

Comment ça marche ?

Les circuits réactifs (21)

L'adaptation (1)

Transformateurs inductifs

Par le radio-club F6KRK

Après avoir vu l'usage des circuits réactifs dans les filtres fréquentiels, nous allons aborder leur utilisation dans l'adaptation d'impédance en commençant par les transformateurs inductifs.

Adaptation d'impédance

On lit couramment que l'adaptation d'impédance consiste à faire en sorte que la source soit chargée par son impédance conjuguée, quelle que soit l'impédance de charge réelle. Si ceci n'est pas faux, c'est généraliser un cas très particulier par rapport au cas général que voici : L'adaptation d'impédance consiste à faire en sorte que la source soit chargée par son **impédance nominale de charge**, quelle que soit l'impédance de charge réelle ⁽¹⁾. Pour illustrer ceci, prenons un exemple avec une pile électrique de 1,5V de tension nominale. Sa f.é.m. est de 1,6V et son débit nominal (pour un maximum de rendement) est égal à 50mA pour avoir sa tension nominale de 1,5V. Sa résistance interne est donc de $(1,6-1,5) / 0,05 = 2 \Omega$ (loi d'Ohm). L'impédance nominale de charge est alors de $1,5 / 0,05 = 30 \Omega$ (à comparer aux 2 Ω de sa résistance interne) et le rendement est de $30 / (30+2) \approx 0,94$. Si l'on chargeait la pile par sa résistance interne, son rendement serait de 0,5 et on la détruirait par échauffement interne. C'est exactement le même cas avec une centrale électrique ou un émetteur HF ⁽²⁾. Un circuit d'adaptation d'impédance peut être modélisé par un quadripôle avec une fonction de transfert entrée/sortie G (et la fonction inverse $1/G$ pour sortie/entrée, car c'est un circuit passif). Si l'entrée est une charge Z_c , l'impédance Z_{im} ("im" pour "image") que le quadripôle présente à sa sortie est égale à $Z_c \times G$ ⁽³⁾. Voir la figure 1.

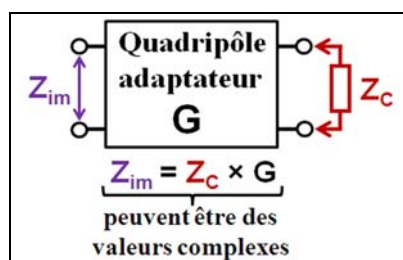


Figure 1

Nous commencerons l'étude des quadripôles adaptateurs par les transformateurs inductifs HF à large bande.

Transformateurs inductifs

On a déjà vu que si l'on s'arrange pour que le flux électromagnétique produit par une inductance traverse en totalité une autre inductance (coefficient de transfert K , dit "coefficient de couplage", égal à 1), la tension induite était proportionnelle à la racine carrée du rapport entre les inductances et le courant induit était proportionnel à la racine carrée du rapport inverse. Donc l'impédance image (induite) est proportionnelle au rapport des inductances. Tout ceci est explicité sur la figure 2.

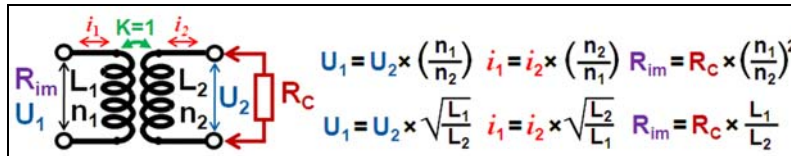


Figure 2

Les deux bobines couplées constituent un transformateur inductif. Il est en principe utilisé avec des charges résistives pures. Avec des charges réactives, son comportement est complexe et difficilement prévisible du fait de l'imperfection du composant fabriqué ($K < 1$, capacités parasites, pertes diverses, etc.).

La bande passante d'un transformateur inductif, en dehors des effets dus aux pertes dans le matériau utilisé pour obtenir un K proche de 1 et des capacités parasites, est limitée aux fréquences basses par la diminution du rapport X_{L2} / R_C et aux fréquences élevées par un K inférieur à 1. Voir sur la figure 3 un exemple de courbes de réponses en amplitude et en phase pour $R_C = 50\Omega$, $L_1 = L_2 = 100\mu\text{H}$ et $K = 0,9, 0,99$ et $0,999$ (transfo 1/1 sans pertes).

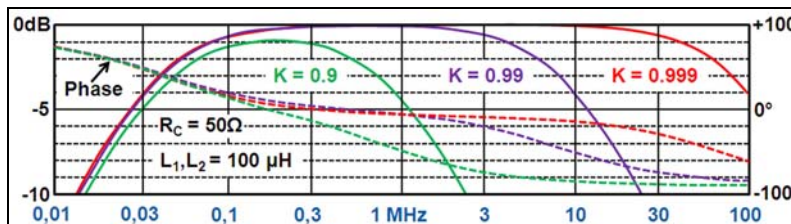


Figure 3

Noter qu'ici la source a une impédance interne égale à R_C . Ainsi pour $K = 0,9$, la diminution de 1 dB n'est pas due à une perte dans le transfo, mais à la diminution du rendement de la source ajoutée à une baisse de la puissance totale mise en jeu (elle double pour $F = 0$ et tend vers zéro quand F tend vers l'infini).

On remarquera que la variation de phase augmente rapidement bien avant la fréquence de coupure. *Grosso modo*, il faut un couplage de 0,999 pour avoir une variation inférieure à 10° sur une décade, à condition d'être à plus d'une décade de la fréquence de coupure basse (-3dB) et à une décade de la fréquence de coupure haute. Pour une bande passante à -1dB, le déphasage dans la bande atteint les 50° . Ceci veut dire qu'avec une charge réactive la transformation de la réactance varie beaucoup dans la bande. Ainsi, si l'on a un transfo large bande dans l'alimentation de l'antenne et que l'on ajuste celle-ci pour avoir un ROS de 1, en réalité l'antenne sera réactive. Et si l'on veut reproduire notre système antenne avec strictement la même antenne mais avec un autre transformateur (autre ferrite par ex.), on ne retrouvera sans doute pas notre ROS ⁽⁴⁾.

Self de fuite

K égal à 0,9 signifie que seulement 90% du flux E-M d'une bobine traverse l'autre. L'ensemble se comporte comme si seulement $9/10^{\text{ème}}$ de chaque inductance étaient couplés

avec un K de 1 et les $1/10^{\text{ème}}$ restants, pas couplés du tout. Nous obtenons le schéma équivalent de la figure 4.

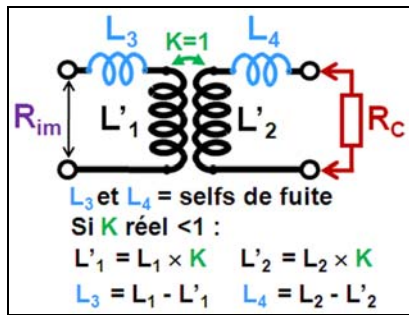


Figure 4

On appelle les parties des inductances non couplées "self de fuite". Ce sont elles qui sont responsables de la limitation de la bande passante côté fréquences élevées.

Autotransformateur

Reprenons le transformateur de la fig. 2 en connectant l'entrée et la sortie différemment comme montré sur la figure 5. Les points couleur cyan indiquent la référence de phase (à partir du point, les spires tournent dans le même sens).

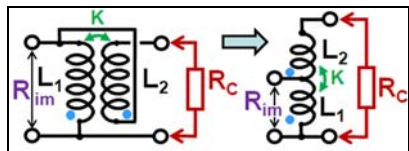


Figure 5

Noter que c'est le même composant physique, seule la manière de l'utiliser change. En redessinant le schéma on y voit plus explicitement un autotransformateur, c'est-à-dire que les inductances côté charge et côté source sont imbriquées. Avec $L_1 = L_2$, le transfo de la fig. 2 a un rapport de transformation en impédance de $1/1$ alors qu'il est de $4/1$ avec l'autotransformateur ⁽⁵⁾. En effet, l'inductance côté charge n'est pas égale à $L_1 + L_2$, mais à $(\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2})^2$ (Si K est très proche de 1), alors qu'elle reste égale à L_1 côté source ⁽⁶⁾.

Transfo parallèle, transfo série

Comme pour les circuits oscillants, il n'y a physiquement qu'un seul transformateur. C'est la manière de l'utiliser qui fait la différence. Tous les transfos que nous avons vus ici sont des transfos parallèles, même l'auto transfo. Dans ce type de transformateurs, la **tension** aux bornes de la charge est égale à la **tension** aux bornes de l'inductance qui est en **parallèle** avec elle. Il en va de même côté source. Il existe un autre montage où la **tension** aux bornes de la charge est proportionnelle au **courant** dans les inductances en **série** entre la source et la charge. Nous avons alors un transformateur série. Voir son schéma sur la figure 6.

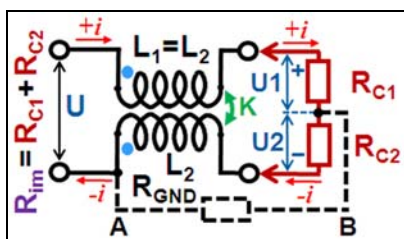


Figure 6

Le transformateur série est utilisé pour la symétrisation, soit en tension ($U_2 = -U_1$) avec $R_{GND} = 0$ et avec en général $R_{C1} = R_{C2}$, donc $L_1 = L_2$ ⁽⁷⁾, soit en courant, quelles que soient les valeurs de R_{C1} , R_{C2} et R_{GND} . Il constitue alors ce qu'on appelle couramment un "balun". Dans ce cas il est nécessaire que son rapport de transformation soit de 1, comme sur la fig. 6 ($L_1 = L_2$).

"Balun"

Le mot "Balun" est dérivé de l'anglais "BALanced-UNbalanced" que l'on pourrait traduire par "symétrique-asymétrique". Si ces propriétés concernent le courant, nous avons un "balun en courant" et si elles concernent la tension, nous avons un "balun en tension". Les deux fonctions peuvent être remplies avec un transfo parallèle connecté d'une façon particulière comme montré sur la figure 7.

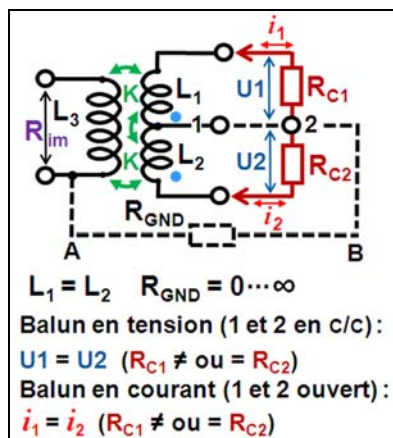


Figure 7

La fonction "balun" ne peut être réalisée que si $L_1 = L_2$, mais leur rapport avec L_3 peut être quelconque.

Si les points 1 et 2 sont reliés, nous obtenons un balun en tension, c'est-à-dire que $U_2 = -U_1$ même si les résistances R_{C1} et R_{C2} sont déséquilibrées.

Si les points 1 et 2 ne sont pas reliés, nous obtenons un balun en courant, c'est-à-dire que $i_2 = -i_1$ même si les résistances R_{C1} et R_{C2} sont déséquilibrées.

Tout cela reste vrai, quelle que soit la valeur de R_{GND} . On peut par exemple pour un système antennaire avoir la "terre secteur" au point A (fil de terre de l'émetteur) et la prise de terre du pylône au point B ⁽⁸⁾.

Avec le transformateur série de la fig. 6, on ne peut réaliser que des baluns en courant avec un rapport 1/1 ($R_{im} = R_c$).

Pour terminer, nous allons répertorier les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation des deux types de transformateurs dans le cadre d'une application antennaire en émission (dipôle).

Avantages du balun avec transfo parallèle :

- Isolation galvanique qui permet de ne pas se préoccuper des mises à la terre émetteur - antenne.
- Permet un rapport de transformation quelconque (on dépasse rarement 1/9).

Inconvénients du balun avec transfo parallèle :

- Isolation galvanique qui complique la protection contre la foudre et l'électricité statique.
- Difficile d'obtenir une bonne symétrie à cause des capacités primaire / secondaire.
- Difficile d'obtenir un K proche de 1.

- Encombrant et lourd car il doit être dimensionné pour la totalité de la puissance transmise.
- Bande passante limitée si l'on veut garder un ROS acceptable

Avantages du balun avec transfo série :

- Continuité galvanique qui permet de ne pas se préoccuper de l'électricité statique.
- Symétrie facile car indépendante des capacités primaire / secondaire.
- K quasiment égal à 1 en prenant un câble coaxial pour réaliser le couple primaire/secondaire ⁽⁹⁾.
- Très grande bande passante en symétrisation et quasiment apériodique en transmission (avec câble coaxial).
- N'a à supporter que la puissance de déséquilibre du dipôle. En effet, les champs primaire et secondaire s'annulent dans le transformateur (courants opposés).

Inconvénients du balun avec transfo série :

- Continuité galvanique qui oblige à avoir quasiment le même lieu de mise à la terre pour le secteur et pour le pylône ⁽¹⁰⁾. Sinon, on risque de faire circuler un courant à 50 Hz dans le câble coaxial.
- Rapport de transformation 1/1 obligatoire.

Dans le prochain "Comment ça marche", nous poursuivrons avec la conception des bobines et des transformateurs HF large bande.

La Rubrique "Comment ça marche ?" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Notes.

- 1) Si l'impédance nominale de charge de la source est égale à l'impédance conjuguée de son impédance interne, alors la définition courante se vérifie. Mais ce n'est qu'un cas particulier.
- 2) Sauf que l'émetteur est en général une source de courant. Mais c'est le même principe, il suffit de raisonner en courant. On conçoit facilement que le rendement est maximum quand la résistance interne de la source est nulle (source de tension parfaite) ou infinie (source de courant parfaite).
- 3) Il est alors vu par la source comme un dipôle d'impédance Z_{im} .
- 4) Mais si le transfo a beaucoup de pertes, tout s'arrange.
- 5) Il serait de 1/4 avec interversion de la source et de la charge.
- 6) On peut aussi raisonner en additionnant les nombres de spires de L_1 et de L_2 , sachant que l'inductance est proportionnelle au carré du nombre de spires si K est très proche de 1.
- 7) Dans le cas où l'on voudrait une symétrie de tension avec des charges différentes, il faudrait un rapport de transformation différent de 1/1 ($L_1 \neq L_2$). Par exemple si $R_{C1} = 2 \times R_{C2}$, alors $L_1 = 4 \times L_2$ et $R_{im} = 2 \times (R_{C1} + R_{C2})$. Mais $R_{im} = (R_{C1} + R_{C2})/2$ avec $R_{C1} = R_{C2}/2$ et $L_1 = L_2/4$.
- 8) Il peut y avoir une différence de tension (à 50Hz) allant jusqu'à une cinquantaine de volts. En tenir compte pour l'isolation galvanique du transfo.
- 9) Le K n'est réduit que par les fuites HF du câble coaxial.

10) Chez F5NB où la station est à plus de 30m de la prise de terre secteur, le problème a été résolu en insérant un disjoncteur différentiel dans l'alimentation de la station et en reliant la mise à la terre secteur de la station aux piquets de terre du pylône.