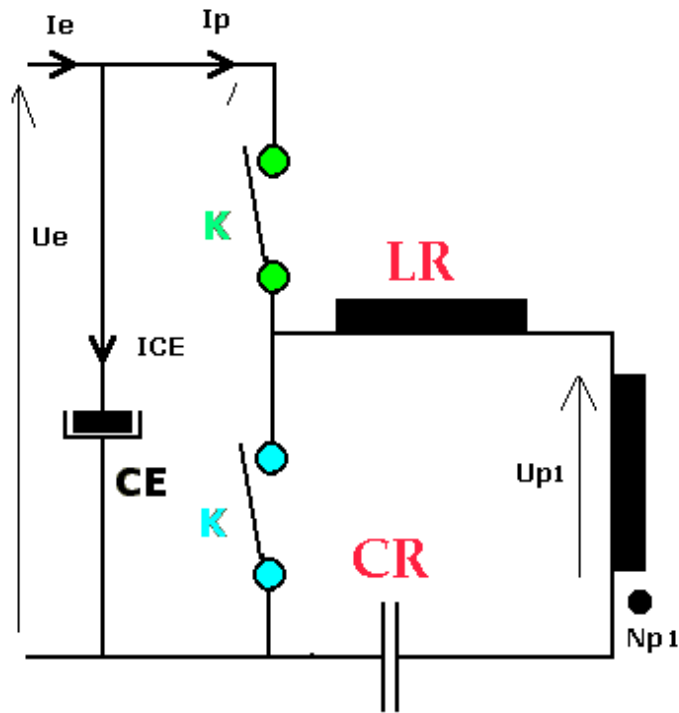


Schéma demi-pont

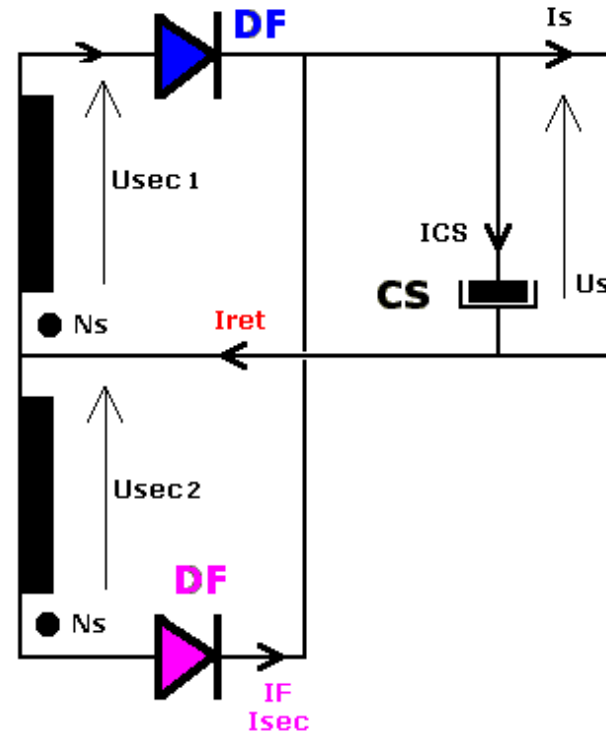


Schéma avec redressement en "va-et-vient"

Usec = environ Us

VR_diode = environ 2 x Us

FR= 1/(2 x Pi x Racine (LR x CR))

Optimisation du redressement dans la majeure partie des applications

Le LC série :

Description :

Fonctionnement : On change la fréquence de fonctionnement de la cellule LC et l'impédance du réseau résonnant change : cela permet de réguler !

La tension d'entrée est divisée entre l'impédance de la cellule LC @ la fréquence de découpage et la valeur de l'impédance vue au secondaire.

Si la fréquence très est élevée ==> l'impédance de LR est très élevée ==> on obtient une réduction de la tension et du courant disponible en sortie

Si la fréquence est faible , le gain en DC du montage est proche de 1 , c'est-à-dire :

$U_s = U_e \times N_p / N_s$. Notez la simplicité de la formule

Pour une topologie LC Série , le gain en DC est toujours inférieur à 1 (donc égal à N_p/N_s) .

Il est délicat de réguler des fortes variations de plage de tension d'entrée ou de sortie

Avec une faible charge en sortie , l'impédance de la charge est très forte devant celle du réseau LC , il est donc difficile de réguler à faible charge en sortie.

Pour un fonctionnement à vide , la fréquence de découpage devrait être infinie .

Le LLC (Schéma avec pont complet à diodes en redressement):

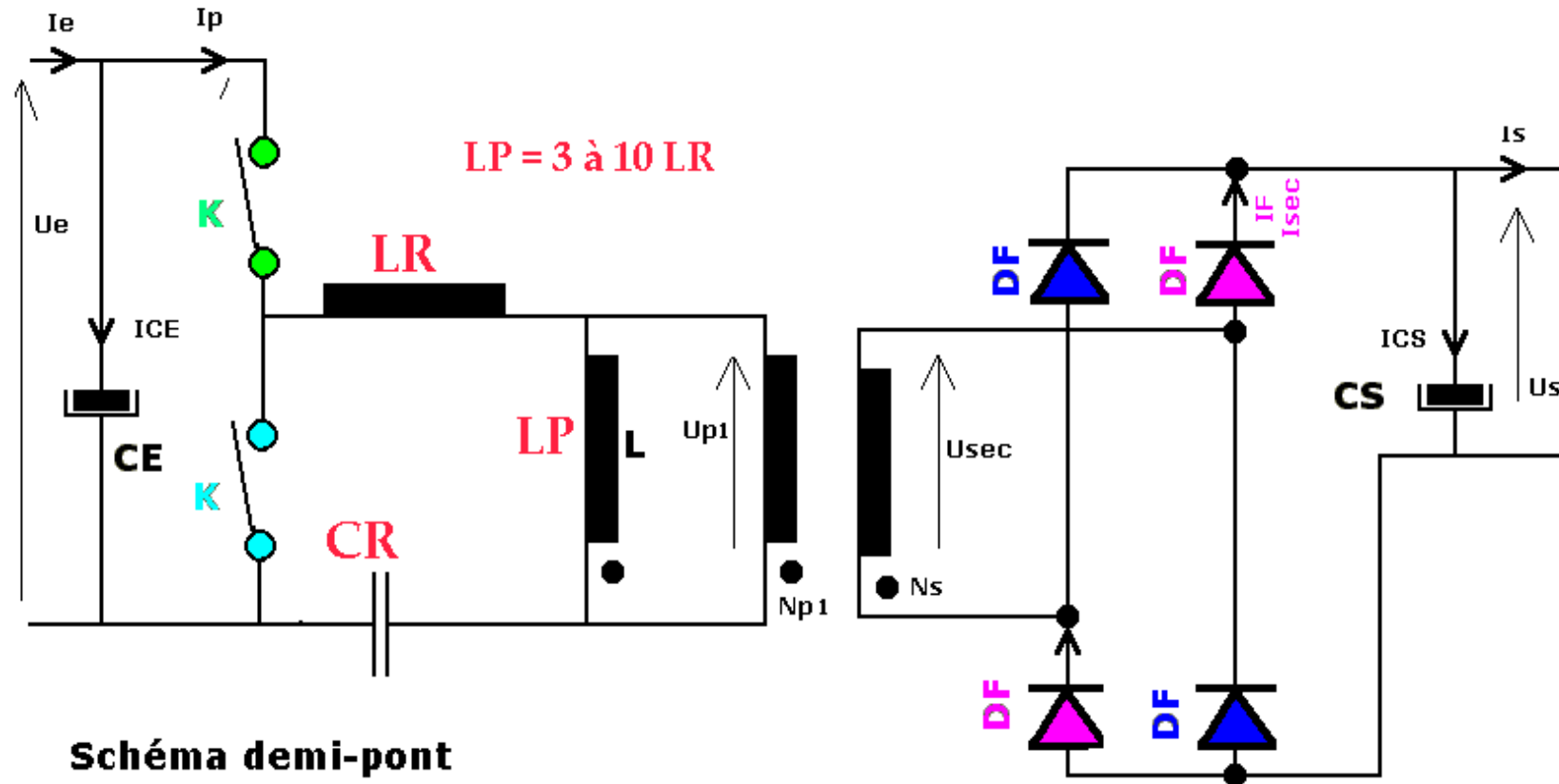


Schéma demi-pont

$U_{sec} = \text{environ } U_s$, $U_{VR_diode} = \text{environ } U_s$

Optimisation du transformateur

$$FR1 = 1/(2 \times \pi \times \text{Racine} (LR \times CR))$$

$$FR2 = 1/(2 \times \pi \times \text{Racine} ((LP + LR) \times CR)) \text{ Il existe 2 fréquences de résonance...}$$

LP peut être simplement réalisée en rajoutant un entrefer au transformateur.

Le LLC (Schéma avec redressement "va-et-vient"):

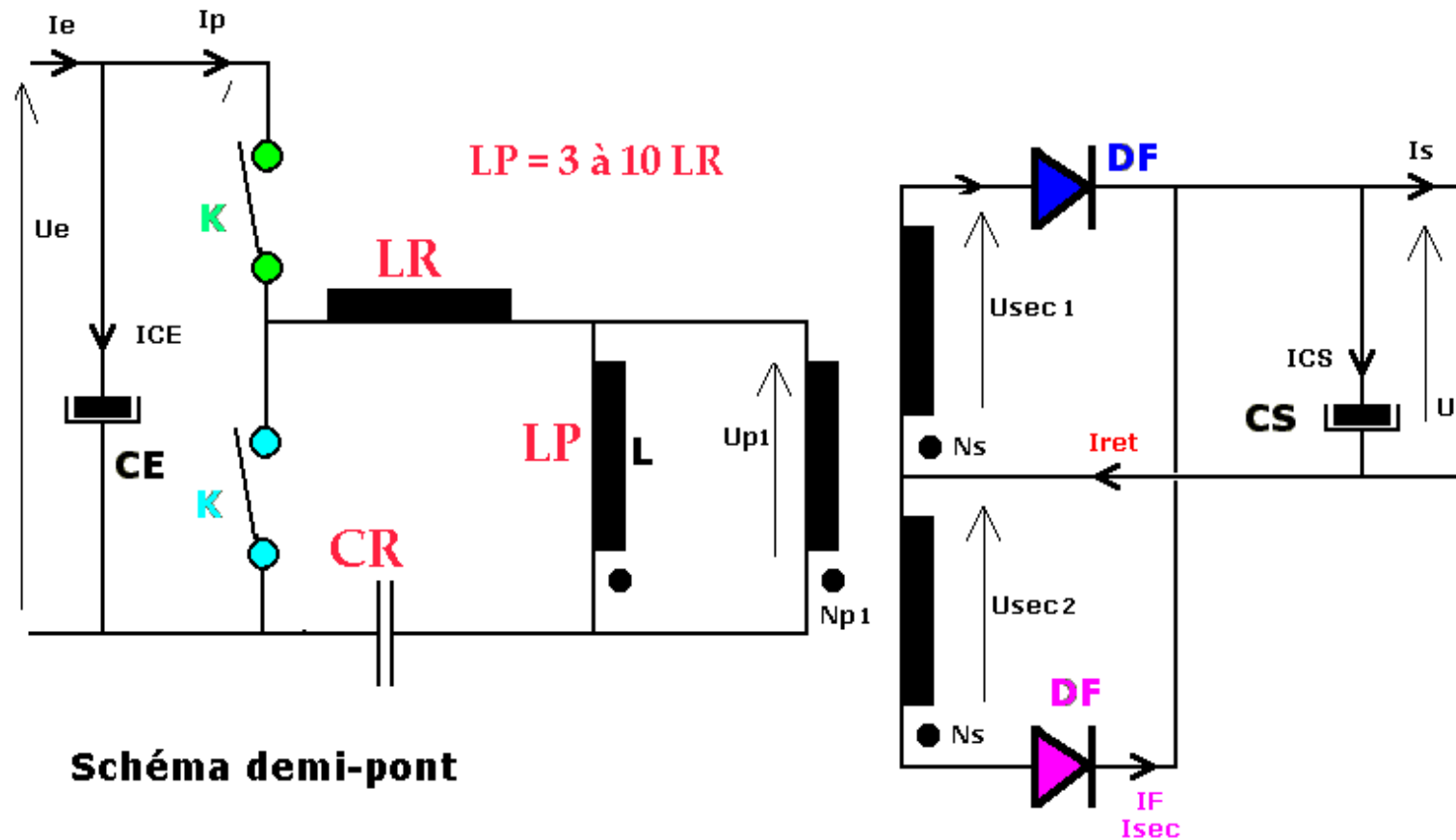


Schéma demi-pont

$U_{sec} = \text{environ } U_s$, $V_{R_diode} = \text{environ } 2 \times U_s$

$$FR1 = 1 / (2 \times \pi \times \text{Racine} (LR \times CR))$$

$$FR2 = 1 / (2 \times \pi \times \text{Racine} ((LP + LR) \times CR))$$

Il existe 2 fréquences de résonance...

LP peut être **simplement réalisée** en rajoutant un entrefer au transformateur. Mais attention à l'entrefer...

Le LLC (Schéma avec redressement "synchrone"):

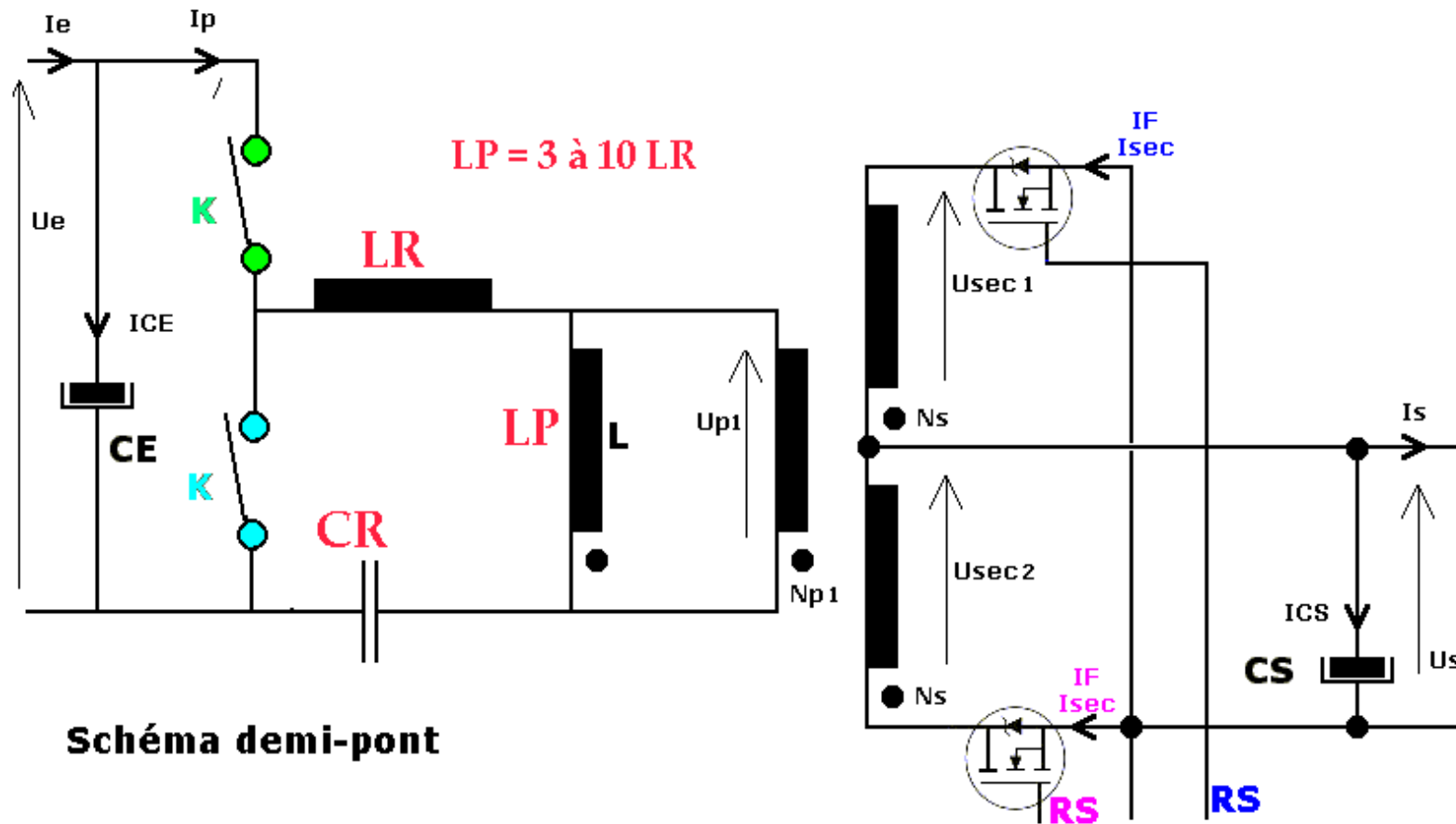


Schéma demi-pont

$U_{sec} = \text{environ } U_s$, $V_{Ds_Mofset} = \text{environ } 2 \times U_s$

$$FR1 = 1/(2 \times \pi \times \text{Racine} (LR \times CR))$$

$$FR2 = 1/(2 \times \pi \times \text{Racine} ((LP+ LR) \times CR)) \implies FR2/FR1 = (LR + LP)/LR$$

Optimisation du redressement contre Optimisation du transformateur car on ne peut pas faire facilement un redressement à 4 MOSFETS

Le LLC :

Fonctionnement : On change la fréquence de fonctionnement de la cellule LC et l'impédance du réseau résonnant change : cela permet de réguler !

la tension d'entrée est divisée entre l'impédance de la cellule LLC @ la fréquence de découpage et la valeur de l'impédance vue au secondaire et l'impédance de LP.

Si la fréquence très élevée ==> l'impédance de LR est très élevée ==> réduction de la tension et du courant disponible en sortie

Pour une topologie LLC , le gain en DC peut être supérieur à 1 (donc > à N_p/N_s) .

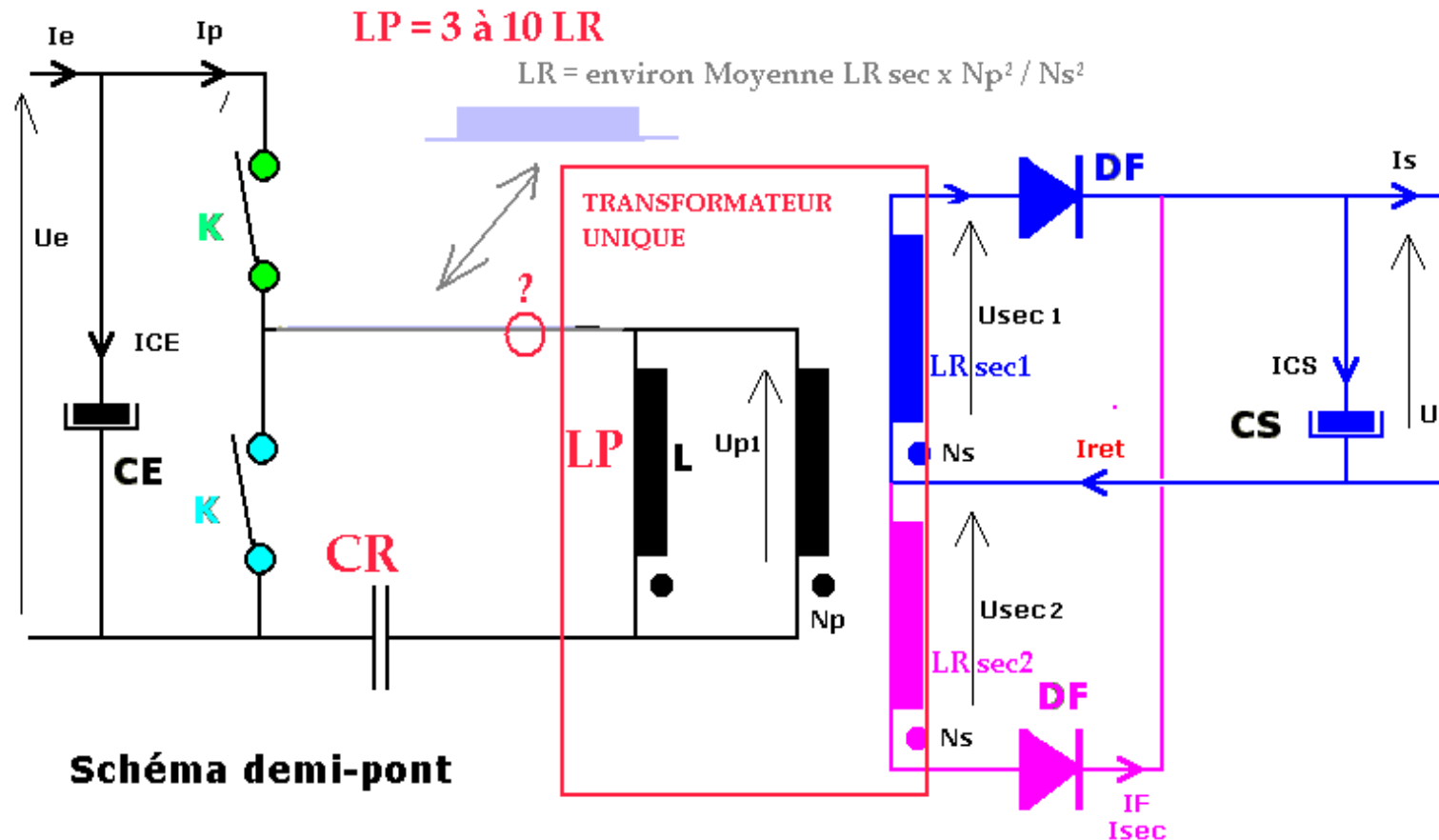
On obtient souvent des gains de 1,4 ... voire 2.

Il est aisément possible de réguler à faible charge en sortie et même à vide [sans charge en sortie].

Il est aisément possible de réguler de grandes plages de tension d'entrée et de sortie.

Il est facile de buter [mathématiquement] **les fréquences minimales et maximales de travail , cela simplifie les électroniques de commande et les DRIVES des semi-conducteurs ainsi que les validations !**

Le LLC :



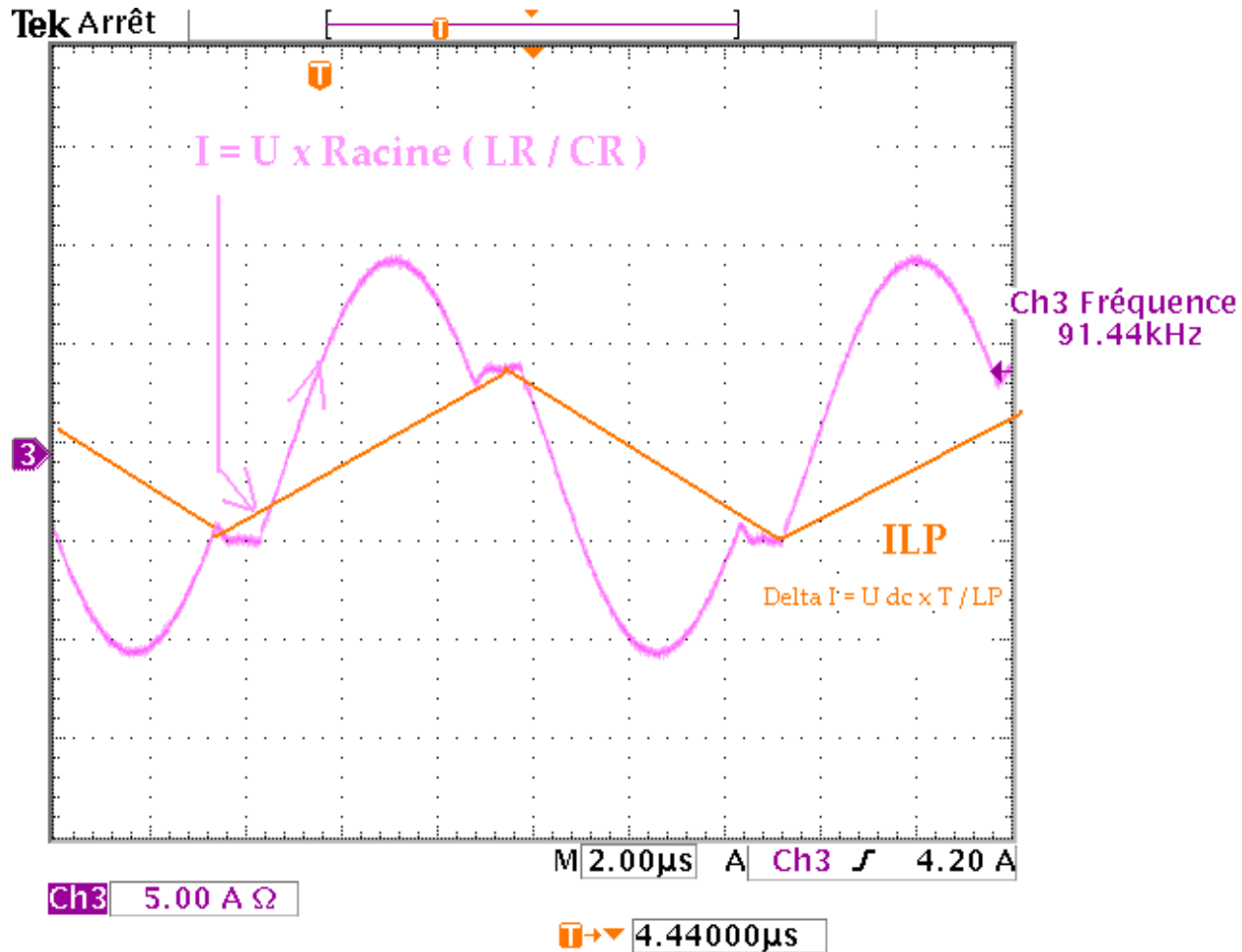
Lors de la réalisation d'un transformateur unique comportant l'inductance de résonance par le biais d'une inductance de fuite "importante" entre les secondaires et le primaire [et uniquement dans le cadre d'un redressement en va-et-vient], il existe une difficulté de réalisation **qui ne permet pas de garantir** que les 2 inductances de fuite (donc de résonance) soient identiques.

Par approximation , on calcule le LLC tel qu'un LLC après avoir ramené l'inductance de résonance au primaire.

Il faut accepter le fait qu'il puisse exister des différences importantes dans les courants , les maîtriser , les prévenir .. Bref , en tenir compte dans les dimensionnements et les calculs.

Le LLC :

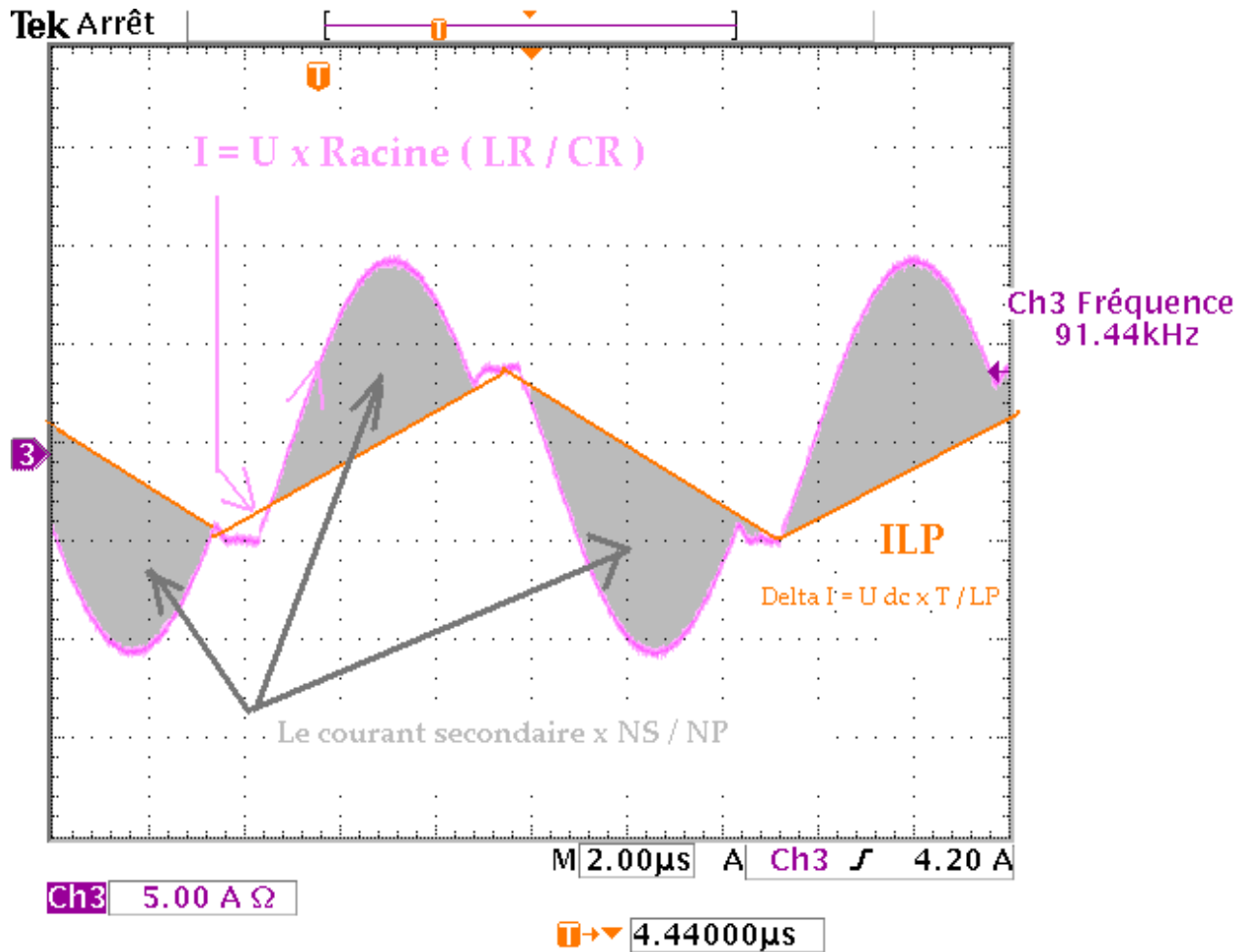
Les signaux :



En Rose : courant dans le primaire du transformateur = courant dans LR = courant dans CR

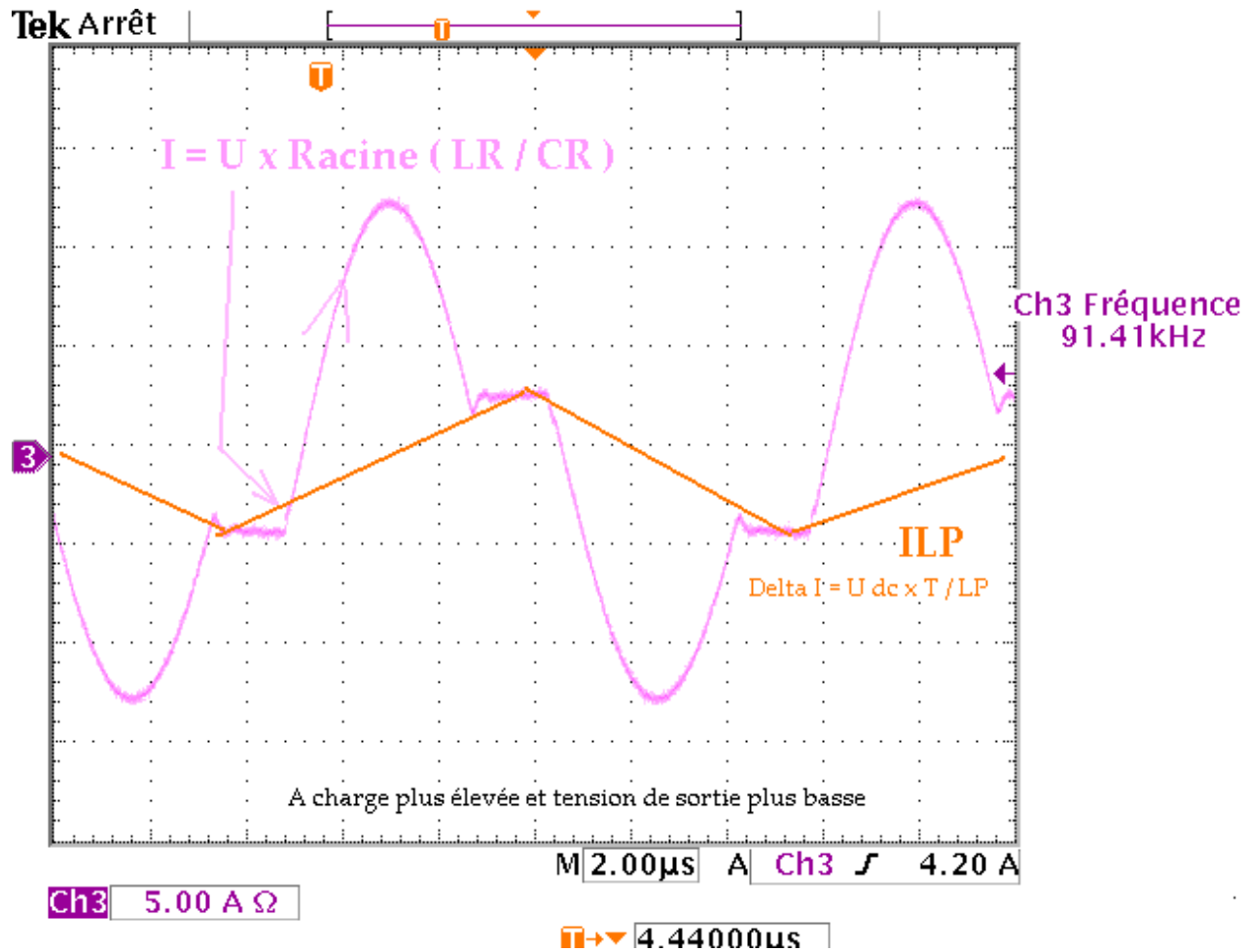
En Orange : le courant magnétisant dans LP

Composition du courant :



Le courant est la superposition du courant magnétisant de LP et du courant secondaire redressé ramené au primaire

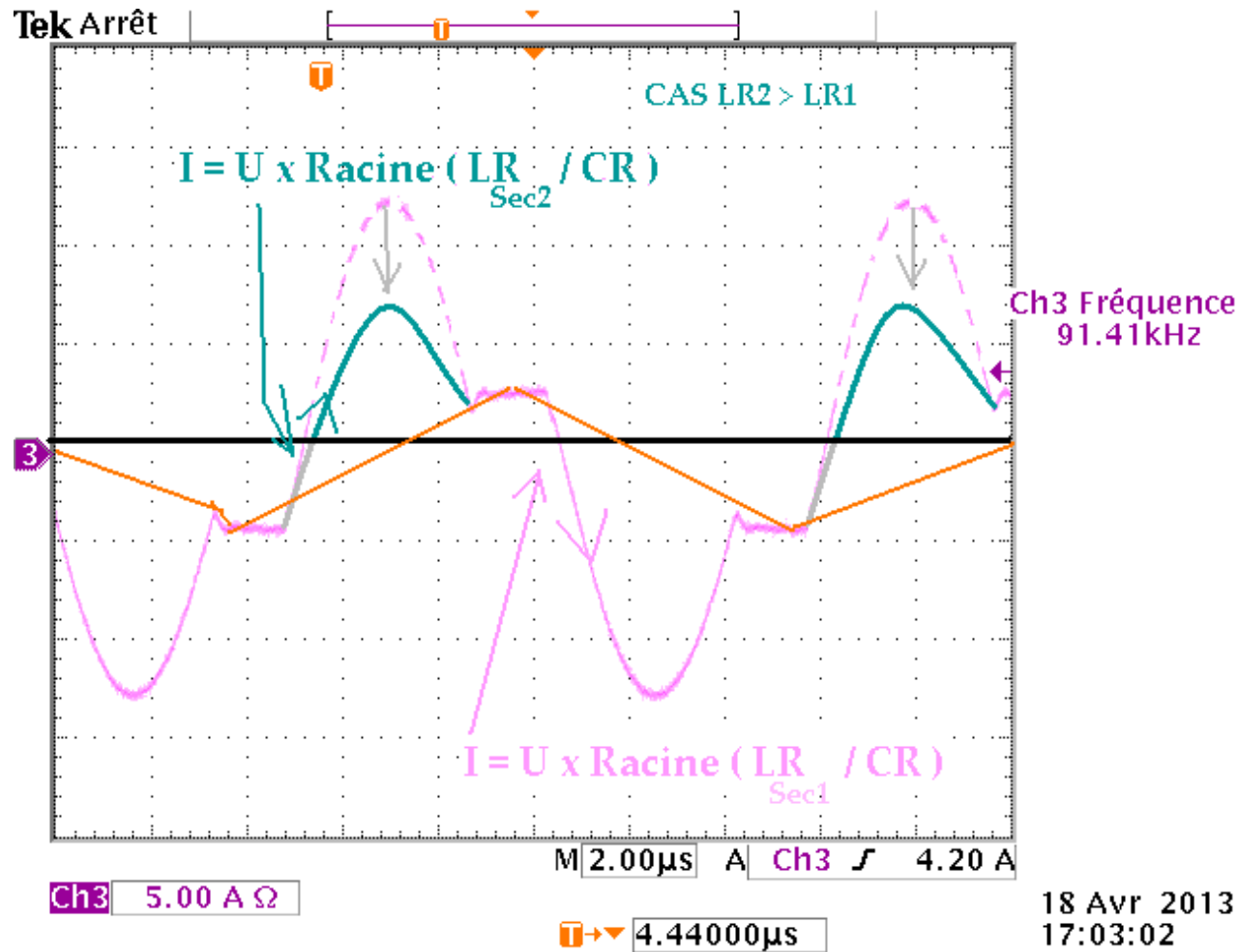
Les signaux avec courant plus important et tension plus basse en sortie:



En Rose : courant dans le primaire du transformateur = courant dans LR = courant dans CR

En Orange : le courant magnétisant dans LP

Le LLC :



En Rose : courant dans le primaire du transformateur = courant dans LR = courant dans CR

En Orange : le courant magnétisant dans LP

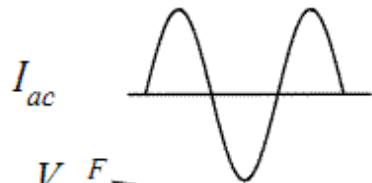
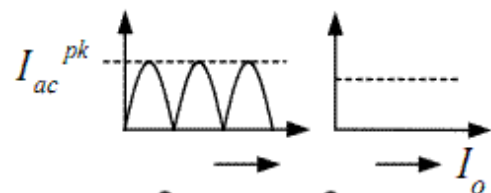
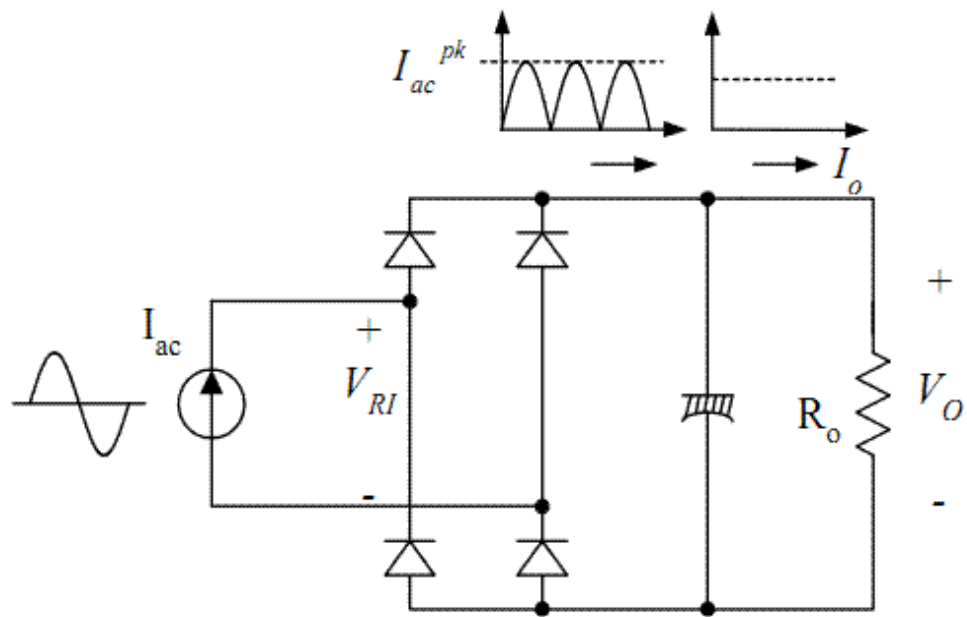
Les différences peuvent être très importantes si on néglige la construction du transformateur !!!

Le LLC :

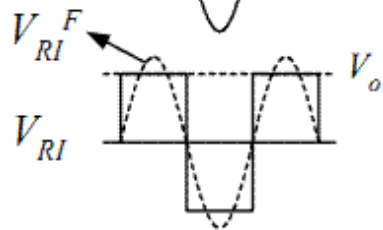
Petite mathématique:

Les signaux relevés pour un LC ou LLC ou LLLC sont d'allures exponentielles , néanmoins , pour la simplification des calculs on applique une mathématique approchée avec des formes sinusoïdales

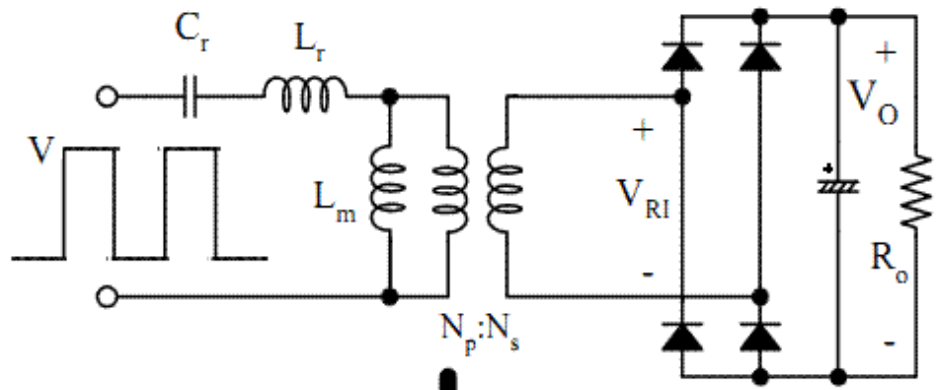
Malheureusement , celle méthode d'approche plus aisée peut donner des erreurs entre la théorie simplifiée et la pratique supérieures à 30 % Et même plus dans le cadre d'un convertisseur LLLC très déséquilibré !!!



$$I_{ac} = \frac{\pi \cdot I_o}{2} \sin(\omega t)$$

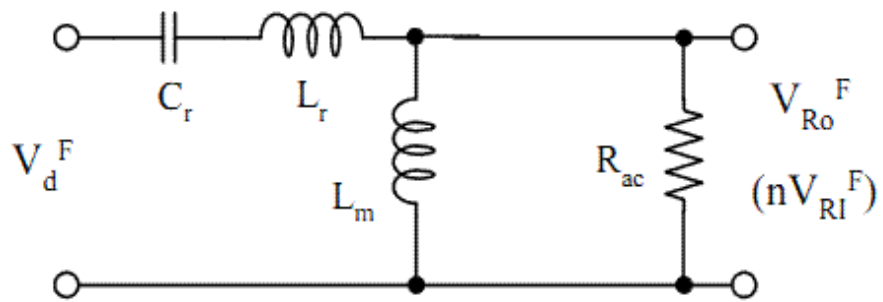


$$V_{RI}^F = \frac{4V_o}{\pi} \sin(\omega t)$$



$$n = N_p / N_s$$

$$R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o$$



$$M = \frac{V_{RO}^F}{V_d^F} = \frac{n \cdot V_{RI}^F}{V_d^F} = \frac{4n \cdot V_o \sin(\omega t)}{\frac{4}{\pi} \frac{V_{in}}{2} \sin(\omega t)} = \frac{2n \cdot V_o}{V_{in}}$$

$$M = \left| \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 (m-1)}{\left(\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1\right) + j \frac{\omega}{\omega_o} \left(\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1\right) (m-1) Q} \right|$$

Avec :

$$L_p = L_m + L_r, \quad R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o, \quad m = \frac{L_p}{L_r}$$

$$Q = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \frac{1}{R_{ac}}, \quad \omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_p C_r}}$$

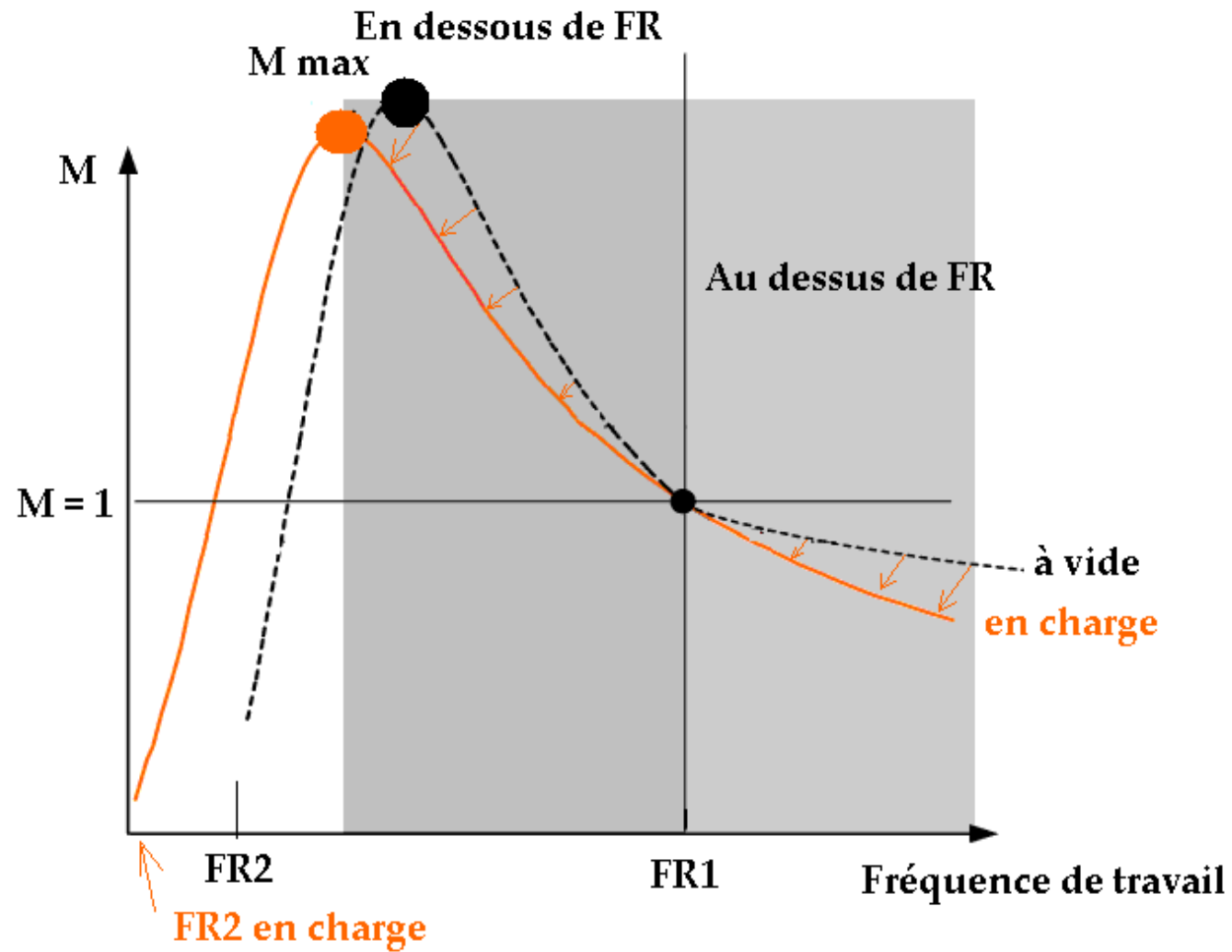
Avec $M = 1$ @ $F = Fr$: $\omega = \omega_o$

$$M = \frac{2n \cdot V_o}{V_{in}} = \frac{(m-1) \cdot \omega_p^2}{\omega_o^2 - \omega_p^2} = 1$$

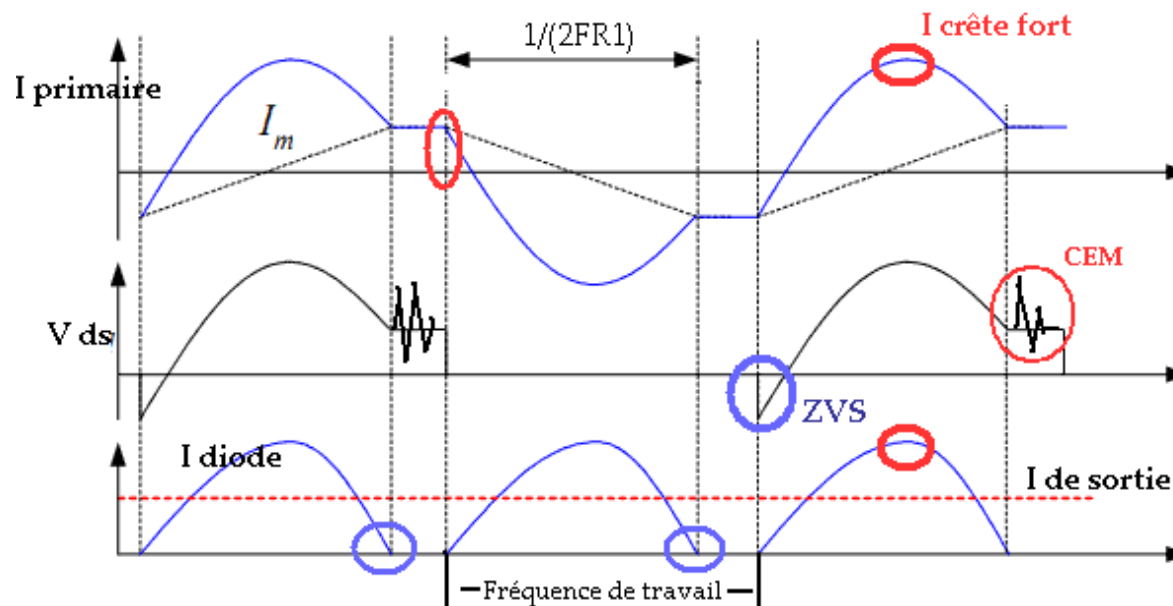
M est le gain DC .

Si on trace un petit bout du réseau de courbes , on obtient le graphe de M suivant :

Avec un exemple de courbe de travail en fréquence entre à vide et en charge :



Différences des signaux entre les modes de fonctionnement :

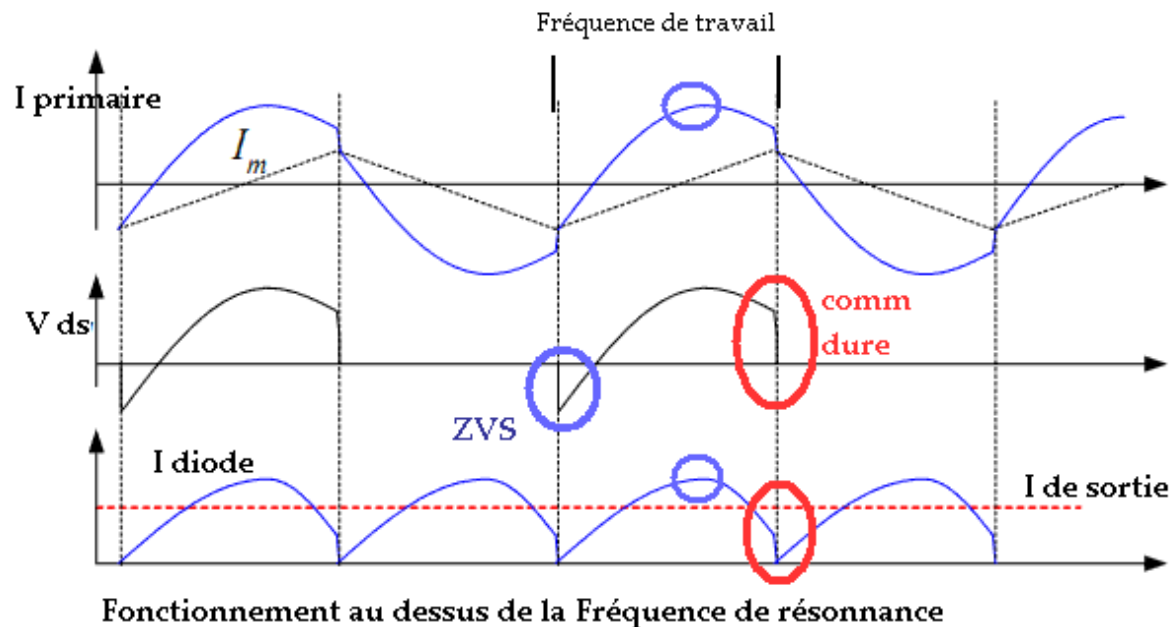


Fonctionnement en dessous de la Fréquence de résonance

Les points forts : Commutation douce ZVS des MOSFETS et des diodes du secondaire

Points faibles : courants crêtes plus élevés , petits soucis de CEM si montage LLC et non LLLC

Petite commutation OFF dure pour les MOSFETS du primaire



Les points forts : Commutation douce ZVS des MOSFETS , courants crêtes moins élevés , d'une manière générale : courants RMS moins élevés dans l'ensemble du montage , peu de soucis de CEM du moins au primaire

Points faibles :

Commutation OFF dure pour les MOSFETS du primaire plus conséquente qu'en dessous de FR

Commutation OFF dure pour les DIODES du secondaire qui nécessitent d'avoir un faible T_{rr} et un faible I_{rr}/Q_{rr} , ce qui pose un soucis de sélection et de guide de choix des MOSFETS en cas de redressement synchrone.

[photos et Vidéos]

RÉSUMÉ :

1 - La fréquence de travail d'un montage résonnant peut est variable dans une large plage.

2 - La plage habituelle de variation de la fréquence de travail pour un montage type LLC ou LLLC est souvent d'un rapport de 3 [attention aux performances des circuits de drive et de pilotage]

2a - Une grande plage de variation de la fréquence de travail est nécessaire entre un fonctionnement à vide et quelques % de charge.

2b - Il n'existe souvent (pour les calculs très optimisés) qu'une petite plage de variation de la fréquence de travail entre un fonctionnement de quelques % de charge à la puissance nominale .

2c - La loi de régulation n'est pas linéaire.

3 - Vu les spécificités d'utilisation des semi-conducteurs de puissance pour une topologie résonnante , IL FAUT s'assurer de bien s'orienter vers des références adaptées et de les conserver au cours des productions (attention aux "faux-amis équivalents ").

Voir Spec IRFP 31N50L et 32N50

4 - Attention aux condensateurs de sortie [après le redressement] , ils ont un courant RMS à supporter nettement supérieur que pour d'autres topologies pour la même puissance.

4a - Il est possible de réaliser des montages "enchevêtrés" par 2 ou 3 pour réduire d'une manière très importante les courants RMS dans les capacités d'entrée et de sortie.

ATTENTION :

Ne pas dépasser les spécifications techniques qui souvent sont complexes à maîtriser si on n'est pas du domaine des alimentations

Aux composants constituant utilisés (bobinages et condensateurs) qui sont des composants pouvant être d'usure (ce sont les pneus de l'électronique)

Maîtriser les sources d'approvisionnement de ces composants de manière à ne pas avoir de surprises en cours de productions

CONCLUSIONS

Les topologies dites "à résonance" permettent de réduire fortement les pertes par commutations

Il est donc possible de réaliser soit des convertisseurs d'alimentations avec un fort rendement , soit de travailler avec des fréquences très élevées et de réduire les dimensions et poids des alimentations de puissance.

La méthode de calcul est très complexe , il existe une difficulté dans le cadre d'un convertisseur LLC à transformateur intégrant "tout" les éléments magnétiques (LLLC) à "obtenir" un calcul valide et avantageux pour le transformateur et pour le système.

La topologie "transformateur unique" LLLC permet DE PLUS de supprimer le "seul" point chaud très perturbant en CEM .

Pour une alimentation "très optimisée" en volume et poids , il convient de réaliser chaque composant magnétique d'une manière indépendante pour optimiser chaque calcul et exploiter des matériaux adaptés à chaque besoin.

Le LLC ou LLLC est particulièrement très bien adapté pour réaliser en son secondaire un redressement Synchrone à MOSFET pour augmenter EN PLUS le rendement du système.

Il existe des composants de puissance spécifiques aux spécifications techniques travaillées pour la réalisation des alimentations de puissance résonnantes.