Adaptation automatique de charge à 13,56 MHz

M. Doughan, J.P. Hayet, J. David, S. Lefeuvre

► To cite this version:

M. Doughan, J.P. Hayet, J. David, S. Lefeuvre. Adaptation automatique de charge à 13,56 MHz. Revue de Physique Appliquée, 1988, 23 (7), pp.1243-1248. 10.1051/rphysap:019880023070124300 . jpa-00245936

HAL Id: jpa-00245936

<https://hal.science/jpa-00245936>

Submitted on 1 Jan 1988

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
06.70T

Adaptation automatique de charge à 13,56 MHz

M. Doughan, J. P. Hayet, J. David et S. Lefeuve

E.N.S.E.E.I.H.T., Laboratoire des microondes, 2 rue Charles Camichel, 31071 Toulouse, France

(Reçu le 22 octobre 1987, accepté le 30 novembre 1987)

Résumé. — L'adaptation d'une impédance de charge à un générateur HF est effectuée par l'emploi d'un système automatique à capteurs amont/aval, piloté par un micro-ordinateur qui indique l'impédance de charge, calcule la valeur des éléments variables du quadripôle d'adaptation et vérifie la qualité de l'adaptation.

Abstract. — Matching a load to a RF generator is accomplished by an automatic system with two sensors, commanded by a micro-computer which indicates the value of the load, calculates the variable elements of the matching network and verifies the quality of matching.

Le chauffage HF est particulièrement intéressant quand les autres moyens de transfert d'énergie sont peu efficaces. Il possède des caractéristiques d'homogénéité, de rapidité, d'absence d'inertie et de spécificité.

Un ensemble de chauffage HF est constitué d'un générateur et d'un applicateur dans lequel se place le produit à chauffer (Fig. 1).

Pour que l'énergie électromagnétique émanant du générateur soit entièrement absorbée par le produit, il faut que l'applicateur soit adapté au générateur et en particulier lorsqu'on utilise des générateurs stabilisés en fréquence et non pas des autooscillateurs.

Electriquement, on peut considérer que l'applicateur et le produit constituent l'impédance de charge

Z_{ch} du générateur. Le problème revient donc à adapter rapidement à un générateur (ou à une ligne de transmission) une charge variable dans le temps.

1. Système d'adaptation automatique.

La solution proposée consiste à placer, entre le générateur et la charge, un dispositif automatique qui maintient une bonne adaptation et assure un transfert optimum de puissance entre le générateur stabilisé en fréquence et la charge.

Le système d'adaptation automatique envisagé est un système à capteurs amont/aval (Fig. 2).

Ce système permet :

— par son capteur amont, d'estimer la valeur de

Fig. 1. — Ensemble de chauffage HF.

[Assembly of an HF heating.]

Fig. 2. — Bloc synoptique du système d'adaptation à capteurs amont/aval.

[Block diagram of the matching system using two sensors.]

l'impédance de charge indépendamment du quadripôle d'adaptation ;

— et par son capteur aval, d'estimer la valeur de l'impédance d'entrée du quadripôle et de vérifier ainsi la qualité de l'adaptation.

Une désadaptation, décelée par le capteur aval, exigera la mesure de Z_{ch} par le capteur amont. L'estimation de Z_{ch} permettra de choisir la configuration adéquate du quadripôle d'adaptation et de calculer ses éléments variables (Fig. 3).

Fig. 3. — Organigramme du procédé d'adaptation.

[The flow chart of the matching process.]

Une telle procédure est tout à fait possible à l'aide d'un système uniquement à capteur aval mais, dans ce cas, l'estimation de Z_{ch} est dépendante du quadripôle (puisque'il s'agit d'un calcul de Z_{ch} et non pas d'une mesure), d'où des difficultés de convergence et des imprécisions dans la mesure de l'adaptation.

2. Quadripôle d'adaptation.

Les circuits d'adaptation monofréquence sont des structures simples en Gamma, Gamma inversé, Té ou Pi, n'utilisant que des selfs et des capacités. L'adaptation d'une charge variable nécessitera un quadripôle à deux éléments variables, ce qui est le minimum indispensable pour parer à toutes les éventualités pouvant se présenter en R_{ch} et X_{ch} . Les zones adaptables de ces différents circuits sont représentées sur la figure 4. Les réactances sont supposées variables de $-\infty$ à $+\infty$; les zones ainsi définies engloberont toutes les variations pratiques et limites correspondantes.

Le choix de la structure du quadripôle d'adaptation et de sa composition dépendent essentiellement du domaine d'évolution de la charge. Les éléments selfiques variables sont à éviter puisqu'ils sont difficiles à mettre en œuvre aux fréquences élevées et sont souvent source de dissipation d'énergie. On n'utilisera donc que des capacités variables.

Les générateurs haute fréquence de puissance utilisés pour les applications industrielles possèdent une impédance interne Z_g équivalente à une résistance ($R_g = 50 \Omega$; $X_g = 0 \Omega$). Il s'agit donc d'adapter à 50Ω une impédance de charge qui, dans notre cas, évolue dans un domaine à majeure partie reactif et situé dans la zone des éléments inférieurs à 50Ω . Le choix s'est fait sur un quadripole qui a une

Fig. 4. — Structures d'adaptation monofréquence et zones adaptables.
[The monofrequency matching structures and their matching zones.]

Fig. 5. — Quadripôle d'adaptation en Gamma du système.
[The Gamma matching quadrupole of the system.]

structure en Gamma composée d'une self fixe et de deux condensateurs variables (Fig. 5).

3. Capteurs ; mesure d'impédance.

Caractériser une impédance Z à la fréquence f , c'est donner la mesure de deux grandeurs physiques : le

rapport de la tension V au courant I (valeurs maximales) et leur déphasage.

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{|V|}{|I|} \cdot e^{j(\Phi_V - \Phi_I)} = |Z| \cdot e^{j\Phi_Z}.$$

Les capteurs amont et aval devront donc fournir des signaux représentatifs de la tension V et du courant I

parcourant les transitions coaxiales reliant le quadri-pôle d'adaptation d'une part au générateur et à la charge d'autre part. Ils sont constitués de deux sondes (Fig. 6) :

— une sonde de tension qui est un diviseur capacitif, réalisé en collant à l'intérieur du conducteur extérieur de la transition coaxiale un isolant métallisé de faible épaisseur. Elle fournit une tension sinusoïdale V_s proportionnelle à la tension V sur la transition coaxiale au point de prélèvement ;

$$\begin{aligned} V_s &= |V_s| \cdot \exp j(\omega t + \Phi_{V_s}) \\ &= K_V \cdot |V| \cdot \exp j(\omega t + \Phi_V + \Phi_{V_0}) ; \end{aligned}$$

— et une sonde de courant qui est une boucle installée dans un plan longitudinal, à l'intérieur de la transition coaxiale. Elle coupe un flux proportionnel au courant qui circule dans le conducteur central. Cette boucle capteur de flux fournit une force électromotrice E_s sinusoïdale, proportionnelle au courant I .

$$\begin{aligned} E_s &= |E_s| \cdot \exp j(\omega t + \Phi_{E_s}) \\ &= K_i \cdot |I| \cdot \exp j(\omega t + \Phi_I + \Phi_{I_0}) \end{aligned}$$

Fig. 6. — Sondes de tension et de courant.

[Sondes of tension and current.]

d'où :

$$\begin{aligned} |Z| &= \frac{K_i}{K_V} \cdot \frac{|V_s|}{|E_s|} \\ \Phi_Z &= (\Phi_{V_s} - \Phi_{E_s}) - (\Phi_{V_0} - \Phi_{I_0}) \end{aligned}$$

Fig. 7. — Montages de mesures de Z_{in} et de Z_{ch} .

[Circuit for measurements of Z_{in} and Z_{ch} .]

Φ_{V_0} et Φ_{I_0} étant les déphasages introduits par les sondes.

Le déphasage entre V_s et E_s est mesuré à l'aide d'un phasemètre. Une détection de crête permet de déterminer leurs valeurs crêtes après étalonnage du circuit détecteur. Quatre circuits détecteurs sont nécessaires pour l'estimation de $|Z_{in}|$ et de $|Z_{ch}|$. Chacun possède sa propre caractéristique. Un voltmètre programmable communique les tensions continues mesurées au microordinateur *via* un bus HP-IB (IEEE). Un scanner piloté par le microordinateur, grâce à une carte d'interface, assure les liaisons à tour de rôle entre les circuits de détection et le voltmètre selon les ordres reçus, qu'il s'agisse d'une mesure de Z_{ch} ou de Z_{in} (Fig. 7).

4. Circuit d'asservissement de position.

La commande des condensateurs variables est assurée par un circuit d'asservissement de position opérant sur un signal d'erreur. Il est constitué d'un comparateur, d'un préamplificateur et d'un amplificateur de puissance à deux étages push-pull montés en H. Une carte d'interface associée à un convertisseur numérique-analogique permet de connecter le circuit d'asservissement au bus HP-IB (Fig. 8).

Dans ce système d'adaptation, le microordinateur (ou l'unité de traitement) est la plaque tournante. Il prend les informations des capteurs, détermine les impédances, calcule et commande les condensateurs variables. Le montage du système conçu est représenté à la figure 9.

Fig. 9. — Montage du système d'adaptation automatique à capteurs amont/aval.

[Mounting of the automatic matching system with two sensors.]

Le temps maximal d'adaptation est de 7 s. En effet, il faut :

- 2 s pour la mesure et le calcul de Z_{in} ;
- 2 s pour la mesure et le calcul de Z_{ch} ;

Fig. 8. — Circuit d'asservissement de position.

[Servocontrol circuit.]

— et 3 s pour que le condensateur variable passe de sa valeur minimale à sa valeur maximale.

Le système a été testé pour l'adaptation à $50\ \Omega$ de quelques impédances de charge fixes à une fréquence f égale à 13,56 MHz, dont voici quelques résultats :

1) $Z_{\text{ch}} = (17,5 - j \cdot 23,84)\ \Omega$.

Imp. d'entrée mesurée avant l'adaptation :

$$R_{\text{in}} = 43,41\ \Omega ; \quad X_{\text{in}} = -20,24\ \Omega .$$

Imp. de charge mesurée :

$$R_{\text{ch}} = 13,19\ \Omega ; \quad X_{\text{ch}} = -28,29\ \Omega .$$

Adaptation :

$$C_1 = 401,72\ \text{pF} ; \quad C_2 = 118,27\ \text{pF} .$$

Imp. d'entrée mesurée après l'adaptation :

$$R_{\text{in}} = 49,66\ \Omega ; \quad X_{\text{in}} = 4,34\ \Omega .$$

2) $Z_{\text{ch}} = (11,9 - j \cdot 21,29)\ \Omega$.

Imp. d'entrée mesurée avant l'adaptation :

$$R_{\text{in}} = 1\ \Omega ; \quad X_{\text{in}} = 95,39\ \Omega .$$

Imp. de charge mesurée :

$$R_{\text{ch}} = 12,01\ \Omega ; \quad X_{\text{ch}} = -16\ \Omega .$$

Adaptation :

$$C_1 = 427\ \text{pF} ; \quad C_2 = 192\ \text{pF} .$$

Imp. d'entrée mesurée après l'adaptation :

$$R_{\text{in}} = 48,92\ \Omega ; \quad X_{\text{in}} = -1,62\ \Omega .$$