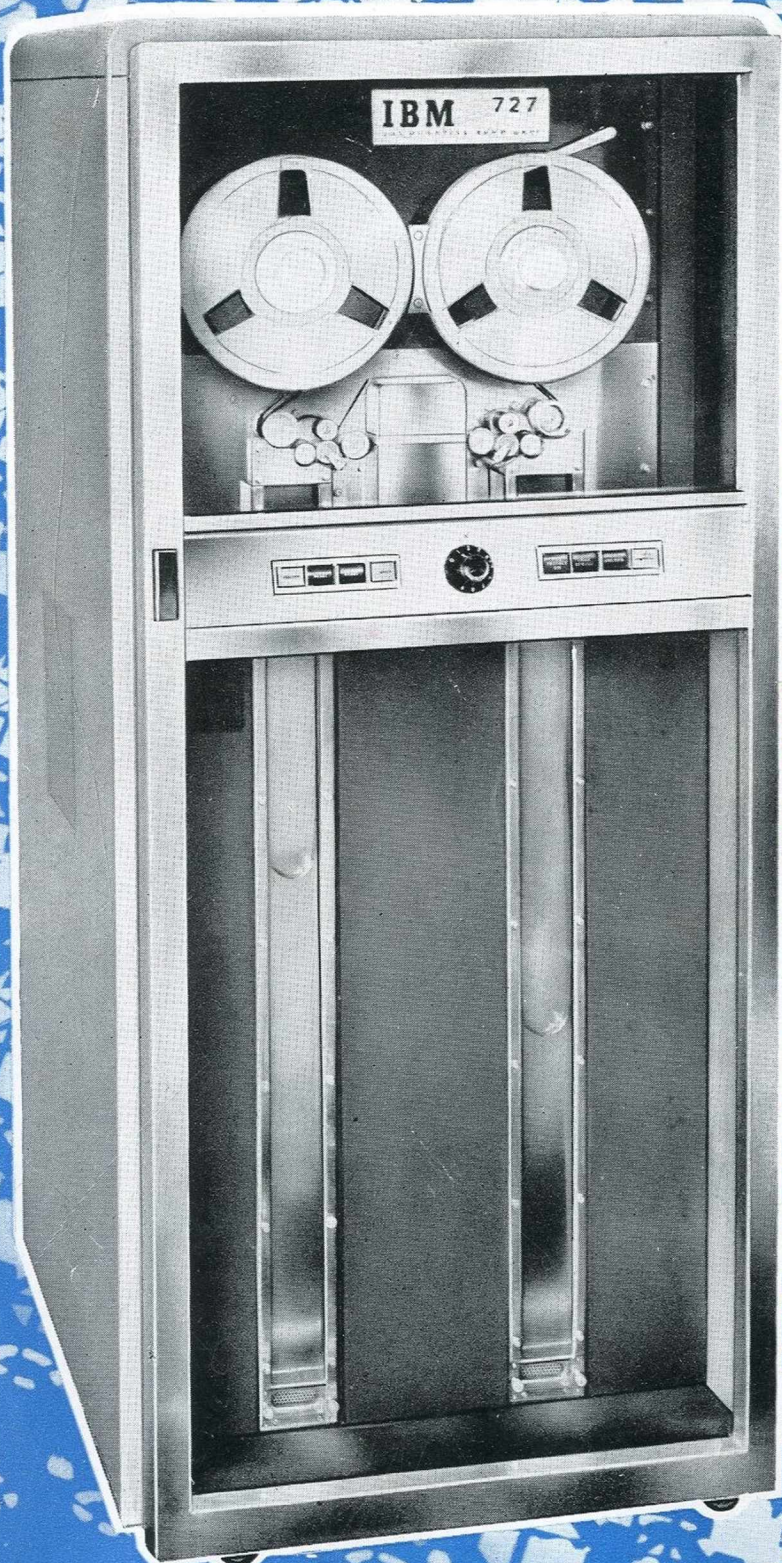


électronique Industrielle

N° 10

SEPTEMBRE-OCTOBRE 1956

300 F.



DANS CE NUMÉRO :

L'art de l'ingénieur.

Les cellules
au sulfure de cadmium.

Un générateur
pour chauffage H.F.

Stabilisation des tensions
alternatives.

LES DIODES à germanium
et silicium.

Thermomètres et thermostats
à thermistances.

Le Couplatron.

A travers la Presse mondiale.

Construction d'un GÉNÉRATEUR 3 kW pour CHAUFFAGE A INDUCTION

INTRODUCTION

Le chauffage des métaux par des courants induits dans le métal n'est pas une nouveauté: on peut dire qu'il est aussi vieux que le premier transformateur puisque malheureusement, dans ce cas, le fonctionnement de l'appareil produit inévitablement, d'une part un échauffement des tôles, d'autre part un échauffement des conducteurs du secondaire, surtout si ce dernier comporte peu de spires et si on les ferme sur elles-mêmes (secondaire en court-circuit).

C'est seulement vers 1905, cependant, que ce phénomène a été utilisé volontairement pour le traitement thermique des métaux, mais on peut dire que ce n'est qu'assez récemment (depuis la fin de la guerre, surtout) que son emploi s'est généralisé à toutes sortes d'industries, même petites, par suite des simplifications qui ont pu être apportées aux générateurs H.F. de puissance à lampes, du fait de l'amélioration des caractéristiques des triodes de petite et moyenne puissance (quelques centaines de watts à quelques kilowatts): réduction des dimensions, diminution de la tension continue d'alimentation, simplification du chauffage, etc...

Les exemples d'utilisation du chauffage par induction sont innombrables; cela tient aux avantages de tous ordres qu'apporte cette méthode de chauffage, par rapport aux anciens modes de traitement.

Le chauffage par induction permet:

- Un raccourcissement du temps nécessaire au traitement;
- Une automatisation poussée des manœuvres exigées par le traitement;
- Une amélioration de la qualité et de l'aspect du produit;
- La localisation stricte du chauffage;
- Des traitements qui ne pourraient pas être faits par d'autres méthodes.

PRINCIPE DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION RELATIONS GÉNÉRALES

Soit un corps auquel on fournit une certaine puissance qui se transforme en chaleur; il reçoit donc des calories, d'une part, mais il en perd par ailleurs, et de différentes façons: par convection (échauffement de l'atmosphère), par conduction (échauffement des parties du corps non directement chauffées) et par rayonnement.

Aux températures basses (jusqu'à 200 ou 300°C), les premières (convection et conduction) sont prépondérantes, ce qui signifie que la température du corps croît à peu près proportionnellement à la puissance dissipée; aux températures élevées, au contraire (supérieures à 800 ou 900°C) les pertes par rayonnement sont les plus fortes du fait qu'elles croissent à peu près comme la quatrième puissance de la température, à une grande augmentation de la puissance dissipée dans le corps ne correspond qu'un faible accroissement de la température.

Envisageons le cas simple d'un cylindre métallique qu'on désire chauffer par induction; on l'entoure d'un solénoïde (appelé « inducteur »), traversé par le courant H.F. (fig. 1). Le transfert au cylindre de l'énergie envoyée dans l'inducteur

se fait par l'intermédiaire du champ électromagnétique: ce champ, sensiblement uniforme dans la section intérieure de l'inducteur, crée des courants de Foucault qui circulent dans des tranches du cylindre perpendiculaires à l'axe commun au cylindre et à l'inducteur; on peut donc assimiler cet ensemble à un transformateur H.F. dont le secondaire possède une spire unique, en court-circuit.

On conçoit que les courants induits soient extrêmement intenses et puissent échauffer fortement le métal qui en est le siège. Il semble également avantageux d'augmenter la fréquence du courant; mais on sait qu'à mesure que la fréquence

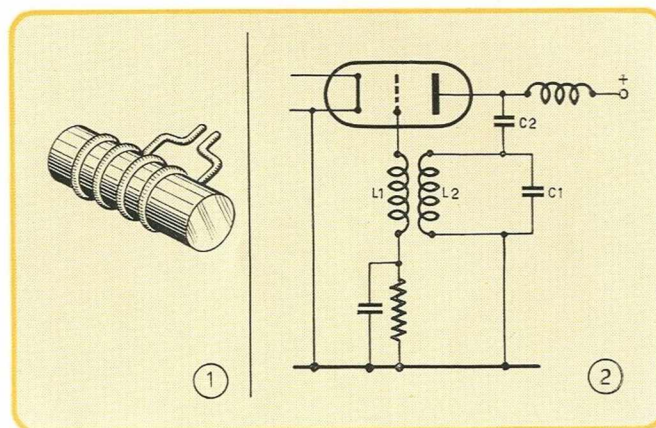


Fig. 1. — Pour chauffer un barreau métallique cylindrique, on l'entoure par un solénoïde (inducteur) parcouru par le courant haute fréquence fourni par le générateur.

Fig. 2. — Schéma de base de l'oscillateur de puissance; il offre l'avantage de ne comporter qu'un seul condensateur, C₁ traversé par un courant H.F. intense.

augmente, les courants induits se localisent de plus en plus à la surface du conducteur (effet « de peau »). A une distance $a = 1/2\pi \sqrt{\mu \cdot \sigma \cdot f}$ de la surface du conducteur (μ : perméabilité, σ : conductibilité du métal et f : fréquence du courant), l'intensité des courants induits n'est plus que de 35% environ de l'intensité à la surface de sorte que le chauffage se localise dans une pellicule d'autant plus mince que la perméabilité, la conductibilité et la fréquence sont plus élevées.

Pratiquement, pour la plupart des métaux bons ou moyennement conducteurs (σ compris entre $2 \cdot 10^5$ et $6 \cdot 10^8$ ($\Omega \cdot m$)⁻¹, μ compris entre 10^{-7} — corps non magnétiques — et 10^{-4} , et f compris entre 0,2 et 1 MHz), la pénétration, a , est comprise entre quelques centièmes et quelques dixièmes de millimètre, c'est-à-dire qu'elle est généralement faible comparée aux dimensions des pièces que l'on a habituellement à traiter.

On peut donc dire qu'en règle générale, le chauffage par induction n'intéresse directement que la surface du corps chauffé. On peut traiter le métal à une profondeur de plusieurs millimètres, par exemple, en prolongeant le temps de chauffage de façon que l'élévation de température pénètre par conduction, mais on peut aussi limiter l'échauffement à la couche superficielle (cas de la trempe de l'acier) en dissipant une puissance élevée pendant un temps court.

La f.e.m. e induite dans la spire en court-circuit constituée par la surface du corps à chauffer, a pour valeur efficace : $e = M \cdot \omega \cdot I$ (M : coefficient d'induction mutuelle entre l'inducteur et la surface de la pièce, $\omega = 2\pi f$, I : intensité efficace du courant traversant l'inducteur). L'expression de e montre qu'il faut donner à M une valeur aussi grande que possible, c'est-à-dire rapprocher le plus possible l'inducteur de la pièce; en particulier lorsque la pièce n'est pas cylindrique, il faut essayer de donner à l'inducteur une section droite de même forme que celle de la pièce. On peut obtenir ce résultat en mettant l'inducteur « en forme » sur la pièce même, après interposition d'une feuille de quelques millimètres d'épaisseur, en amiante par exemple.

On peut admettre que le chauffage reste uniforme si la distance entre l'inducteur et la pièce présente des variations qui ne dépassent pas 1/10 environ du diamètre moyen de la pièce. Dans certains cas il faut donner à l'inducteur une forme tourmentée afin de conserver un bon couplage avec la pièce; l'ouvrage de CURTISS, cité plus loin, donne de nombreux exemples de tels inducteurs.

UTILISATIONS TYPIQUES DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION

Le chauffage par induction s'applique, de préférence, à des corps moyennement conducteurs (fer, nickel, ferronickels, etc...).

Dans la grande majorité des applications actuelles, il est appliqué à des pièces en fer ou en acier à des fins de soudure, de brasure, de durcissement ou de trempe superficiels; ce mode de chauffage est en effet particulièrement bien adapté à ce métal, magnétique et d'assez faible conductibilité. On peut dire que la plupart des opérations thermiques à effectuer sur le fer ou l'acier peuvent être effectuées économiquement au moyen d'un générateur H.F. bien utilisé.

Les autres applications du chauffage par induction sont innombrables et souvent irremplaçables: chauffage sous vide ou en atmosphère contrôlée, dégazage des pièces métalliques, fusion ou transformation à haute température (le corps éventuellement non conducteur peut être chauffé par l'intermédiaire d'un creuset métallique), soudures verre-métal, séchage des peintures sur métaux, etc... On trouvera des renseignements de toute nature dans l'excellent ouvrage de CURTISS: « High-frequency induction heating », *Mc Graw Hill*, traduit sous le titre: « Les applications industrielles du chauffage haute-fréquence » (Ed. Dunod).

Le générateur H.F. qui va être décrit a été monté entièrement dans un laboratoire d'électronique par un ingénieur qui n'a pas de connaissances particulières en radioélectricité et qui n'avait jamais, auparavant, monté d'oscillateur d'une puissance supérieure à quelques watts; c'est dire que la construction de ce générateur peut être entreprise par de nombreux laboratoires industriels. Ce « four à induction » est destiné spécialement au dégazage de pièces métalliques sous vide et éventuellement à la fusion sous vide de différents corps, ainsi qu'à des soudures verre-métal. Il n'est pas douteux que sa puissance utile (2 à 3 kW) en fait l'appareil idéal pour de nombreux laboratoires d'électricité, d'électronique, de chimie, de chimie-physique ainsi que pour de nombreux travaux industriels portant sur de moyennes quantités de métal (soudure de boîtes en fer, soudure de bornes, brasure de pièces métalliques, trempe de petits objets, etc.).

Notre description comporte deux parties: dans la première, nous discutons brièvement le schéma de l'oscillateur, de l'alimentation, ainsi que des dispositifs de sécurité, tandis que dans la seconde nous citons le matériel employé et nous donnons des indications sur les précautions à prendre pour le montage de l'appareil. Dans une dernière partie, enfin, nous indiquons plusieurs améliorations faciles à appliquer à l'appareil décrit et susceptibles d'accroître ses performances.

SCHEMA DU GÉNÉRATEUR HAUTE FRÉQUENCE

Un générateur haute fréquence pour le chauffage par induction peut être décomposé en trois parties principales: l'oscillateur H.F. de puissance, l'alimentation, les dispositifs annexes. Nous allons les envisager successivement.

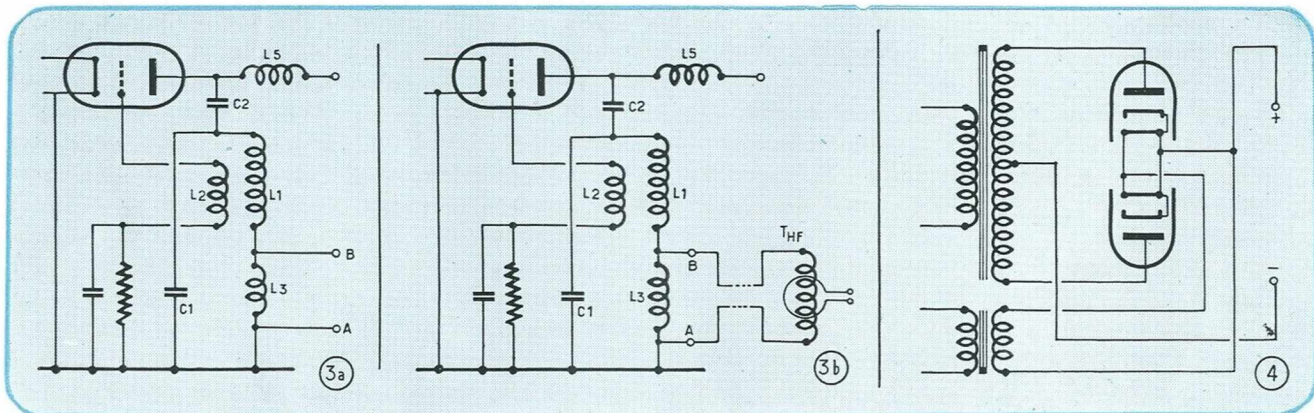


Fig. 3. — Prélèvement de l'énergie sur le circuit oscillant. En a, les bornes de sortie, A et B, permettent d'intercaler l'inducteur en série dans le circuit oscillant; en b, la bobine L_5 , shuntant les bornes de sortie, évite la surcharge de la triode quand on met l'appareil en marche sans avoir connecté un inducteur aux bornes de sortie; T_{HF} est un transformateur H.F. qu'il est avantageux d'utiliser quand

l'inducteur est constitué par une seule spire et qu'il est nécessaire de disposer du maximum de courant H.F.

Fig. 4. — Schéma du redresseur utilisé (redresseur monophasé à deux alternances). Le transformateur fournit deux fois 3,75 kVeff. L'alimentation de l'oscillateur nécessite un courant de 1,2 A max. sous 4 à 5 kV.

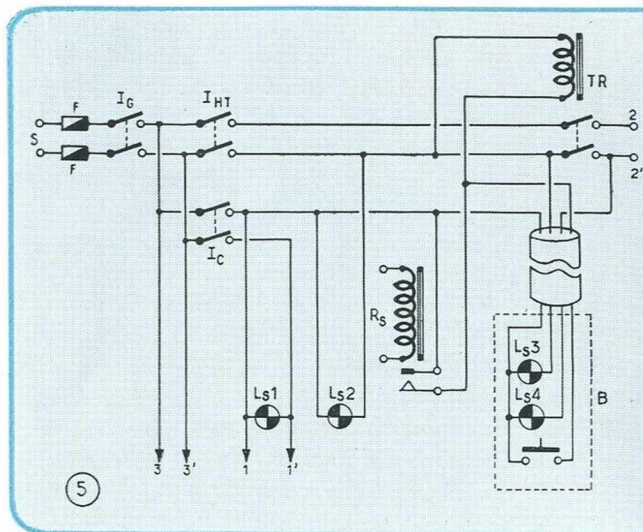
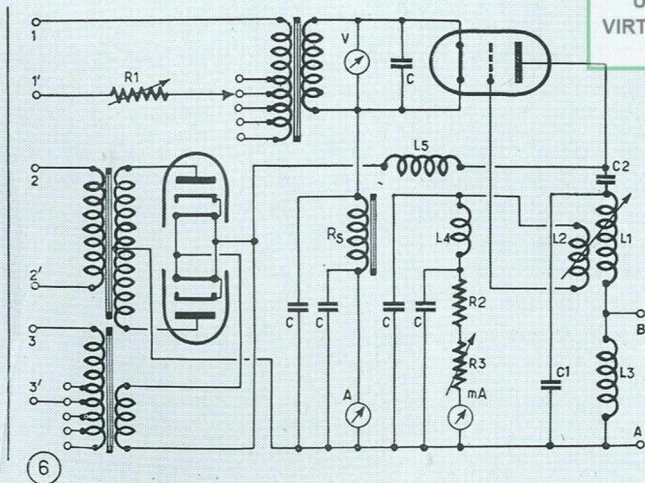


Fig. 5. — Schéma de principe du circuit basse tension et des sécurités du générateur. Les fusibles F et les interrupteurs I_G , I_{HT} et TR sont prévus pour supporter 40 A. L'interrupteur de chauffage de la triode, I_C , est à bouton-poussoir (coupure : 5 A sous 125 V) ; L_{S1} à L_{S4} sont des lampes de signalisation, R_S un relais à maximum coupant l'alimentation quand le courant cathodique de la triode



dépasse 1,3 A, et B est la boîte de télécommande de mise en marche et d'arrêt de l'alimentation.

Fig. 6. — Schéma de principe du générateur H.F. de puissance. Les bornes des primaires des trois transformateurs correspondent aux bornes de la figure 5. Voir le texte pour les caractéristiques des éléments.

L'oscillateur de puissance

Différents types d'oscillateurs peuvent être utilisés avec un rendement sensiblement équivalent ; nous avons choisi celui qui présente le moins de difficultés de construction (fig. 2). Dans tous les montages, la bobine d'anode, L_1 , et le condensateur qui lui est associé, C_1 , sont traversés par un courant H.F. de grande intensité (plusieurs dizaines d'ampères) et il existe par conséquent une d.d.p. élevée entre leurs bornes (plusieurs milliers de volts efficaces). Leur construction doit donc être particulièrement soignée sous peine de voir l'oscillateur rapidement hors d'usage.

Le condensateur C_1 doit posséder une capacité comprise entre 5 et 10 nF ; une rapide comparaison des prix des divers types de condensateurs utilisables (à air, dans l'huile, au mica, à diélectrique céramique) nous a conduit à penser que la meilleure solution, dans notre cas particulier tout au moins, consistait à employer un condensateur à lames dans l'huile, et à le faire réaliser par l'atelier du laboratoire, d'autant plus que la société *Prodélec* était sur le point de livrer un nouvel isolant liquide spécialement adapté à cet usage. Il suffisait donc d'un condensateur unique, mais de deux bobines, L_1 et L_2 , alors qu'un oscillateur Colpitts aurait nécessité deux condensateurs et une seule bobine ; or la construction d'un condensateur est beaucoup plus difficile que celle d'une bobine, surtout d'une bobine d'excitation de grille.

L'extraction de la puissance H.F. peut être faite de différentes façons ; nous avons choisi celle qui nous a paru offrir le plus de souplesse et le moins de difficultés à mettre en œuvre (fig. 3 a). Les bornes de sortie sont les bornes A et B ; par conséquent l'inducteur, qui est raccordé à ces bornes, est traversé par le courant H.F. parcourant le circuit oscillant L_1 , C_1 ; le transport de la puissance H.F. entre le générateur et la pièce à chauffer (leur distance ne doit pas dépasser 2 m) peut, ainsi, se faire de la façon la plus commode pour l'utilisateur : sous une tension H.F. pas trop élevée (inférieure à 1 kV eff) et sous un courant pas trop intense (ne dépassant pas 70 ou 80 A). Dans le cas où l'inducteur ne comporte qu'une spire et lorsqu'il faut

disposer du maximum de courant dans cette spire, on peut intercaler un transformateur H.F. (fig. 3 b) entre les bornes de sortie AB du générateur et la spire. Nous donnerons ultérieurement quelques indications sur la constitution de cet élément.

En réalité, nous avons shunté les bornes A, B par une bobine (L_3 de la figure 3 b) dont la self-inductance est grande devant celle des inducteurs, de sorte que l'intensité du courant qui la traverse est toujours négligeable devant le courant parcourant l'inducteur. Cette bobine a un rôle de sécurité : si le générateur est mis en fonctionnement sans que ses bornes de sortie soient reliées à une bobine de chauffage, le circuit oscillant est malgré tout fermé et le générateur entre en oscillations (il ne consomme alors qu'une puissance très faible — voir le Tableau III) alors qu'en l'absence de L_3 , la triode n'oscillerait pas et serait fortement surchargée du fait que sa grille ne serait pas polarisée. Si l'éventualité envisagée ne peut pas se produire, on peut supprimer avantageusement la bobine L_3 .

L'alimentation

L'alimentation est toujours du type « parallèle » ; elle se fait au moyen de la bobine d'arrêt L_5 et du condensateur de couplage C_2 . Elle doit pouvoir fournir 1,3 A sous 4 kV environ, ce qui implique l'emploi de phanotrons. Le schéma du redresseur que nous avons utilisé est donné par la figure 4 ; il ne possède pas de dispositif de filtrage, car il serait nécessaire que la cellule ait une bobine en tête (en raison de l'emploi de phanotrons), ce qui provoquerait une forte chute de tension et fournirait finalement une tension redressée insuffisante étant donné le transformateur dont nous disposons. La tension d'alimentation est donc simplement une tension sinusoïdale dont les deux alternances sont redressées. L'observation du courant H.F. à l'oscilloscope montre qu'il est modulé complètement à la fréquence de 100 Hz, l'enveloppe de modulation ayant sensiblement la même forme que la tension d'alimentation. Il serait avantageux d'employer un redresseur triphasé ; nous reviendrons sur cette question.

Le circuit d'alimentation comporte trois interrupteurs principaux : un interrupteur général, I_G (fig. 5), placé aussitôt les fusibles, un interrupteur haute tension, I_{HT} , situé après l'interrupteur général, et un télérupteur TR, connecté en série avec I_{HT} . Les interrupteurs I_G et I_{HT} sont placés sur le bâti du générateur, leur mise en, ou hors, service étant rappelée par des voyants lumineux : le télérupteur, situé également sur le bâti, est commandé à distance au moyen d'une boîte de commande raccordée au bâti par un câble à quatre conducteurs long de plusieurs mètres. La commande du télérupteur se fait au moyen d'un bouton-poussoir unique; l'état électrique du générateur (interrupteur I_{HT} et télérupteur ouverts ou fermés) est indiqué sur la boîte de commande par deux voyants lumineux.

Les dispositifs de contrôle et de sécurité

Le générateur n'ayant pas été prévu pour un travail spécialisé et toujours le même, il nous a semblé nécessaire de pouvoir contrôler constamment le fonctionnement de l'oscillateur et éventuellement modifier ce fonctionnement afin de l'amener, dans chaque utilisation particulière, au-dessous des valeurs limites. La triode est en effet un élément coûteux et il est prudent de vérifier que la dissipation de ses circuits d'anode et de grille ne sont pas excessifs. C'est la raison pour laquelle nous avons prévu (fig. 6) un milliampèremètre de mesure du courant moyen de grille, un ampèremètre de mesure du courant moyen de cathode et un relais, situé en série avec l'ampèremètre, coupant l'alimentation du générateur quand le courant moyen de cathode devient supérieur à une certaine valeur. Un voltmètre, enfin, mesure la tension de chauffage de la triode; les triodes de petite puissance (jusqu'à une puissance dissipée sur l'anode de quelques kilowatts) ont en effet un filament en tungstène thorié et il est nécessaire d'assurer la constance de leur tension de chauffage à $\pm 5\%$ près, sous peine d'abrèger considérablement leur existence. C'est pour cette raison que nous avons prévu un rhéostat de réglage dans le primaire du transformateur de chauffage, et un voltmètre de mesure de la tension de chauffage.

Notre générateur ne devant pas être mis entre les mains de personnes non spécialisées, nous n'avons pas jugé nécessaire de prévoir des dispositifs de sécurité nombreux et compliqués.

Il en serait tout autrement dans le cas de générateurs d'ateliers de fabrication : il faudrait, au contraire, munir l'appareil de dispositifs de sécurité aussi efficaces que possible, d'une part afin de protéger le personnel (l'alimentation peut débiter plusieurs ampères sous 4 à 5 kV pendant un temps suffisamment long pour provoquer de graves accidents, et, de même, le contact d'un « point chaud » en H.F. — condensateurs C_1 et C_2 , anode, bobine L_1 , — peut provoquer de graves brûlures), et d'autre part en vue de la protection de l'appareillage.

Les sécurités que nous avons adoptées sont relatives à l'utilisation correcte du générateur : la fermeture de l'interrupteur général I_G met en marche le ventilateur de la triode et le chauffage des phanotrons; elle permet le chauffage de la triode. Une lampe verte s'allume quand I_G et l'interrupteur de chauffage de la triode, I_C , sont fermés; les lampes jaunes « Attente » (une sur le bâti, une sur la boîte de télécommande) s'allument quand l'interrupteur H.T. est fermé, à condition que la triode soit chauffée.

La mise sous tension au moyen du télérupteur ne peut se faire que si l'interrupteur H.T. du bâti est fermé et si la triode est chauffée; la mise sous tension allume une lampe blanche sur la boîte de télécommande.

Le relais de protection de la triode, dont la bobine d'excitation est connectée en série avec l'ampèremètre, provoque la coupure de l'alimentation, au moyen du télérupteur, quand le courant cathodique dépasse une valeur déterminée (1,3 A).

DESCRIPTION DU GÉNÉRATEUR

Nous avons utilisé, dans la plus grande mesure possible, du matériel existant au laboratoire. Nous n'avons acheté que la triode, son transformateur de chauffage, le condensateur de

couplage et le télérupteur; tout le reste est constitué par un matériel un peu disparate mais malgré tout assez bien adapté.

La triode

Nous avons utilisé une triode S.F.R., type E 1300. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

Tension de chauffage	7,5 V
Courant de chauffage	38 A
Tension anodique max.	5 kV
Courant anodique max.	1,2 A
Dissipation anodique max.	1,5 kW
Polarisation de grille max.	1,2 kV
Courant moyen de grille max.	0,2 A
Pente (pour $I_p = 0,5$ A)	14 mA/V
Coefficient d'amplification	18

En régime intermittent la puissance dissipée sur l'anode peut atteindre 2,5 kW (ce régime est défini par $t \leq 10$ s et $t/T < 0,5$, t = temps de fonctionnement, T = temps total).

Nous nous sommes arrêté à cette triode parce que sa puissance était adaptée aux autres éléments que nous possédions déjà (en particulier le transformateur d'alimentation et les phanotrons) et parce qu'il nous a paru que la puissance utile qu'elle permet d'obtenir (jusqu'à 3 kW environ) était suffisante pour nos besoins. Nous envisagerons dans le chapitre « Modifications et perfectionnements » l'emploi d'autres triodes.

Le transformateur de chauffage de la triode

Ce transformateur a été commandé spécialement; son primaire comporte plusieurs prises, entre 115 et 140 V, pour un secteur de 127 V. Le réglage de la tension de chauffage est fait au moyen d'un rhéostat M.C.B. « Vitralter » R.C.V. 100, de 10 Ω . Si le secteur est très instable, il peut être prudent d'alimenter ce transformateur au moyen d'une tension stabilisée; dans ce cas, il est possible de supprimer le rhéostat de réglage et à la rigueur le voltmètre de contrôle.

Les bobines du circuit oscillant

La bobine principale, L_1 (fig. 6) est constituée par 7 spires en tube de cuivre de 15 mm de diamètre; le diamètre intérieur des spires est de 120 mm, la longueur totale est de 180 mm. Cette bobine est fixée sur un petit bâti en Afcodur au moyen de colliers Atlas, par l'intermédiaire de plaquettes en Micalex.

La bobine L_2 , connectée entre les bornes de sortie, est constituée par 10 spires en tube de cuivre de 8 mm de diamètre, formées sur un cylindre de 100 mm de diamètre; sa longueur est de 150 mm.

La bobine de grille, L_3 , couplée à L_1 , est faite sur un mandrin en stéatite octogonale, de la C.I.C.E., d'un diamètre de 90 mm et de 200 mm de longueur. Elle comporte 10 spires en fil de cuivre de 1,5 mm de diamètre, bobinées irrégulièrement sur une longueur de 160 mm : à une extrémité, les spires sont espacées de 25 mm, à l'autre elles ne le sont que de 10 mm.

Les axes de L_1 et de L_2 coïncident; L_2 peut coulisser le long de son axe de façon à modifier son couplage avec L_1 , donc la f.e.m. appliquée à la grille. Au couplage minimum, L_2 est à demi sortie de L_1 , les spires en regard étant les plus espacées sur L_2 ; au couplage maximum, L_2 est complètement entrée dans L_1 .

L'axe commun aux deux bobines est vertical; L_2 peut coulisser le long d'un tube de verre de 10 mm de diamètre. Le couplage augmente quand on soulève L_2 ; ce mouvement est obtenu au moyen d'une poulie sur laquelle s'enroule un câble dont l'autre extrémité est fixée à la bobine; la poulie est commandée par un flexible relié à un bouton qui est situé sur le bâti, au-dessous de l'ampèremètre de mesure du courant moyen de cathode.

Si l'on suppose les bobines L_1 et L_2 faites avec le même sens

d'enroulement, les connexions doivent être réalisées comme l'indique la figure 6.

Le condensateur du circuit oscillant

C'est la pièce dont la construction présente le plus de difficultés. Ce condensateur a été entièrement réalisé par l'atelier du laboratoire, sauf la boîte en tôle. Ses dimensions extérieures sont les suivantes : longueur 450 mm, largeur 180 mm et hauteur 140 mm. Il est étanche, ce qui présente quelques difficultés de réalisation.

Le condensateur proprement dit se compose de 55 plaques rectangulaires de 110×160 mm, en aluminium de 1 mm d'épaisseur, maintenues écartées par des entretoises métalliques de 10 mm de longueur ; chaque plaque est amputée de deux coins opposés et maintenue en place et à l'écartement par deux longues tiges filetées et par les entretoises aux deux coins restants. L'espacement entre les plaques successives est de 4,5 mm. La capacité dans l'air est d'environ 1,5 nF et dans l'huile de 6 nF.

L'ensemble du condensateur est fixé au couvercle par l'intermédiaire de quatre colonnes en stéatite de 12 mm de diamètre et de 130 mm de longueur. Une armature est réunie à la boîte métallique, l'autre est sortie à travers le couvercle au moyen d'une borne étanche soudée, type S40/18 à tige filetée de la C.I.C.E. Le couvercle, en laiton, est soudé à la boîte, puis la boîte est remplie d'huile au moyen d'un trou ménagé dans le couvercle ; ce trou peut ensuite être obturé d'une façon hermétique au moyen d'un petit couvercle vissé, l'étanchéité étant assurée par un joint torique en caoutchouc. L'huile utilisée est du « Lectronol », imprégnant liquide spécial pour H.F., des Ets Prodélec ; il est nécessaire de ne pas remplir la cuve à ras bord afin de permettre au liquide de se dilater.

Ce condensateur est soumis à un régime extrêmement sévère : la fréquence d'oscillation étant voisine de 1 MHz, il est traversé par un courant efficace de 100 A quand les bornes du générateur sont réunies à un inducteur constitué par une spire unique de petit diamètre ; la d.d.p. correspondante, entre les bornes du condensateur, est alors de 3 kV eff.

Le condensateur de couplage

Ce condensateur doit également être de très bonne qualité, mais il est soumis à un régime moins sévère que le condensateur du circuit oscillant : il ne supporte qu'une tension continue de 4 à 5 kV, la composante alternative étant faible (au maximum une centaine de volts H.F.). Nous avons utilisé un modèle au mica, de 10 nF, fabriqué par S.A.F.C.O. Ses deux électrodes doivent être bien isolées de la masse (la borne reliée à l'anode peut atteindre un potentiel de 8 kV par rapport à la masse).

L'alimentation

Le transformateur utilisé est un appareil vieux de 25 ans au moins ! (1). Nous l'avons employé faute de mieux, car il est indiqué pour une puissance de 2 kW seulement, mais nous l'avons fait fonctionner pendant des temps assez longs sous 4 et 5 kW sans qu'il manifeste d'échauffement exagéré. Alimenté sous 125 V, il donne 2×3750 V ; cette tension est redressée par deux phanotrons du type 872 A (récupérés des surplus). Leur transformateur de chauffage est de même provenance (on notera que le secondaire de ce transformateur doit être isolé pour tenir une tension égale à la tension d'alimentation, c'est-à-dire au moins 5 kV).

La bobine d'arrêt, L_0 , est cylindrique ; elle est faite sur un cylindre de carton bakérisé de 115 mm de diamètre et de 500 mm de longueur. Le bobinage a été réalisé (au moyen d'un tour) en fil de cuivre émaillé de 0,8 mm de diamètre. Une

(1) Il est connu au laboratoire sous le nom de « La Patate » ; il a résisté victorieusement à tous les mauvais traitements qui lui ont été infligés par une génération entière de travailleurs du laboratoire. Il est sûrement immortel...

longueur de 200 mm est bobinée au pas de 1,2 mm, les suivants au pas de 1,8 mm et les 100 derniers millimètres au pas de 2,5 mm ; l'extrémité correspondant aux spires espacées est connectée à l'anode de la triode.

Les interrupteurs coupent les deux fils du secteur. Le télérupteur comporte deux basculeurs à mercure ; il coupe 40 à 50 A. La commande est faite par une bobine alimentée directement sur le secteur.

Les appareils de mesures

Le bâti du générateur porte trois appareils de mesures :

Le voltmètre 0-10 V_{eff} pour le contrôle du chauffage de la triode ;

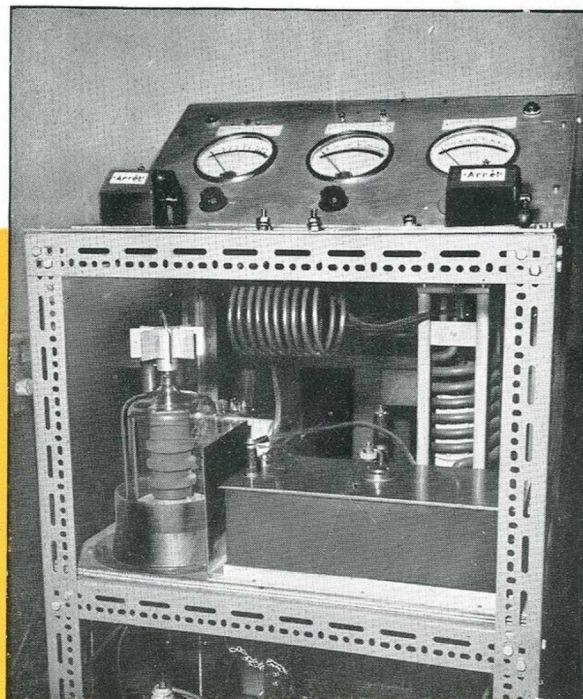
Le milliampèremètre 0-300 mA pour la mesure du courant moyen de grille ;

L'ampèremètre 0-2 A pour la mesure du courant moyen de cathode.

Ce sont de vieux appareils en boîtier de laiton, circulaires, de 150 mm de diamètre ; leur échelle a une longueur de 120 mm environ.

Leurs sensibilités ont été modifiées pour les amener aux valeurs indiquées ci-dessus ; le voltmètre 0-10 V_{eff} en particulier, était un milliampèremètre à courant continu 0-1 mA, auquel nous avons adjoint un élément redresseur en pont Westinghouse (on en trouve chez les revendeurs de pièces détachées radio), et une résistance de valeur telle que la déviation maximum corresponde à 10 V_{eff} . Les graduations des trois appareils ont été refaites par nous, et les zones dangereuses indiquées en rouge.

Il est important, pour éviter de « griller » les appareils, de connecter au plus court entre chacune de leurs bornes (même celle qui sont en principe à la masse) et le bâti (qui doit être réuni en un point au négatif de l'alimentation) un condensateur non inductif de 0,1 μF (tension de fonctionnement minimum : 150 V). Il s'est révélé nécessaire, dans l'appareil que nous avons réalisé, de découpler au bâti une des bornes de



chaque lampe de signalisation par un condensateur de 0,1 μ F, également non inductif, faute de quoi le filament était soumis à de fortes vibrations qui n'auraient sans doute pas tardé à le rompre.

Autres éléments du générateur

Les résistances variables R_1 et R_3 sont des rhéostats circulaires bobinés vitrifiés M.C.B., type RCV 100 : la résistance R_2 est vitrifiée, elle doit pouvoir dissiper 150 à 200 W ; L_4 est une bobine d'arrêt constituée par 4 bobines en nid d'abeilles réalisées sur un cylindre en carton bakélisé de 20 mm de diamètre, en fil divisé comportant 15 brins de 8/100 mm, isolé à l'émail plus une couche de nylon. Le tableau suivant donne les caractéristiques de ces bobines :

Bobines	Nombre de tours	Largeur	Diamètre extérieur
1	600	20	42
2	500	14	39
3	300	10,5	35
4	250	9	32

La distance entre deux bobines voisines est de 10 mm.

Le relais R_s se ferme quand le courant d'excitation dépasse 1,5 A. Les 5 condensateurs marqués C sont des condensateurs au mica, de 5 nF, tension d'essai de 2 kV, par exemple du type MSI de M.C.B.

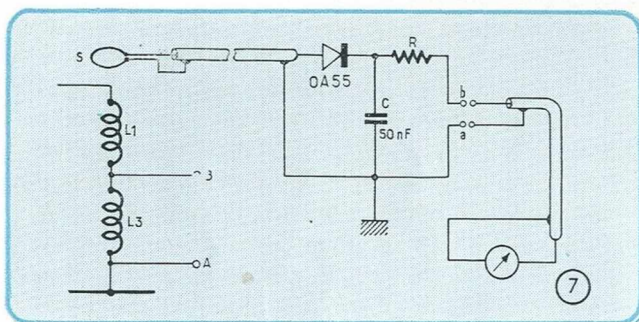


Fig. 7. — Dispositif de mesure du courant H.F. ; S est une spire de même diamètre moyen que L_1 ; elle est reliée par un câble coaxial, isolé au polythène, à une plaquette portant le redresseur et la résistance R ; les sorties a et b, sont amenées par un câble blindé à une fiche Radio-Air fixée sur le bâti. Le microampèremètre est raccordé à cette prise au moyen d'un câble blindé long de plusieurs mètres, ce qui permet de le placer près de l'opérateur (à côté de la boîte de télécommande).

Mesure du courant haute fréquence

Il nous a semblé commode de munir le générateur d'un dispositif de mesure du courant H.F. dont le circuit oscillant est le siège, car ce courant est sensiblement égal au courant d'utilisation.

Un ampèremètre H.F. à thermocouple est précis, mais coûteux, fragile et sujet aux dérèglages ; nous avons préféré utiliser un dispositif différent, moins précis mais beaucoup moins coûteux et très robuste. Ce circuit (fig. 7) mesure au moyen d'un voltmètre à faible consommation (100 μ A) et d'un redresseur (diode au germanium type OA 55 de La Radiotechnique, par exemple), la f.e.m. induite aux bornes d'une spire couplée à L_1 . Cette

spire est réalisée en tube de 4 mm de diamètre ; elle a le même diamètre moyen (140 mm) que L_1 . Son axe est confondu avec celui de L_1 et elle est située à 125 mm au-dessus de la spire la plus voisine de L_1 .

La résistance de 120 k Ω a été choisie de façon que le micro-ampèremètre, gradué de 0 à 100, donne directement l'intensité du courant H.F. en ampères (la graduation est en effet sensiblement linéaire). L'étalonnage a été fait par comparaison avec un thermocouple.

Câblage

Tout le circuit basse tension à forte intensité (à pleine charge, le générateur prend 40 à 50 A au secteur) doit être réalisé en fil de forte section. Le raccordement au secteur est fait au moyen d'un câble à deux conducteurs ayant chacun une section de 10 mm² (Thomson-Houston). Le câblage intérieur a été fait en fil rigide de 4 mm de diamètre, mais du fil souple serait sans doute plus agréable à employer.

Les connexions du circuit oscillant peuvent être parcourues par un courant encore plus intense (jusqu'à 100 A) et doivent être faites en tresse de forte section (par exemple de la tresse Diéla de 2 \times 25 mm dont la section nette est d'environ 20 mm²).

Les fils isolés reliés à des points à haute tension, continue ou alternative, sont isolés *obligatoirement* au polythène, sur une épaisseur radiale d'au moins 2 mm ; le fil de liaison de la bobine L_2 à la grille est constituée par du coaxial de forte section (8 mm extérieur), le blindage étant réuni à la masse, près de la triode.

Nous avons utilisé un fil de masse de 4 mm de diamètre, isolé du bâti, sauf en un point. Toutes les pièces métalliques sont réunies à la masse.

Pour éviter que la triode chauffe les éléments voisins (condensateurs C_1 et C_2) elle est entourée, sur deux côtés, d'un réflecteur vertical en aluminium poli.

Le bâti peut être fait de cornières soudées ; les dimensions que nous avons admises (hauteur : 105 cm, largeur : 80 cm et profondeur : 60 cm) pourraient être fortement réduites, mais un rapprochement inconsidéré de certains éléments peut conduire à des difficultés imprévues, de sorte qu'il ne nous semble pas utile de trop chercher à « miniaturiser » cet appareil.

Le bâti est séparé en deux parties de volumes égaux par une cloison horizontale : l'alimentation (le transformateur H.T., les phanotrons et leur transformateur de chauffage, la bobine d'arrêt L_3 et le télérupteur) est située à la partie inférieure, tout le reste du montage au-dessus, sauf les trois appareils de mesure, les rhéostats R_1 et R_3 , l'interrupteur I_c et les lampes de signalisation qui sont fixés sur un plan incliné disposé sur le bâti.

Les bornes de sortie H.F. sont constituées par de la tige fileté de 8 mm de diamètre ; elles sont espacées de 80 mm et isolées au moyen d'un rectangle de Plexiglas de 10 mm d'épaisseur et de 100 \times 160 mm de côté.

ESSAIS

Quelques essais ont été faits avec ce générateur.

Indiquons tout d'abord les conditions de fonctionnement dans trois cas simples (tableau III) :

1^o) Les bornes de sortie sont en circuit ouvert (lignes E 1 sur le tableau) ;

2^o) Elles sont court-circuitées (E 2) ;

3^o) Elles sont reliées à un inducteur constitué par 6 spires en tube de cuivre, de 6 mm de diamètre, de 75 mm de longueur et de 80 mm de diamètre intérieur (l'inducteur fonctionne à vide) (E 3).

Dans chaque cas, nous avons donné au couplage des bobines L_1 et L_2 sa valeur maximum et sa valeur minimum (les valeurs correspondantes sont notées M et m dans le tableau III). Les cinq colonnes donnent, successivement : les intensités (en A) du courant primaire, des courants moyens d'anode et de grille du courant H.F., et de la puissance prise au secteur (en kW).

Nous avons ensuite utilisé l'inducteur qui a servi au troisième essai pour chauffer un tube de fer de 190 mm de longueur, de 50 mm de diamètre extérieur et de 3 mm d'épaisseur radiale. Le couplage était mauvais en raison de la grande dif-

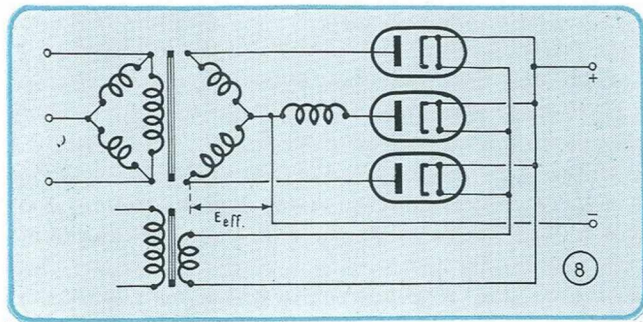


Fig. 8. — Schéma d'un redresseur triphasé à une alternance. Un tel redresseur est préférable au redresseur monophasé de la figure 4.

TABLEAU III

	I_1	I_A	I_G	I_{HF}	W_1
M	12	0,30	0,11	40	1,5
E 1					
m	11,5	0,25	0,06	40	1,45
M	23	0,75	0,32	100	2,8
E 2					
m	18	0,50	0,15	100	2,3
M	17	0,50	0,21	70	2,1
E 3					
m	15	0,38	0,11	70	1,9

férence entre les diamètres du cylindre (50 mm) et de l'inducteur (80 mm). Dès la mise sous tension, les conditions de fonctionnement étaient les suivantes, le couplage entre les bobines de grille et d'anode étant maximum (les grandeurs mesurées dans les colonnes suivantes sont les mêmes que dans les colonnes correspondantes du tableau précédent) :

40 1,07 0,09 42 5

Après 1 mn 30 de fonctionnement, on notait peu de changement :

44 1,21 0,08 42 5,5

A partir de 2 mn, le cylindre était rouge, le point de Curie était dépassé et le circuit oscillant était moins chargé : les intensités des courants primaire et d'anode diminuaient, celles des courants de grille et du circuit oscillant augmentaient : à 2 mn 30, on avait :

35 1,0 0,15 62 4,4

Après 3 mn de fonctionnement nous avons réduit l'excitation de grille (couplage minimum), ce qui a donné :

32 0,85 0,065 58 4

A partir de ce moment (l'essai a duré en tout 15 mn), l'anode de la triode était rouge sombre sur les deux tiers inférieurs de sa hauteur, le cylindre était entre rouge cerise et rouge orangé sur une longueur de 9 à 10 cm.

Indépendamment de ces essais, et de plusieurs autres qui ne seront pas rapportés ici, le générateur a été utilisé pour dégazer des pièces métalliques sous vide ; il a, jusqu'ici, donné toute satisfaction.

MODIFICATIONS ET PERFECTIONNEMENTS

Modifications au générateur actuel

L'appareil qui vient d'être décrit a été construit en grande partie avec du matériel récupéré, qui n'était par conséquent pas toujours le mieux adapté. De plus, il est prévu pour un fonc-

tionnement non intensif de sorte que s'il devait être utilisé dans un atelier de fabrication, il faudrait lui apporter quelques modifications :

1°) Tout d'abord améliorer notamment la sécurité du personnel, en procédant comme il a été dit précédemment ;

2°) Egalement augmenter la sécurité de fonctionnement de l'appareil, en le munissant d'une alimentation largement calculée, en réglant la tension de chauffage (surtout si le secteur présente des variations supérieures à $\pm 5\%$ de sa valeur moyenne), et en prévoyant un refroidissement des éléments du circuit oscillant (bobine L_1 , inducteur et éventuellement condensateur C_1) au moyen d'une circulation d'eau dans la bobine et dans l'inducteur, puisque ces éléments sont réalisés en tube. Le refroidissement du condensateur peut être fait de la même façon à condition de prévoir une boucle de refroidissement intérieure, soudée à la boîte. Dans certains cas, il pourrait être nécessaire de réchauffer l'eau avant son passage dans l'appareil afin d'éviter qu'elle provoque sur L_1 et sur l'inducteur, des condensations nuisibles au bon fonctionnement de l'appareil.

Modifications de la puissance du générateur

Nous allons maintenant passer au cas où l'utilisateur envisagerait la construction d'un générateur de puissance différente de celle de l'appareil que nous avons construit.

Les modifications portent essentiellement sur la triode et sur le dispositif d'alimentation, les autres changements étant relativement peu importants.

Si nous nous limitons aux triodes à refroidissement naturel et aux puissances pas trop supérieures à celles de notre générateur (afin que l'extrapolation ne soit pas aventurée), on constate que la triode *SFR* type E1300 ne peut guère être remplacée que par la triode *CFTH*, type TH3T4000 A1, qui peut dissiper 2 kW sur l'anode et fournir environ 4 kW au circuit d'utilisation. Cette triode fonctionne sous une tension anodique de 4 kV et demande un courant moyen d'anode de 1,5 A ; il est presque indispensable, dans ce cas, d'utiliser un redresseur triphasé : la demande de courant est mieux répartie sur le réseau et la régulation de la tension redressée est bien meilleure qu'avec un redresseur monophasé à deux alternances.

Le schéma d'un redresseur triphasé à une alternance est donné par la figure 8. Admettons que le circuit d'utilisation du redresseur fonctionne sous 4 kV et consomme un courant moyen de 1,7 A : il faut alors que le transformateur donne 3 fois 3,4 kV_{eff} et accepte une puissance d'au moins 6 kW. Les phanotrons devront supporter une tension inverse de 8 kV, un courant moyen de 0,6 A et un courant maximum de 1,5 A. On pourra prendre des phanotrons du type TH5031 de la *CFTH*, ou VH7400 de la *SFR*, ou tout autre modèle équivalent, tel le 872 A américain.

Notons que le générateur que nous avons construit aurait été avantageusement réalisé avec un redresseur triphasé comportant un transformateur de 5 kW, donnant 3 fois 3,5 kV_{eff} et trois phanotrons *CFTH* type TH5021. Dans tous les cas, le transformateur de chauffage des phanotrons doit posséder un secondaire bien isolé puisqu'il est porté à la haute tension redressée.

Suivant l'atmosphère plus ou moins humide et poussiéreuse du lieu de travail, et suivant l'importance qu'on attache à la sécurité de fonctionnement, les transformateurs seront, ou non, en cuve.

CONCLUSION

En conclusion, nous conseillons vivement aux industriels qui ont à chauffer, à souder, à braser des pièces métalliques, surtout si elles sont en fer, de lire l'ouvrage de CURTISS que nous avons signalé précédemment ; ils y trouveront suffisamment de renseignements pour se faire une opinion et savoir si leur fabrication relève du chauffage par induction ; si oui, ils auront intérêt, soit à faire l'acquisition d'un générateur industriel, soit à monter un en s'aidant, si besoin est, de la description précédente.

R. VILLIERE.