ANNEXE II

c, Circuit de démagnétisation du transformateur

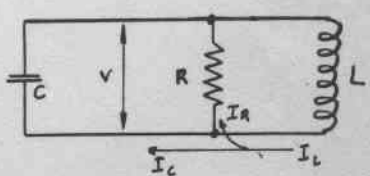
Ce circuit est constitué (fig. 9), par les éléments C_D R_D , D2 et D3, mais les éléments du circuit d'extinction et C_f participent aussi à la démagnétisation, tout au moins au début de celle-ci.

La démagnétisation a pour but d'offrir un chemin au courant qui doit continuer de circuler dans Lp, après l'ouverture de Th, courant dû à l'énergie magnétisante emmagasinée durant la période de conduction du thyristor. Plaçons nous donc au temps to, où le thyristor vient, juste de se bloquer, c'est-à-dire que le courant Ie, d'extinction est dans la phase croissante du 3ème temps décrit au paragraphe précédent, et sa valeur est égale et opposée au courant Ip. Ie se ferme alors par D4, et le courant Ip peut se poursuivre pendant le temps de la recharge de Cc, par Lc, Cc et Cf. C'est le courant I1 de la fig. 9, mais dès que Cc est rechargé, le courant Ip qui traversait la self Lc y a créé une énergie magnétisante, et Ip doit s'écouler pendant un certain temps dans Lp. Ce courant est le même, au début du cycle que celui qui circule dans L. En début de cycle, le courant dans Lc se boucle par D3, C_D , Lp, D1, mais au bout d'un certain temps, le courant I_p devient supérieur au courant dans Lc, à ce moment, la diode D2 commence à conduite et est traversée alors par la différence entre ILc et Ip.

Le courant ILc se boucle alors par D3, D 2 , D4.

Quant Th1 s'ouvre, l'inductance Lp qui se comportait comme un récepteur, se comporte alors comme un générateur, et le courant qui la traverse n'ayant pas changé de sens, c'est la tension à ses bornes qui s'inverse. Cette tension était $E = L\frac{di}{dt}$, et elle devient $- v = L\,\frac{di}{dt}$ car le courant décroit et $\frac{di}{dt}$ est négatif.

Ce circuit oscillant comporte une résistance shunt.



On a : $I_L = Ic + I_R$

avec $I_R = \frac{v}{R}$

et $Ic = C\,\frac{dv}{dt}$

d'où $I_L = \frac{v}{R} + C\,\frac{dv}{dt}$.

../..

Différencions cette solution par rapport au temps:

$$\frac{di}{dt} = \frac{dv}{dt}\frac{1}{R} + C\,\frac{d^2v}{dt^2}$$ dans laquelle $\frac{di}{dt}$

vaut, d'après $-v = L\,\frac{di}{dt}$:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{v}{L}$$

ce qui donne : $$0 = C\,\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{1}{R}\frac{dv}{dt} + \frac{v}{L}$$

soit : $$0 = RLC\,\frac{d^2v}{dt^2} + L\,\frac{dv}{dt} + R.\,v$$

La forme de la solution sera identique à celle que nous avons trouvé, avec néanmoins $\alpha = -\frac{1}{RC}$, et

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R^2LC} - \frac{1}{4R^4C^2}} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC}\right)^2}$$

$$v = V_0 + e^{-\alpha t}\left(A\cos\omega_0 t - B\sin\omega_0 t\right)$$

avec, pour $t = 0$: $v = Vo$

$$v = Vo + 1.\,(A.1 - B.0) \text{ d'où } A = 0$$

et $$v = Vo - Be^{-\alpha t}\sin\omega_0 t \qquad (3)$$

Si nous considérons la valeur de ω_0, nous constatons qu'elle est particulièrement faible, étant donné que C, qui apparait deux fois est très élevé (370 μF).

En conséquence, la période $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ sera longue, et dans un intervalle de temps t réduit devant T, la tension v n'aura presque pas bougée.

Si nous supposons la tension v quasiment constante, on peut dire:

- d'une part que le courant traversant la résistance est constant,

- d'autre part que le courant traversant la self décroît linéairement de Ip à une valeur i, qui dépend du temps t,

- enfin, que le courant dans la capacité suit le courant I_L, à une constante I_R près.

../..

Il est évident, puisque $I_R = \frac{Vo}{R}$ que plus Vo est faible, plis I_R est faible.

A la limite, lorsque Vo est nul, c'est-à-dire au démarrage du convertisseur, le courant dans R est nul, et $I_c = I_L$. Si Vo est faible, I_R est faible, et la capacité accumule des charges.

La quantité d'électricité perdue par la capacité pendant le temps t1 de conduction du thyristor est $q_1 = I_1 t_1 = \frac{V_o}{R} t_1$

La quantité d'électricité libérée par la self Lp pendant le temps de blocage du thyristor sera, si Ip est l'intensité à l'instant de l'extinction de Th, i_r l'intensité à l'instant du réamorçage de Th et t2, le temps qui s'est écoulé entre ces deux instants, on a :

$$q1 = \frac{(i_r + Ip)}{2} t2.$$

et la quantité q2 reçu par la capacité sera :

$$q2 = \frac{(i_r + Ip)}{2} t2 - \frac{Vo}{R} t2$$

Le montage sera équilibré lorsque les quantités q2 et q1 seront égales:

$$q\,1 = q\,2$$

$$\frac{(i_r + Ip)}{2} t2 - \frac{Vo}{R} t2 = \frac{Vo}{R} t1$$

$$\frac{(i_r + Ip)}{2} t2 = \frac{Vo}{R} (t1 + t2)$$

d'où $$Vo = R. \frac{(i_r + Ip)}{2} \frac{t2}{(t1 + t2)}$$

L'intensité Ip est l'intensité à l'instant de l'ouverture de Th1. Elle dépend donc du temps de conduction t1 du th, et de la tension caténaire E ; $Ip = \frac{E.\ t1}{L}$, en supposant nul le courant initial; Ce cas se produit au démarrage du convertisseur. On a alors $Vo = R. \frac{Ip.}{2} \frac{t2}{(t1 + t2)}$

soit : $$Vo = \frac{R.\ E.\ t1.t2}{L.2\ (t1 + t2)}$$

En régime établi, le courant Ip ne s'annule pas. Donc i_R existe et vaut pour 1 période :

$$i_r = Ip - \frac{V_o . t_2}{L}$$

$$i_r = \frac{Et1}{L} - \frac{Vo}{L} t2 = \frac{1}{L} (Et1 - Vot2) \quad (4)$$

../..

ce qui donne

$$Vo = \frac{ERT}{L} . t1 + \frac{ERT}{L} t1 - Vo \frac{RT}{L} t2$$

avec $T = \frac{t2}{(t_1+t_2)}$

$$Vo (L + RT.t_2) = 2 ERT.t1$$

$$V_o = \frac{2 ERT.t1}{L + RT.t2} = \frac{2 ER \frac{t1.t2}{t1+t2}}{L + R \frac{t_2^2}{t_1+t_2}}$$

On voit que Vo est fonction de E, tension ligne, et des temps de conduction et de blocage du thyristor.

Considérons la valeur du courant résiduel i` :

on a $$i_r = \frac{E}{L} \left(t1 - \frac{2 R \frac{t1\ t2}{t1+t2}}{L + R \frac{t_2^2}{t1+t2}} t_2 \right)$$

Donc i_r, serait une fonction linéaire de E, mais nous avons vu à la fin du paragraphe sur l'extinction que le temps t1 de conduction est une fonction inverse de E : $t1 = \frac{k}{E}$

$$i_r = \frac{E}{L} . \frac{k}{E} \left(1 - \frac{2 R \frac{t_2^2}{t1+t2}}{L + R \frac{t_2^2}{t1 + t2}} \right)$$

Dans la paranthèse, R est très grand devant L. On peut donc négliger L, et il vient :

$$i_r = \frac{k}{L} \ (1 - 2)$$

iR ne dépend donc ni de E, ni de t1 / t2, en première approximation.

Ce courant i_r est le courant circulant encore dans la self primaire jusqe avant l'allumage du thyristor et est égal à l'èmplitude de la variation d'intensité pendant t1 : $\frac{Et1}{L}$, moins l'amplitude de l'intensité de démagnétisation $\frac{V_o}{L} t_2$

../..

Donc, après la première période, le courant max. (ou de pointe, effectivement absorbé) est, après la fin de la deuxième conduction de Th:

$$I\ max\ 2 = i_r + \frac{E.t1}{L}$$

La démagnétisation laisse circuler, après la fin de la deuxième période, un courant

$$i_r + \frac{E.t1}{L} - \frac{Vo.t2}{L}\text{ , c'est-à-dire } 2\ i_r$$

après le temps t1 de la 3ème période, le courant I max atteint

$$I\ max\ 3 = 2.I_r + \frac{E.t1}{L}$$

après la démagnétisation, c'est-à-dire à la fin de la 3ème période, le courant résiduel sera de 3 I_r, et ainsi de suite, I_r indiquant la valeur absolue du courant résiduel, c'est à dire celle que l'on mesure par rapport à l'origine. Mais le phénomène que nous allons expliquer intervient pour stabiliser le fonctionnement.

L'énergie emmagasinée dans le noyau pendant la croissance du courant est : w = id $\emptyset$, où d $\emptyset$ est la variation du flux, et i la variation de courant. Si l'on considère la courbe d'induction d'un noyau magnétique, que nous supposerons sans hystérésis (fig. 10), on constate, que lorsque i_r augmente, la variation d'intensité pendant la conduction de Th restant presque constante, l'augmentation de B et par conséquence de $\emptyset$ tend à diminuer, d'une période à la suivante, à cause de la saturation du noyau. Ceci signifie, que l'énergie stockée pendant une conduction par rapport à la précédente, diminue. Mais l'amplitude de la variation du courant de démagnétisation reste pratiquement constante, et est liée à Vo, donc l'énergie récupérée par la capacité reste pratiquement constante. En conséquence, après un certain nombre de périodes Imax atteint une valeur telle que l'énergie restituée égale l'énergie emmagasinée, c'est-à-dire que le courant résiduel i_r d'une période à l'autre tend vers 0. Il résulte de la relation (4) que

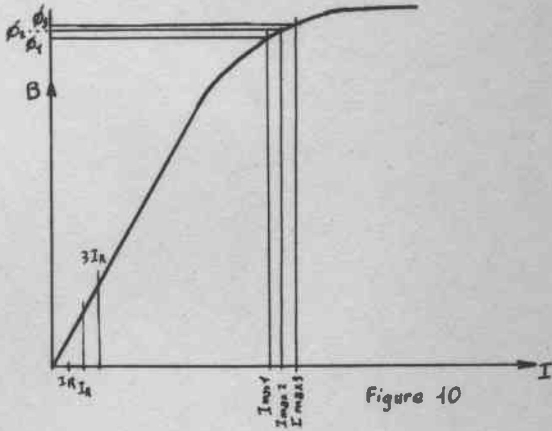


Figure 10

$$i_R = \frac{1}{L}\ (E.t1 - Vo.t_2) = 0.$$

$$\text{d'où } E.t_1 = Vo.t_2\ .$$

Autrement dit, si l'on prend une considération géométrique (fig. 11) on a les surfaces E.t1 et Vo.t2 qui sont égales, condition de stabilité de fonctionnement.

../..