

Alimentations modulaires 50 W pour les constructeurs OEM.

Principalement destinées aux constructeurs OEM, les nouvelles alimentations modulaires 50 W de la série 65 000A de Hewlett-Packard se distinguent par leur encombrement réduit, leur faible poids et un MTBF établi de 100 000 heures. La gamme complète comprend huit modèles différents offrant une à six sorties continues combinables, 5, 12, 15 et 18 V. Destinées au marché international, elles peuvent être utilisées sur secteur alternatif 120 et 240 V, et sont conformes aux normes en vigueur en Europe et aux Etats-Unis, tant sur le plan de la sécurité que celui de l'émission d'interférences électromagnétiques. Elles sont également protégées contre les baisses de tension et disjonctables à distance. La particularité de ces alimentations ne réside pas seulement dans leurs performances exceptionnelles, mais également dans l'utilisation originale de TEC de puissance et d'une fréquence de découpage à 200 kHz qui contribuèrent grandement à la réalisation des objectifs fixés.

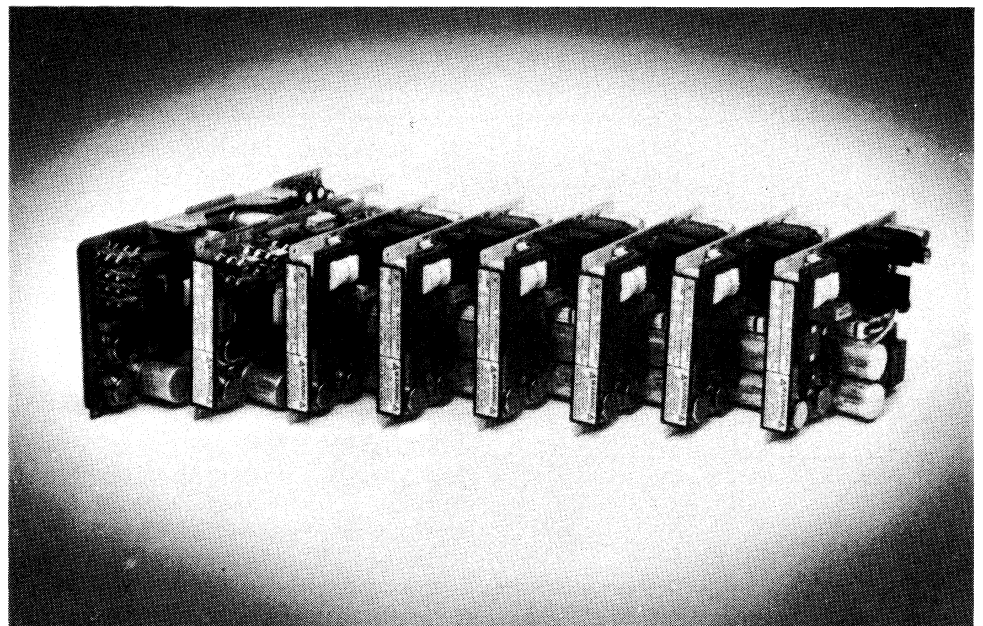
L'objectif

A l'heure actuelle, le marché de l'équipement électronique, que ce soit dans le domaine des ordinateurs, des télécommunications ou de l'instrumentation, est un marché à l'échelon mondial. Le but était donc de concevoir une alimentation suffisamment polyvalente pour pouvoir être utilisée n'importe où dans le monde. Au cours de l'étude préliminaire du projet, il s'avéra que le produit idéal devait répondre à quatre critères principaux : 1. être conforme aux normes internationales de sécurité et de limitation des interférences électromagnétiques, 2. être d'une taille et d'un poids aussi réduits que possible, 3. offrir un choix de tensions de sortie, et 4. être fiable. Enfin, une puissance de sortie de 50 W fut choisie à cause du grand nombre d'applications requérant cette puissance d'alimentation ou une puissance inférieure : modems, unités de disquettes, micro-ordinateurs, instruments de mesures, etc. Ces critères impliquaient la mise en œuvre de technologies hors des sentiers battus, permettant la réalisation du produit ainsi défini à un prix compétitif.

Plusieurs problèmes découlaient de ces exigences parfois difficiles à concilier. L'alimentation devait satisfaire aux normes de sécurité et de limitation des interférences de plusieurs pays dont les critères, d'un paramètre à l'autre, sont parfois très différents, sans pour cela sacrifier au poids et à l'encombrement. Les

alimentations devaient également offrir un choix de tensions de sortie de façon à répondre aux besoins d'applications très diverses et, là n'étant pas le moindre problème, ces alimentations devaient être extrêmement fiables. En fait, ces alimentations devaient être d'une fiabilité telle, que l'utilisateur final

La série des alimentations modulaires 65 000 A de H.P.



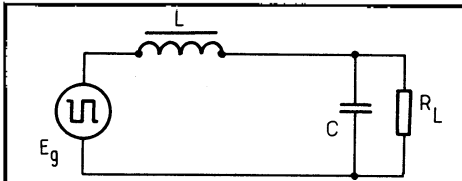
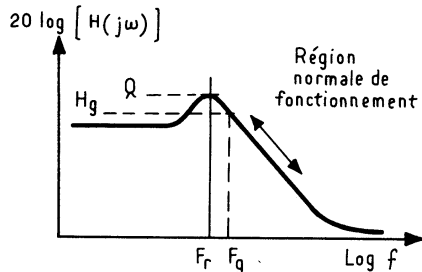


Fig. 1. - Circuit simplifié de la régulation en tension.



$$H(s) = \frac{1}{LCS^2 + \frac{LS}{RL} + 1} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{RL}{\omega_r L}$$

$$f_g = f_r \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$H_g = \frac{2Q^2}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \quad HQ = 2 \quad \frac{f_g}{f_r} = \sqrt{\frac{7}{8}} \approx 0,935$$

$$H_g = \frac{8}{\sqrt{15}} \approx 2,066$$

Fig. 2. - Fonction de transfert du circuit de la figure 1.

puisse être certain que le MTBF de son produit ne puisse être compromis par l'alimentation. Un MTBF de 100 000 heures a donc été retenu, et l'analyse du problème indiqua que cet objectif ne pourrait être atteint que si les circuits de l'alimentation utilisaient un minimum de composants parfaitement adaptés et fiables.

Etude du projet

Il y a bon nombre d'années que *Hewlett-Packard* conçoit et fabrique des alimentations à découpage, et les problèmes spécifiques à ce type

d'alimentation sont bien connus. Les ingénieurs d'étude ont estimé rapidement que les objectifs d'homologation internationale, de poids, de taille, de choix du nombre de sorties et de fiabilité ne pourraient pas être globalement satisfaits par une approche conventionnelle.

Les alimentations à découpage, malgré toutes leurs qualités, souffrent de défauts notoires. Elles peuvent produire un niveau totalement inacceptable d'interférences électromagnétiques, ne sont pas exceptionnellement fiables, leur temporisation est délicate (notamment à la mise sous et hors tension) et ont résisté à toutes les tentatives d'augmentation de leur fréquence de travail au-delà de 50 kHz.

Rien que pour permettre la réalisation d'une alimentation de taille aussi réduite que possible, une fréquence de découpage bien supérieure semblait nécessaire. Cependant, des transistors de commutation permettant d'envisager une fréquence excédant 50 kHz et des tensions de travail de l'ordre de 450 V n'étant pas disponibles, il fut décidé de s'orienter vers les MOSFET de puissance.

L'utilisation de TEC de puissance semblait être une excellente solution au problème de commutation en puissance. Les ingénieurs chargés de l'étude découvrirent cependant rapidement que la commutation n'était qu'une partie du problème découlant de l'utilisation d'une fréquence élevée. La fabrication de transformateurs répondant aux normes de sécurité en vigueur et ayant une inductance de fuite réduite dans un montage classique à modulation par largeur d'impulsion n'était pas un problème négligeable non plus. L'objectif étant d'utiliser une fréquence élevée, ce problème était d'autant plus difficile à résoudre que la réaction de fuite par élément croît en fonction de la racine

carrée de la fréquence dans le cas d'un circuit à dissipation thermique limitée.

Le seul espoir d'éliminer ces problèmes semblait être une technique de régulation réduisant l'importance de l'inductance de fuite.

Régulation en tension

La figure 1 illustre le principe de fonctionnement du circuit choisi. La source E_g est une tension rectangulaire fournie par des TEC de puissance. Etant donné que le circuit résonnant série se comporte comme un filtre passe-bas, les termes des harmoniques supérieurs peuvent être ignorés, et E_g peut être considéré comme une onde sinusoïdale.

La composante sinusoïdale fondamentale du signal rectangulaire est égale à la valeur crête du signal rectangulaire multipliée par 1,27. Par exemple, dans cette configuration, une source de signal rectangulaire ± 100 V devient une source sinusoïdale d'amplitude 127 V crête ayant une fréquence identique à la fréquence fondamentale de la source rectangulaire.

La fonction de transfert de ce circuit résonnant simple est indiquée sur la figure 2. Cette utilisation indique clairement que si la fréquence de la source f_g est toujours supérieure à f_r (la fréquence de résonance du circuit), la tension de sortie du circuit peut être contrôlée et régulée en faisant varier f_r .

Schéma de l'alimentation

La réalisation de ce circuit de régulation en tension est indiquée sur le schéma de la figure 3. Dans ce cas, le circuit travaille directement à partir du secteur 120 V ca, 60 Hz. La régulation de la tension continue de

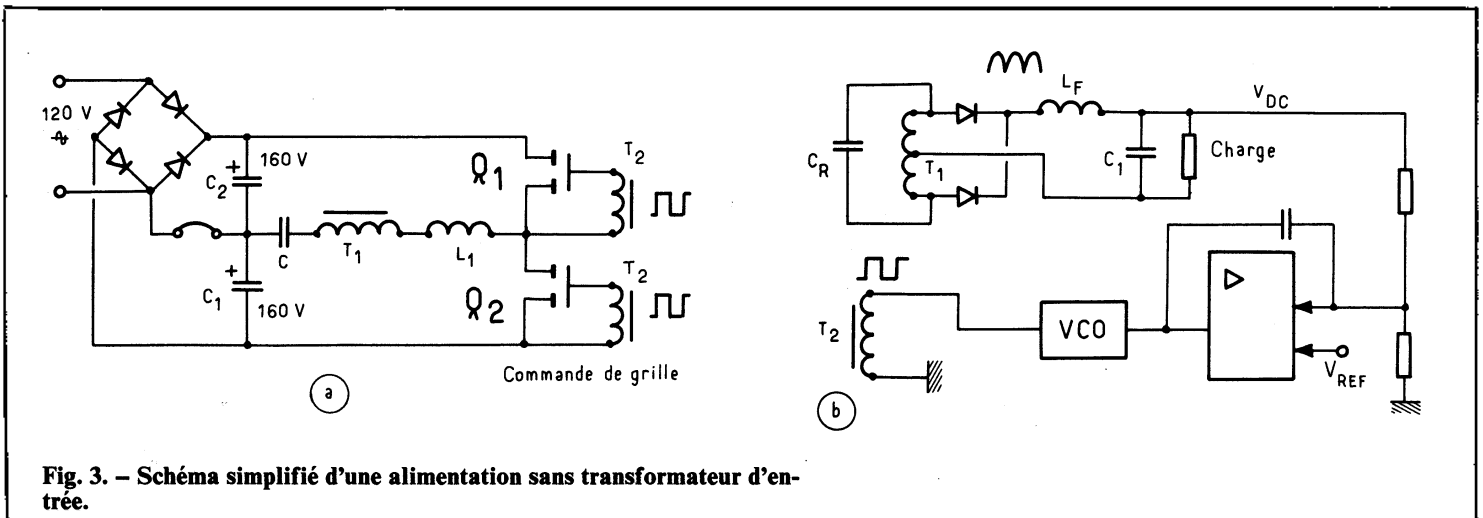


Fig. 3. - Schéma simplifié d'une alimentation sans transformateur d'entrée.

sortie après conversion du secteur alternatif en tension continue non régulée est effectuée selon la méthode de régulation définie à la figure 2.

Dans ce circuit, un pont de condensateurs est utilisé pour fournir 160 V cc à partir du secteur. Cette tension n'est pas régulée et son taux d'ondulation à 60 et 120 Hz est important. Les TEC de puissance Q_1 et Q_2 fournissent l'onde rectangulaire en commutant alternativement.

L'utilisation de transistors à effet de champ dans ce circuit n'est pas arbitraire. Les transistors bipolaires conventionnels poseraient un problème sérieux étant donné que leur temps de réponse rendrait la conduction simultanée de Q_1 et Q_2 certaine. Les modulateurs à large d'impulsion utilisés dans les alimentations à découpage classiques à 20 kHz sont conçus de telle façon qu'un temps mort assure que Q_1 et Q_2 soient tous deux bloqués pendant une certaine fraction du cycle. Ceci exclut la possibilité d'obtention d'une onde rectangulaire avec des transistors bipolaires, à moins de compliquer sérieusement le circuit d'attaque.

L_1 est une inductance résonnante assurant que la tension appliquée au transformateur T_1 est réellement sinusoïdale. Etant donné que le dv/dt appliqué au transformateur est significativement réduit par L_1 , le problème d'interférences électromagnétiques est fortement minimisé. Le condensateur d'arrêt C_b interdit toute circulation du continu dans T_1 . Le condensateur du circuit résonnant C_R est placé dans le secondaire de T_1 , ce positionnement de C_R mettant effectivement l'inductance de fuite de T_1 en série avec L_1 . Cette configuration destinée à contrecarrer l'inductance de fuite pose cependant un problème : le courant efficace d'ondulation dans le condensateur est pratiquement le même que celui du courant continu en sortie. Ce problème est étudié plus loin dans cet article. Pour l'instant, il suffit de savoir que des condensateurs adéquats furent développés et fabriqués à un coût raisonnable.

Les redresseurs D_1 et D_2 constituent un pont redresseur biphasé classique, le filtrage étant assuré par L_f et C_f . Dans ce montage, l'inductance est physiquement deux fois et demie plus petite que la self de filtrage équivalente d'un circuit modulé par largeur d'impulsion.

La tension continue filtrée en sortie est comparée à la tension de sortie requise (V_{ref}), amplifiée, et appliquée à l'oscillateur commandé en

tension dont le montage est inhabituel. Cet oscillateur est utilisé pour commander les TEC de puissance et pour réguler la tension de sortie. L'inductance contrôlant la fréquence du signal rectangulaire de l'oscillateur en faisant varier le courant à travers son bobinage est un composant magnétique tout à fait unique développé pour cette application. Cette technique fut choisie à cause de sa simplicité et de sa fiabilité, et parce qu'elle permettait de répondre aux normes internationales de sécurité.

Les caractéristiques rendant les circuits décrits ci-dessus particulièrement intéressants pour la réalisation de l'alimentation 65 000 A sont évidents :

1. La méthode de régulation est simple et fiable du fait de l'utilisation de techniques linéaires classiques et de l'élimination de circuits travaillant en modulation par variation de largeur d'impulsion dont la réalisation est plus complexe.

2. La limitation en courant est inhérente et aucun circuit spécial de protection n'est nécessaire. En fait, un court-circuit au niveau des redresseurs de sortie, des condensateurs du circuit résonnant ou du transformateur provoquera une baisse du courant des TEC de puissance.

3. Le fonctionnement à une fréquence élevée est facilement réalisable. Les alimentations de la série 65 000 A travaillent à une fréquence supérieure à 200 kHz permettant de répondre aux normes de sécurité actuelles.

4. La self de filtrage du circuit de sortie est deux fois et demie plus petite que la self d'une alimentation utilisant la modulation par largeur d'impulsions.

5. Les problèmes d'émission d'interférences électromagnétiques sont minimisés par le fait que tous les signaux au-delà de l'inductance résonnante L_1 sont sinusoïdaux.

6. La méthode de régulation est simple et permet l'utilisation d'un nombre réduit de composants d'où découle un MTBF établi très élevé (supérieur à 100 000 heures pour une alimentation à une seule sortie ayant subi des essais de durée de vie de 395 000 unités/heure).

L'inconvénient de ce circuit est qu'il requiert l'utilisation d'un composant magnétique supplémentaire (l'inductance résonnante L_1) et d'un condensateur spécial (C_R). Cependant ces désavantages sont largement compensés par la réduction notable de la taille de l'alimentation (par un facteur approchant 10/1) du

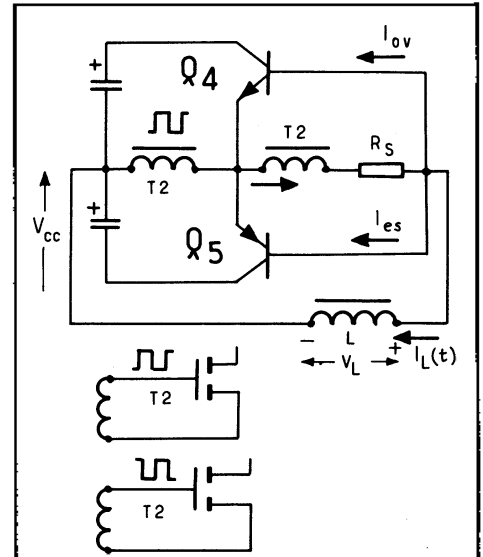


Fig. 4. - Oscillateur à courant élevé contrôlé par variation.

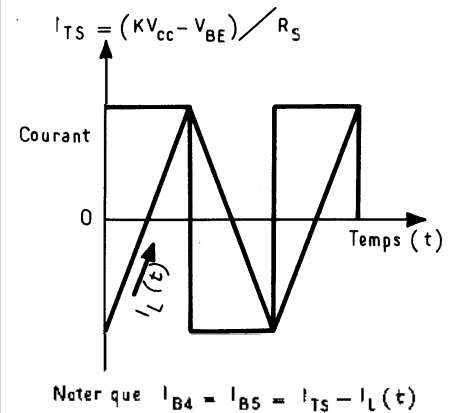


Fig. 5. - Relations courant/temps de l'oscillateur.

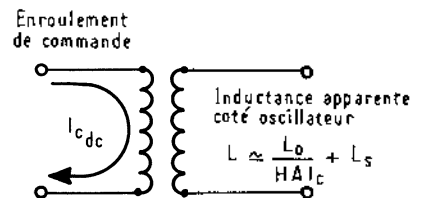


Fig. 6. - Schéma simplifié de l'inductance variable contrôlant l'oscillateur.

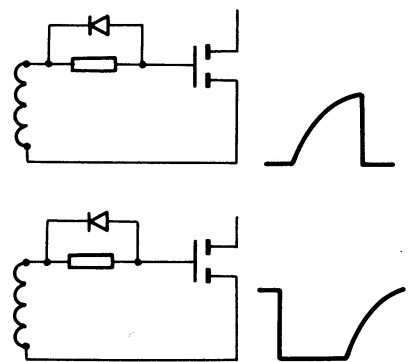


Fig. 7. - Circuit de commande des TEC de puissance.

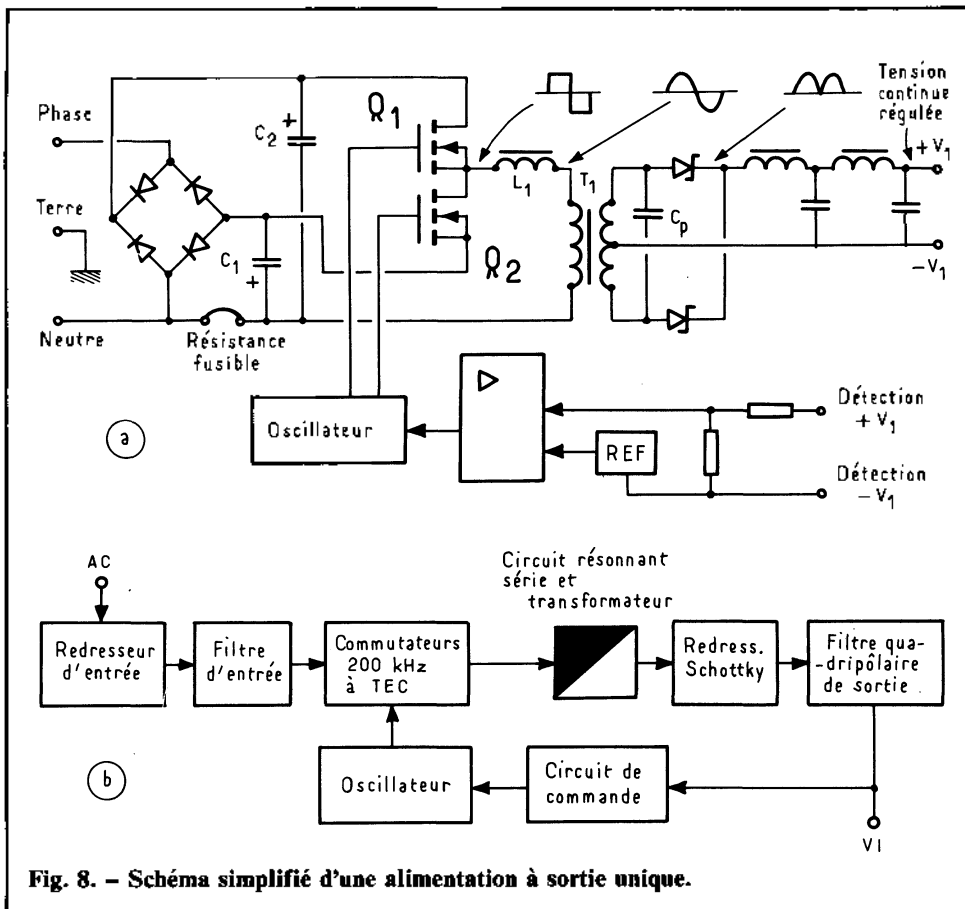


Fig. 8. - Schéma simplifié d'une alimentation à sortie unique.

fait de la possibilité de travailler à une fréquence élevée.

Oscillateur contrôlé par variation de tension

L'oscillateur est un circuit original et digne d'un examen un peu plus détaillé. Cette configuration inhabituelle permet de fournir plus d'un ampère de courant de commande aux transistors à effet de champ en n'utilisant que huit composants.

Cet oscillateur est un multivibrateur astable à couplage inductif. La figure 4 donne le schéma simplifié du circuit.

Pour comprendre le fonctionnement de cet oscillateur, supposons que Q_4 est passant. Le courant I_{ts} est constant et égal à $(K V_{cc} - V_{be})/R_s$. V_{be} étant positif, Q_5 est bloqué. La tension $V_{cc}/2$ est appliquée au primaire de T_1 . La tension $V_L(t)$ est positive et provoque l'augmentation du courant $i_L(t)$ qui devient éventuellement égal à I_{ts} . Le courant de base de Q_4 devient nul, et Q_4 se bloque régénérativement. Etant donné que $i_L(t)$ est encore positif, le transistor Q_5 se débloque brutalement, ce qui provoque une transition très rapide de tension dans T_2 . La figure 5 illustre ces relations courant/temps. La fréquence de travail de cet oscillateur est donnée par l'expression $f_r = R_s (V_{cc} + V_{be}) / 4L (KV_{cc} - V_{be})$

Etant donné que Q_4 est complètement bloqué avant le déblocage de Q_5 , il n'est pas possible que Q_4 et Q_5 soient passants en même temps. De ce fait, l'oscillateur est capable d'attaquer une charge fortement capacitive avec un signal rectangulaire tout à fait acceptable, à une fréquence dépassant 200 kHz. La fréquence de l'oscillateur est commandée par variation de l'inductance effective de L . L'inductance variable de commande est schématisée à la figure 6.

Une caractéristique particulièrement intéressante de cette inductance variable est le fait qu'une faible partie seulement de la tension alternative au primaire de l'inductance (côté oscillateur) est transmise à l'enroulement de commande. La grille des TEC de puissance est une charge idéale pour un circuit de commande à cause de son impédance élevée. De plus, la vitesse de commutation des TEC élimine toute préoccupation relative au temps de réversibilité. La simplicité du circuit de commande d'un TEC est tout à fait étonnante.

La diode et la résistance en parallèle du circuit de commande de la figure 7 provoquent un léger retard entre le déblocage et le blocage des TEC. Ce montage permet de réduire les pertes au moment de la commutation.

Schéma simplifié de l'alimentation

Si l'on rassemble les différents éléments discutés jusqu'à présent, l'alimentation dont le schéma simplifié est donné à la figure 8 commence à prendre forme et le circuit peut être globalement évalué. La tension rectangulaire à 320 V c-à-c en sortie de Q_1 et Q_2 attaque le circuit résonnant série formé par l'inductance L_1 , l'inductance de fuite du transformateur T_1 et la capacité réfléchie du condensateur C_r . La fréquence nominale de l'horloge pilotant les TEC est supérieure à la fréquence de résonance du circuit. La régulation est assurée par modulation de fréquence. Lorsque le circuit de commande ralentit l'horloge et la vitesse de commutation des TEC, la tension aux bornes du condensateur C_r augmente, ce qui conduit à une augmentation de la tension de sortie redressée et filtrée V_1 . Lorsque l'horloge accélère, la tension de sortie V_1 diminue. Le circuit de commande règle la fréquence pour une régulation de V_1 en tension et en charge à 0,1%.

Le schéma de la figure 9, déjà plus détaillé, montre comment les sorties à plusieurs tensions ont été réalisées, la configuration du circuit d'entrée secteur bi-tension 120/240 V ca, ainsi que la source de polarisation de seuil et le circuit de protection.

La partie inférieure droite de la figure 9 montre comment les tensions de sortie V_2 à V_6 de cette alimentation à sorties multiples sont obtenues. Les sorties semi-régulées V_2 et V_3 sont des tensions redressées et filtrées obtenues à partir d'un enroulement secondaire supplémentaire de T_1 . Les sorties V_4 à V_6 sont dérivées de V_2 et V_3 et leur régulation en tension et en charge à 2% est assurée par des circuits intégrés montés sur la carte. Le condensateur du circuit résonnant se compose dans ce cas de deux condensateurs, C_4 et C_5 .

Les composants magnétiques précédemment décrits ne sont pas les seuls éléments inhabituels du circuit. Trois autres composants demandèrent des recherches particulières et de longs travaux d'étude avant que des dispositifs satisfaisants puissent être obtenus. Les TEC de puissance n'étaient même pas encore en production alors que les alimentations de la série 65000A en étaient déjà au stade des études. Les fabricants de condensateurs ne disposaient pas de condensateurs

pouvant accepter en régime continu les niveaux requis de courant alternatif 200 kHz. Il existait également des doutes sur le type de diode de redressement pouvant être utilisée à 200 kHz.

TEC de puissance

Les TEC de puissance et l'alimentation 65000A furent développés ensemble. Aucun TEC de puissance pouvant accepter des tensions élevées n'était disponible lorsque l'étude des alimentations de la série 65000A commença. Les TEC de puissance basse tension disponibles posaient des problèmes de fiabilité et d'approvisionnement, et leur coût était exceptionnellement élevé. Hewlett-Packard étudia les possibilités offertes par les TEC de puissance, les aspects technologiques de leur fabrication ainsi que les coûts de production. Le résultat de cette analyse démontra que l'aspect économique était justifié par les avantages découlant de leur utilisation

tion dans le type d'alimentation projeté. La production des TEC de puissance fut donc décidée, et les alimentations 65000A furent étudiées en fonction de ce composant.

Bien que les ingénieurs de Hewlett-Packard fussent certains que la réalisation d'un TEC de puissance ne posait pas de problème particulier et que la production pourrait être lancée en deux ou trois ans, il n'était pas très prudent de commencer l'étude d'un produit basé sur ces composants avant que leur approvisionnement soit assuré. Quelques fabricants de semiconducteurs étudiaient la fabrication de TEC de puissance, mais il était douteux qu'ils puissent développer cette nouvelle technologie et fournir les composants requis pour les prototypes de l'alimentation sans dévoiler à des concurrents les projets de Hewlett-Packard concernant ce nouveau produit. De ce fait, Hewlett-Packard dut faire appel, au moins temporairement, à ses propres ressources pour la fabrication des TEC de puissance nécessaires. Des spé-

cialistes de différents laboratoires H.P. coopèrent à l'étude, à la réalisation des puces et à leur encapsulation. La division du New Jersey s'équipa d'un banc d'encapsulation TO-3 et des équipements nécessaires au test des composants et aux essais de fiabilité.

Les premiers TEC de puissance fabriqués étaient satisfaisants sur le plan des performances électriques, mais la plus grande difficulté fut d'obtenir la fiabilité requise (MTBF supérieur à 500 000 heures) de ce premier semiconducteur haute tension (450 V) haute température (125 °C) fabriqué par Hewlett-Packard. Finalement, un TEC de puissance conforme aux objectifs initiaux entra en production, et à l'heure actuelle, H.P. est toujours à la pointe du progrès en matière de technologie des TEC de puissance.

Les TEC de puissance destinés aux alimentations de la série 65000A devaient répondre à deux impératifs : accepter une tension de drain supérieure à 450 V et être fiables. Les tests de fiabilité commencèrent très tôt dans l'avancement du projet, et ce pour quatre raisons distinctes : évaluer la fiabilité résultant de différentes méthodes de fabrication, établir l'obtention d'une fiabilité adéquate avant le lancement de la fabrication de l'alimentation, contrôler la qualité des lots en cours de production, et enfin, contrôler les composants fournis par des fournisseurs extérieurs. Un test de fiabilité fut mis en place, ayant pour objectif un MTBF de 1/2 million d'heures (50 ans) et un rendement de 80 %. Ce test est bien plus sévère que les tests effectués par les fournisseurs dont les essais de durée de vie portent généralement sur 20 ou 50 composants et différents tests limités d'environnement.

Bien que la durée de l'essai fut réduite en testant les composants à 175 °C au lieu de 125 °C, 300 composants devaient survivre pendant 1000 heures avec un taux de claquage inférieur à 5 %. Les résultats du test furent satisfaisants, et les concepteurs de l'alimentation 65000A disposaient maintenant d'un TEC de puissance adéquate.

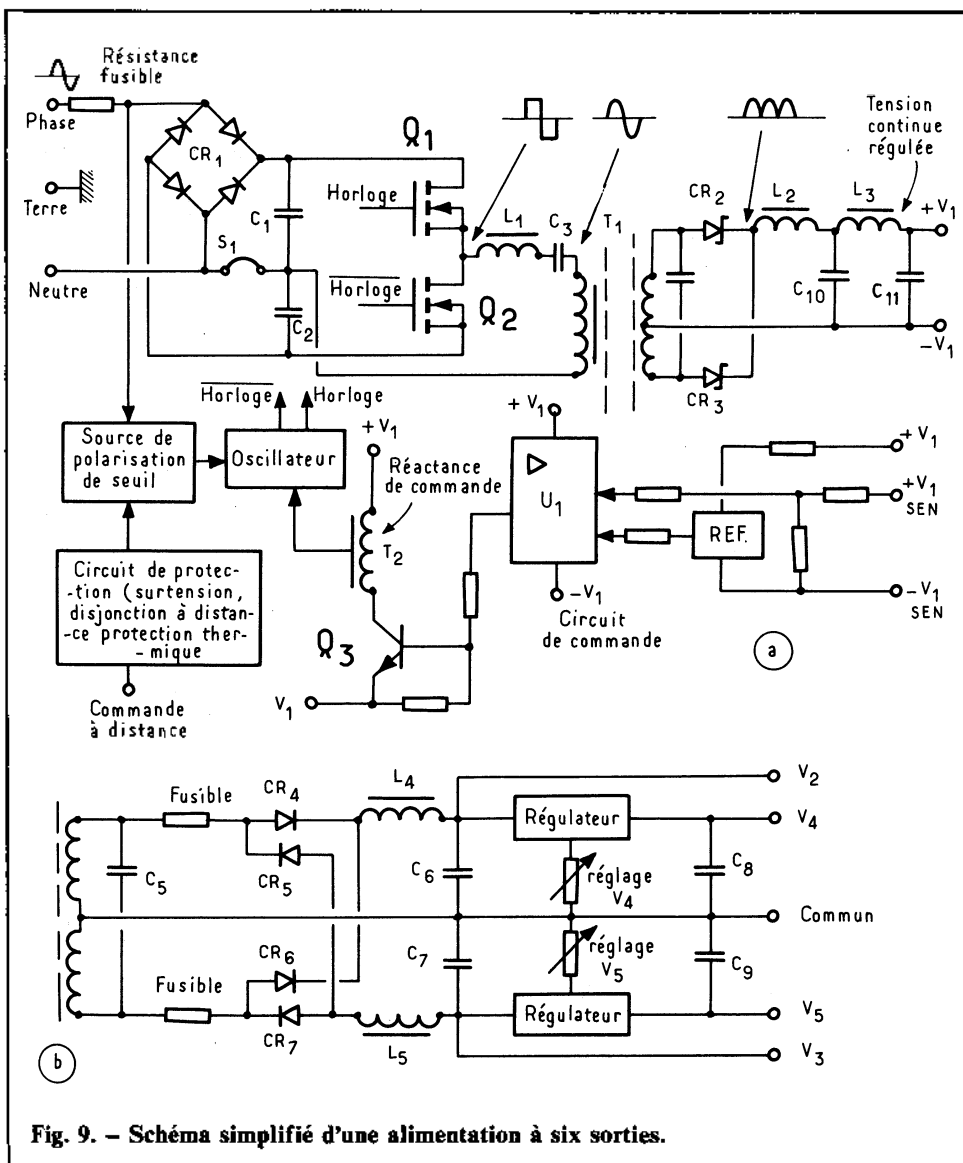


Fig. 9. - Schéma simplifié d'une alimentation à six sorties.

Condensateurs film

Le circuit résonnant de la méthode de régulation utilisée requérait également un condensateur bobiné pouvant accepter un courant élevé, le courant dans le condensateur étant à peu près égal à 90 % du courant de sortie, ce qui est proche de

la valeur acceptable par les fils de connexion ou excède la valeur spécifiée par la plupart des constructeurs. Le condensateur C_r requis au secondaire du transformateur T_1 est physiquement important.

Aucun condensateur disponible n'était capable d'accepter le courant requis. Etant donné que les formes d'ondes en courant et tension du condensateur du circuit résonnant sont sinusoïdaux, il paraissait probable qu'un condensateur film bobiné conventionnel, peu coûteux à réaliser, serait fiable.

Hewlett-Packard fournit à des fabricants de condensateurs un montage d'essais destiné à éprouver leur comportement en présence d'un courant sinusoïdal élevé. Des tests furent également effectués par *Hewlett-Packard* pour déterminer si ces courants élevés pouvaient engendrer des mécanismes de claquage inattendus. Ces tests montrèrent en fait que la température était la seule source de problème, et que la fiabilité serait fonction des caractéristiques thermiques du circuit. Le

type de condensateur finalement retenu était du type film bobiné à diélectrique polypropylène. Les faibles pertes du polypropylène associées à la bonne tenue en courant de fils de connexion en cuivre massif soudées directement aux films permirent de réaliser un condensateur qui survécut à tous les tests de comportement.

Redresseurs

Le choix d'une fréquence de travail de 200 kHz n'excluait pas l'utilisation de diodes Schottky, mais les 65000A étant destinées à fournir des tensions excédant 15 V, ces redresseurs ne pouvaient être utilisés ou se justifier économiquement. Le fait de travailler en tension sinusoïdale rend le temps de recouvrement inverse moins critique, et si t_{rr} inférieur à 200 μ s est considéré comme nécessaire pour les alimentations à modulation par largeur d'impulsion à 20 kHz, à 200 kHz avec des tensions sinusoïdales, les nouveaux re-

dresseurs 50 ns sont tout à fait satisfaisants et ont également l'avantage d'être peu onéreux. Ces redresseurs sont disponibles jusqu'à 150 V, ce qui est amplement suffisant pour des sorties à 48 V continu.

Le résultat

L'alimentation 65000A est conforme aux normes de sécurité des Etats-Unis, du Canada et d'Europe. Elle est de dimensions très réduites et le modèle à une seule sortie pèse moins de 500 grammes. Elle offre un choix de 6 sorties en tension. Le modèle à une seule sortie a un MTBF établi de plus de 100 000 heures. C'est la première alimentation commercialisée utilisant des TEC de puissance. Si l'on retourne en arrière, à l'idée initiale qui a donné naissance aux alimentations de la série 65000A, il faut bien reconnaître que le produit final correspond aux objectifs que s'était fixé *Hewlett-Packard* : produire une alimentation polyvalente de taille réduite et fiable à vocation internationale. ✱

Pour vos
équipements
ALIMENTATIONS

P. FONTAINE

Pour vos
automatismes
ALIMENTATIONS

P. FONTAINE

Rendement élevé
ALIMENTATIONS
à découpage secteur

P. FONTAINE