Echange de puissance entre un générateur et une charge

Application à un émetteur HF large bande

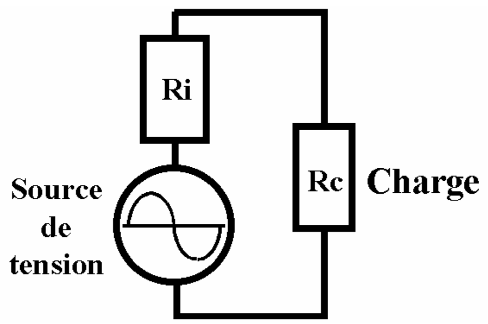
Robert BERRANGER, F5NB et Maurice CASSOU, F5JQO

Article publié dans Radio-REF de septembre 2003.

Nous savons que l'échange de puissance entre un générateur et une charge est maximum lorsque leurs impédances sont conjuguées. C'est à dire que leurs parties actives sont égales et leurs parties réactives sont complémentaires. Nous nous contenterons ici du cas général où le générateur a une impédance interne purement résistive. Nous regarderons la variation de puissance en fonction du rapport entre la résistance interne du générateur et la charge. Ensuite, nous déterminerons les conditions nécessaires au générateur pour vérifier cette variation. Enfin, nous verrons le cas où le générateur est un émetteur HF large bande.

Synoptique du circuit

Soit la figure 1 :



Démonstration mathématique

Par définition, une source de tension a une impédance nulle.
Soit U la tension constante de la source.
En appliquant la loi d'Ohm, nous pouvons calculer la puissance dans la charge égale à :

$Rc \times \left(\dfrac{U}{Ri + Rc}\right)^2$ (I = U/R et P = R.I²).

Cette équation de P en fonction de Rc peut aussi s'écrire :

$$P = U^2 \times \frac{Rc}{(Rc + Ri)^2}.$$

Etude de la fonction P avec Rc comme variable

Rc et Ri étant positifs, la fonction est positive dans tout l'intervalle. Elle s'annule pour Rc = 0 et Rc = ∞.

Sa dérivée est égale à : $\dfrac{dP}{dRc} = U^2 \times \dfrac{Ri - Rc}{(Ri + Rc)^3}$. Celle-ci est positive pour Rc < Ri et négative pour Rc > Ri. Elle s'annule pour Rc = Ri qui représente un maximum pour la fonction égal à :

$\frac{U^2}{4Ri}$. Elle tend vers zéro quand Rc tend vers l'infini. La fonction passe donc par un point d'inflexion lorsque sa dérivée seconde est nulle : $\frac{d^2P}{dRc^2} = 2U^2 \times \frac{Rc - 2Ri}{(Rc + Ri)^4} = 0$, soit Rc = 2Ri.

En ce point, la puissance est : $\frac{U^2}{4{,}5Ri}$

Nous avons l'allure de la courbe sur la figure 2.

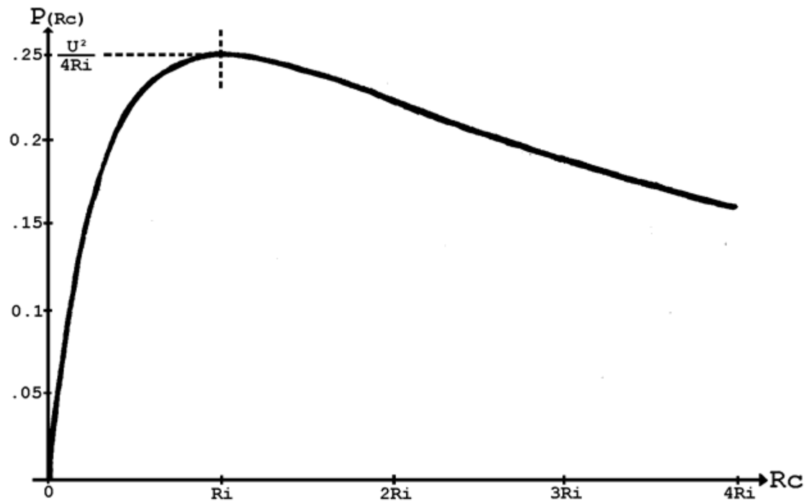


Figure 2

Charge constituée d'une impédance complexe

a) réactance en parallèle avec la résistance.
Nous calculerons d'abord l'impédance de l'ensemble puis nous déterminerons la tension à ses bornes avec la loi d'Ohm. Ensuite il n'y a plus qu'à faire P = U² / R pour trouver la puissance dissipée par la partie réelle (aucune puissance n'est dissipée par la partie réactive).

b) réactance en série avec la résistance.
Nous calculerons également l'impédance de l'ensemble, puis, toujours avec la loi d'Ohm, nous calculerons le courant circulant dans l'ensemble. Ensuite il suffit de faire P = R.I² pour avoir la puissance dissipée par la partie réelle.

N-B : *se rappeler que la valeur de la réactance étant dépendante de la fréquence, la puissance transmise le sera aussi.*

Impédance relative et ROS

Sur la figure 2, nous avons une échelle linéaire pour Rc. Il est intéressant de changer cette échelle en exprimant Rc en relation fractionnaire par rapport à Ri et par octaves.
Nous obtenons la figure 3.

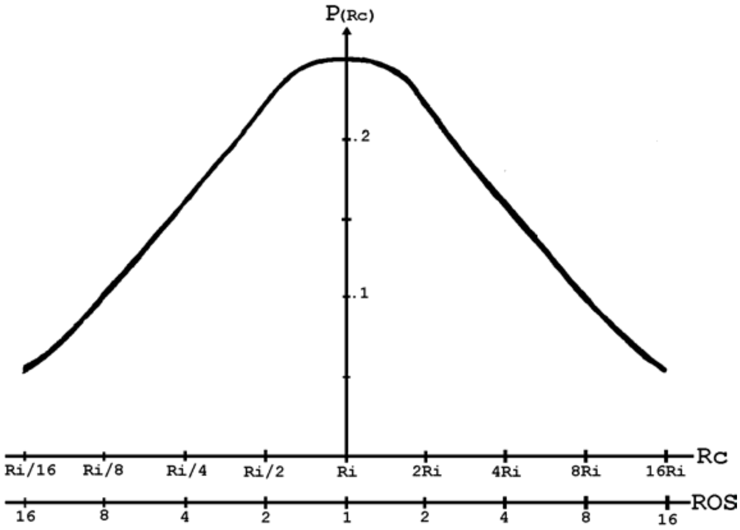


Figure 3

La courbe a maintenant une allure symétrique et nous remarquons que pour un même rapport en valeur absolue entre Ri et Rc, nous obtenons la même puissance, par exemple pour Rc/Ri = 2 et 0,5 (soit Ri/Rc = 2).
Ces points caractéristiques sont en fait deux points particuliers d'une désadaptation exprimée par un ROS (dans l'exemple ci-dessus, ROS = 2). Si la charge est complexe, il y a une infinité d'autres combinaisons qui donnent une puissance dissipée (par la partie réelle) de même valeur. Toutes ces combinaisons se trouvent sur le cercle de ROS constant sur l'abaque de Smith.
C'est pourquoi, sur la figure 3, nous avons également gradué l'échelle horizontale en fonction du ROS.

Caractéristiques du générateur

Considérons la figure 1. Nous prendrons le cas optimum où Rc = Ri . Nous nommerons U_0 la tension aux bornes de Rc et I_0 le courant traversant Rc. Nous obtenons $P(Rc) = U_0 \times I_0 = P_0$.
La tension de la source est alors égale à $2U_0$.
La puissance dans Ri est égale à P_0 (même courant et même résistance que Rc).
La source doit donc fournir $2P_0$, et en dissiper la moitié (rendement 50%).

a) cas où Rc tend vers l'infini .
   Dans ce cas, I(Rc) tend vers zéro, U(Rc) tend vers $2U_0$, P(Rc) tend vers zéro, P(source) tend vers zéro également, et le rendement tend vers 1 (ce qui ne veut pas dire grand chose quand la puissance fournie est nulle).
b) Cas où Rc tend vers zéro.
   Dans ce cas, U(Rc) tend vers zéro et I(Rc) tend vers $2I_0$. P(source) tend vers $2U_0 \times 2I_0$, soit $4P_0$, et le rendement tend vers zéro.

Nous voyons donc que, pour que la loi des puissances que nous avons démontrée ci-dessus puisse être appliquée intégralement, il faut que la source soit capable de fournir une tension double, un courant double et une puissance quadruple des valeurs nominales de la charge avec au mieux un rendement de 50% lorsque la charge est adaptée. A noter que ces 50% supposent que la source ait elle même un rendement de 100%, ce qui n'est jamais le cas. Pour augmenter le rendement tout en conservant une impédance de sortie égale à la charge, nous utiliserons une méthode pour obtenir une :

Impédance de source dynamique

Considérons le montage de la figure 4.

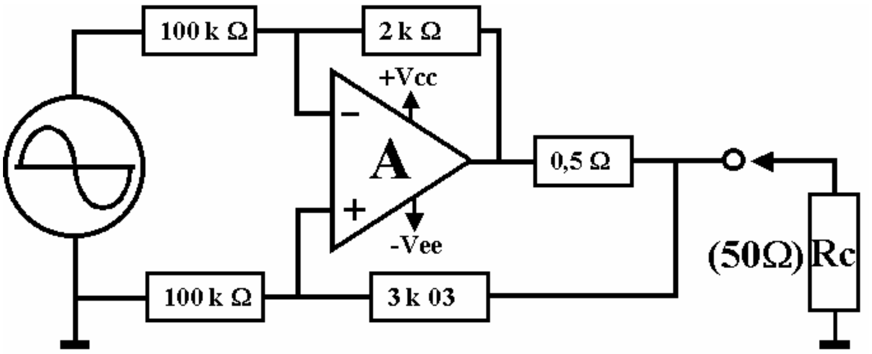


Figure 4

A est un ampli opérationnel presque parfait :
- Gain (boucle ouverte) > 10 000
- Résistances d'entrées > 10 MΩ
- courant maxi sortie = ±100mA (limiteur interne)
- tension maxi sortie = alim rail à rail
- composantes réactives négligeables à la fréquence de travail

Ce montage a une impédance de sortie de 50 Ohms. Injectons un signal de -1V et regardons la sortie :
- avec Rc = 50Ω, la tension de sortie sera de 1V et le courant de 20mA
- avec Rc = 0, la tension sera nulle et le courant de 40mA
- avec Rc = ∞, la tension sera de 2V et le courant nul.

Si nous conservons la totalité des marges sur la tension et le courant, ce montage n'aura pas plus de rendement que celui de la figure 1. Mais, si le rendement est primordial, comme dans les amplis de puissance, nous pourrons obtenir avec ce montage un rendement voisin de 1, tout en conservant une impédance de sortie de 50 Ohms. Naturellement, cela se paiera par ailleurs.

Par exemple, si Vcc = +5V et Vee = -5V, nous pourrons avoir aux bornes d'une résistance de charge de 50 Ohms, une tension C à C de ±4,95V avec un courant de ±99mA. Le rendement sera voisin de 98%. Bien sûr, ce rendement est à pondérer en fonction de la forme d'onde et de la classe de l'ampli de sortie (A, AB ou B) de l'ampli opérationnel.
Mais maintenant, si la charge s'écarte des 50 Ohms, en dessous, nous écrêterons en courant, et au dessus, nous écrêterons en tension. La puissance maxi disponible en fonction de la désadaptation aura la forme de la courbe A de la figure 5. Si nous ne voulons pas écrêter en cas de désadaptation, nous devrons utiliser un dispositif qui diminuera le niveau d'entrée en fonction de celle-ci (ALC).
Nous pouvons garder une petite marge pour la tension et le courant, sans perdre beaucoup sur le rendement (1) et permettre ainsi une certaine désadaptation sans écrêtage. Nous obtenons alors la courbe B de la figure 5.
A l'intérieur des marges, la loi sur le transfert de puissance s'applique intégralement, mais **elle ne s'applique plus en dehors**. Dans ce cas, la puissance disponible est légèrement supérieure à P_0 / ROS, ce terme étant compris ici comme « rapport de désadaptation ».

Si nous prenons une marge correspondant à un ROS de 1,5 (2), la puissance maximum pour un ROS de 1 est diminuée de 1,2 dB (différence entre les courbes A et B). Pour un ROS supérieur à 1,5, il n'y a pas de différence entre les deux courbes.

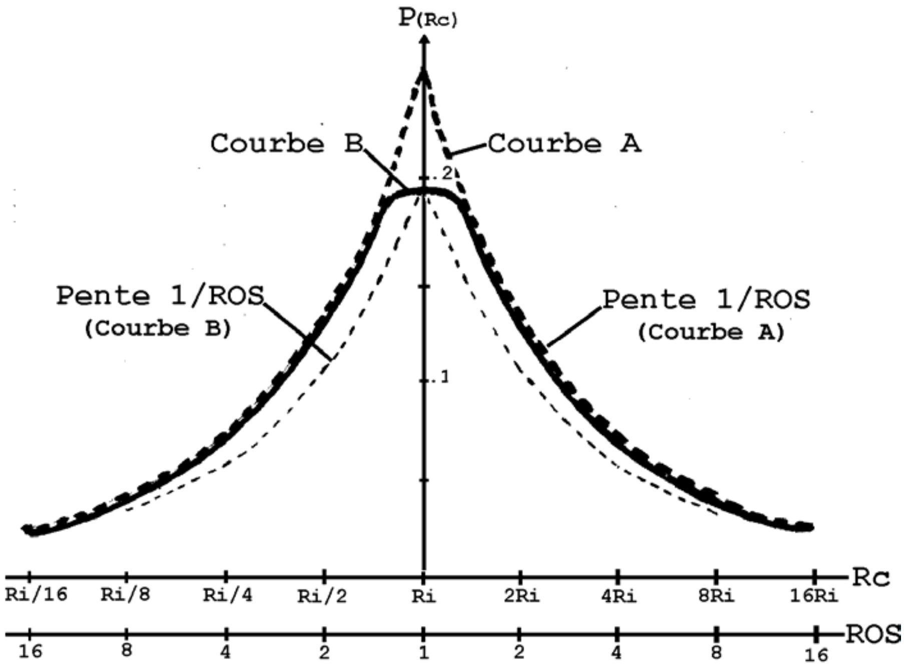


Figure 5

Cas de l'émetteur HF large bande

Pour plusieurs raisons, taille et poids du dissipateur, prix des transistors, dimensionnement de l'alimentation, les fabricants recherchent un rendement maximum. L'impédance de sortie des émetteurs est donc dynamique.

Les transistors étant des sources de courant, le procédé sera différent de celui de la figure 4. Tout d'abord, refaisons la figure 1 avec une source de courant. Nous obtenons la figure 6.

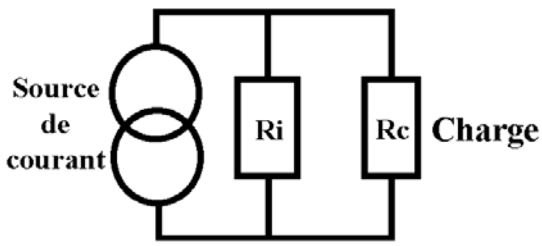


figure 6

Dans ce cas également, la puissance transmise sera maximum quand Rc = Ri. La source devra avoir des possibilités doubles en tension et en courant par rapport à ceux de la charge nominale, comme pour la source de tension.
N-B : *Par définition, une source de courant a une impédance infinie.*

Nous avons sur la figure 7, un modèle **très simplifié** d'un transistor amplificateur en émetteur commun, avec une résistance de contre-réaction (Rf) qui permet d'abaisser l'impédance de sortie.

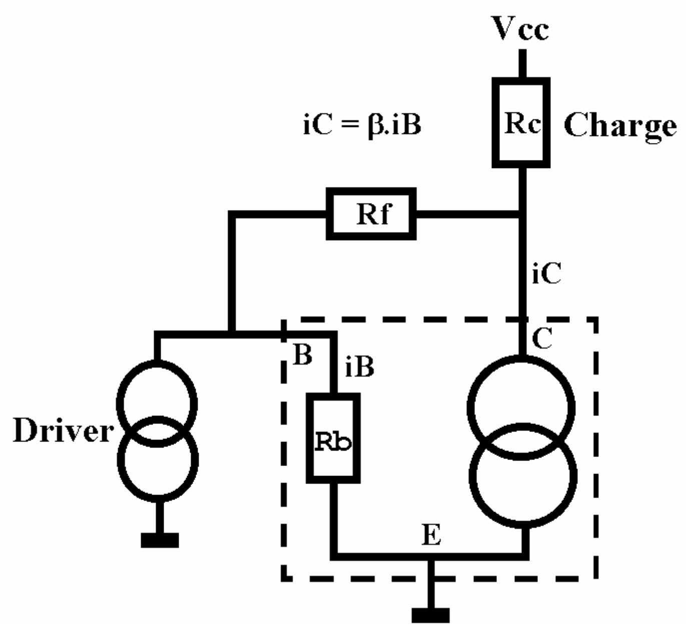


Figure 7

Ce montage est connu sous le nom de "transimpédance". Il est très utilisé dans les amplis RF intégrés "MMIC". L'impédance de sortie est fonction de β, de Rf et de tous les autres éléments parasites du transistor (Rb', Re, Rc, Rc', Cbe, Cce, Ccb, plus les selfs parasites…) et enfin, de l'impédance de sortie du driver. Nous voyons donc qu'il est difficile d'avoir une impédance constante dans une large bande de fréquence. De plus, dans un émetteur, nous avons intérêt à conserver un gain suffisant dans le P.A. pour ne pas dissiper une puissance importante dans le driver (puissance perdue). Donc, le dimensionnement de l'étage de sortie d'un émetteur HF large bande résultera d'un compromis, dans lequel l'impédance de sortie passera un peu au second plan. Ceci n'aura aucune conséquence pour des conditions normales d'utilisation comme les nôtres (nous avons rarement une autre station de puissance à moins de 50m).

Nous ne nous étendrons pas plus sur le sujet qui fera l'objet d'un autre article. Nous nous contenterons d'apporter une dernière précision en guise de conclusion :

Soit le cas général où nous avons un ROS-mètre, Zo = Zc nominale de l'ampli.
La lecture d'un ROS de 1 signifie que vous présentez une impédance nominale à l'ampli**. Elle ne signifie pas que vous êtes parfaitement adapté** à celui-ci. Par exemple, pour une fréquence particulière, l'ampli peut avoir une impédance de sortie composée d'une partie réelle de (2 x Zo) avec en parallèle, une capacité de (10 x Zo). Mais**, il ne faut pas essayer d'adapter** correctement la charge à l'impédance de l'ampli. Celui-ci est prévu pour être chargé par son **impédance nominale**. C'est comme cela qu'il fonctionne le mieux, en particulier, concernant la distorsion d'intermodulation. En dehors de cette impédance nominale, si l'on cherche à sortir la puissance maximum théorique, on **écrêtera** (mais en principe, l'ALC aura réduit la puissance).

F5JQO et F5NB.

Notes :

(1) Cette marge permet d'obtenir une bonne linéarité (minimum d'intermodulation) pour une charge nominale. Pour une désadaptation à la limite, la puissance sera très peu réduite

(–4% pour un ROS de 1,5), mais l'intermodulation augmentera. C'est pourquoi, nous avons toujours intérêt à charger un émetteur par son impédance nominale en utilisant un coupleur d'antenne, qui par ailleurs apporte un supplément de filtrage pour les harmoniques.

(2) Cette valeur permet d'accepter les imprécisions des boîtes d'accord automatiques qui ne garantissent qu'un ROS inférieur à 1,5.