

GÉNIE ÉLECTRIQUE

Étude d'un bain de dégraissage

Cette étude porte sur un sous-système technique intervenant dans le procédé Kanigen de nickelage chimique, apportant des propriétés anti-corrosives et améliorant la soudabilité de pièces en laiton. Le traitement de surface de ces pièces, partiellement automatisé, comporte deux phases de dégraissage préalables, l'une utilisant un solvant chloré en phase vapeur, l'autre un produit chimique, le *D909*, en solution aqueuse. Elles seront suivies de trois phases de décapage, de la phase de nickelage, d'une phase de séchage puis de l'emballage. Toutes ces phases sont elles-mêmes entrecoupées de phases de rinçage.

Le sous-système technique étudié est le bain de dégraissage chimique. Cette étude se place à l'occasion d'une mise à niveau technologique du bain, s'inscrivant elle-même dans le cadre d'une automatisation complète de la chaîne de traitement. Le sous-système comporte actuellement :

- Un bac ouvert en tôle d'un volume V de $0,1 \text{ m}^3$, rempli à 80%, contenant de l'eau additionnée du produit chimique dégraissant. Le niveau est régulé par une régulation de niveau non étudiée.
- Deux thermoplongeurs (résistances de chauffage constituant deux récepteurs triphasés) alimentés par un relais statique, permettant une commande de puissance par angle de phase ou par train d'onde.
- Une sonde de température de type *Pt 100*.
- Un thermostat remplissant la fonction de régulation tout ou rien de température.
- Divers capteurs permettant de gérer les aspects de sécurité et la régulation de niveau.
- Une armoire électrique regroupant les dispositifs de commande, de régulation et de protection des circuits et des personnes.

La mise à niveau technologique consiste à remplacer le thermostat par un régulateur de température afin de permettre la supervision par un *API*. Le régulateur permet de mettre en œuvre une régulation tout ou rien, du type de celle en service actuellement, ou linéaire.

Filière TSI

L'étude porte tout d'abord sur le comportement du bain, à des fins de modélisation et d'identification. Le sujet aborde ensuite les deux types de régulation envisageables ainsi que les deux commandes de puissances autorisées par le relais statique. Les performances comparées permettront de choisir un type de commande de puissance et un type de régulation. Une partie porte sur l'électronique de mesure mise en œuvre autour de la sonde Pt 100 .

Le sujet comporte cinq parties très largement indépendantes.

Partie I - Modélisation et identification du bain

Le bain de dégraissage peut-être considéré comme un système d'entrée $p(t)$, puissance électrique active et réglable consommée par les thermoplongeurs, et de sortie $\theta(t)$, température du bain. Cette partie a pour objectif la détermination d'un modèle simple du comportement du bain et sa validation à l'aide de l'enregistrement de l'évolution de la mesure de sa température, lors d'une commande particulière. Le modèle théorique sera établi à partir des considérations suivantes :

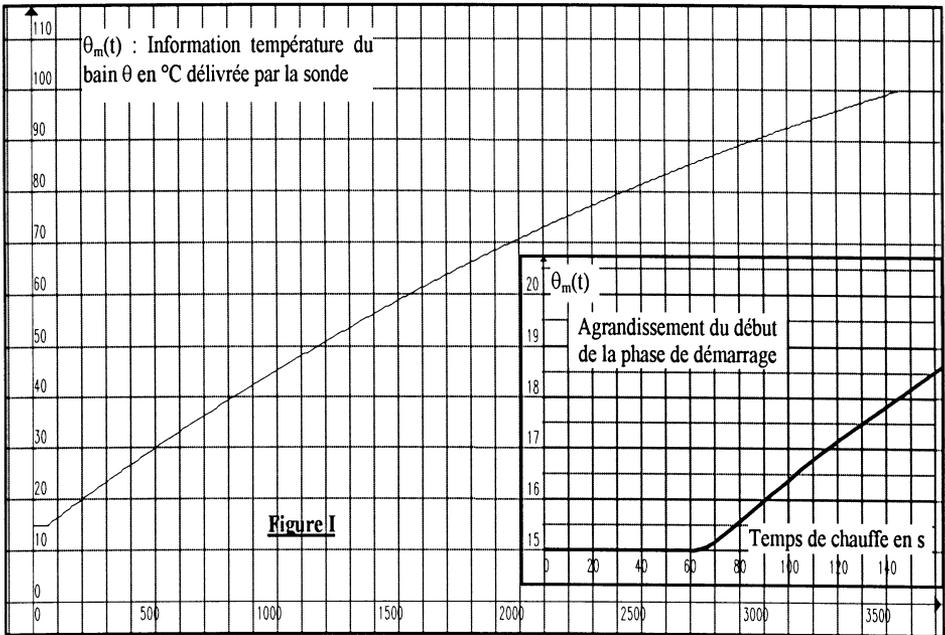
- Une partie de l'énergie fournie par effet Joule au bain est accumulée par la solution dégraissante, l'autre partie étant transférée au milieu ambiant.
- La partie de l'énergie transférée au milieu ambiant sera prise en compte par la notion de résistance thermique, notée R_{th} , exprimée en K/W .
- La sonde introduit un retard pur entre l'évolution de la température $\theta(t)$ du bain et l'évolution de la mesure, notée $\theta_m(t)$.

On rappelle la chaleur massique de l'eau $C = 4,18 \text{ J/gK}$ et la masse volumique de l'eau $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$. Le produit dégraissant ne modifie pas sensiblement les constantes précédentes.

On procède à un enregistrement de l'information température $\theta_m(t)$ délivrée par la sonde Pt 100 lors d'une phase de démarrage du bain. Cette phase consiste à amener le bain à ébullition à partir de la température ambiante, notée θ_a , ce qui améliore l'efficacité du produit dégraissant, avant de ramener sa température à la température optimale d'utilisation de 80°C . Le relevé fourni figure I montre uniquement l'évolution de l'information température du bain jusqu'à son ébullition, ainsi qu'un agrandissement du début de cette phase. La puissance électrique est appliquée aux thermoplongeurs à partir d'un instant

pris comme origine de l'enregistrement. Elle est constante et égale à sa valeur maximale $P_m = 12 \text{ kW}$.

Figure I



I.A.) Montrer que le modèle théorique retenu conduit à la relation

$$\mathcal{R}_1 : R_{th} p(t) = \tau \frac{d\theta}{dt} + \theta(t) - \theta_a$$

et donner l'expression littérale de τ . Donner l'expression littérale de $\theta(t)$ lors de la phase de démarrage.

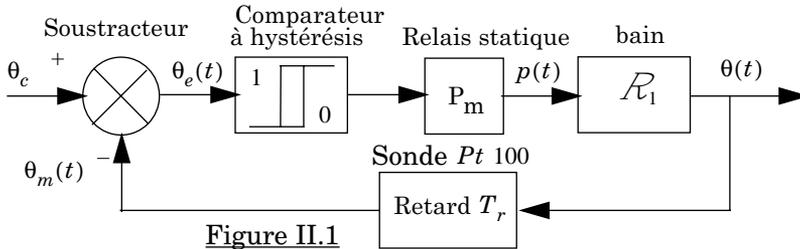
I.B.) Vérifier la présence d'un retard pur T_r entre l'instant d'application de la puissance et le décollage de l'information température. Évaluer sa valeur. Quelles peuvent en être les origines ? Que suggère la forme du "décollage" de la courbe ? (Cette forme sera négligée dans la suite du problème).

I.C.) Évaluer τ et la valeur asymptotique θ_M de la courbe. En déduire une valeur expérimentale de la résistance thermique du bain.

I.D.) Lors du fonctionnement en production, les pièces à dégraisser subissent un trempage d'une durée $T_1 = 30 \text{ mn}$ et nécessitent un temps de transit d'une durée $T_2 = 1 \text{ mn}$. La capacité calorifique de l'ensemble pièces et support est $C_p = 8000 \text{ J/K}$. L'équilibre thermique est atteint au cours du trempage. Calculer la puissance consommée par les pièces lors d'une phase de dégraissage.

Montrer que le trempage de ces pièces peut être pris en compte par la diminution de la résistance thermique du bain et donner son expression littérale R_{the} en fonction de R_{th} , C_p , T_1 et T_2 .

Partie II - Régulation tout ou rien



Dans ce type de régulation (voir figure II.1), actuellement en service sur l'installation, la puissance de chauffe $p(t)$ est soit nulle, soit maximale P_m . Quand le fonctionnement est périodique, on appelle rapport cyclique, noté α , le rapport de la durée du fonctionnement à puissance P_m sur la période T du fonctionnement. La commande de puissance provient du thermostat se comportant comme un soustracteur suivi d'un comparateur à hystérésis à seuils symétriques $\pm\theta_s$, avec $\theta_s = 3^\circ\text{C}$. Le comparateur est actionné par l'écart $\theta_e(t)$ entre la consigne θ_c et la mesure $\theta_m(t)$. La consigne est constante et réglable entre 0 et 100°C . Le retard pur précédemment mis en évidence est totalement affecté à la sonde. On peut écrire $\theta_m(t) = \theta(t - T_r)$, avec $T_r = 60\text{ s}$. La température suit une loi issue de la relation \mathcal{R}_1 du I.A.). On donne $P_m = 12\text{ kW}$, $R_{th} = 1,2 \cdot 10^{-2}\text{ K/W}$ et $\tau = 4000\text{ s}$. La température ambiante θ_a est de 15°C . On posera $\theta_M = R_{th}P_m + \theta_a$.

II.A - Retard pur de la sonde négligé

II.A.1) On admettra qu'en régime périodique $\langle\theta(t)\rangle \approx \theta_c$. Quelle est la température minimale de consigne donnant un fonctionnement périodique ? Tracer la courbe $\langle\theta(t)\rangle$ en fonction de θ_c .

II.A.2) Quelle est en régime périodique la relation entre $\langle p(t)\rangle$, α et P_m ? Dédurre de \mathcal{R}_1 la relation entre $\langle\theta(t)\rangle$, θ_a , R_{th} et $\langle p(t)\rangle$. Donner alors l'expression de α en fonction de θ_c , θ_M et θ_a .

II.A.3) Montrer que la période T , quand elle existe, peut se mettre sous la forme

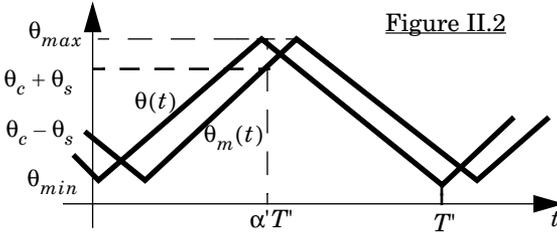
$$T = \frac{A\theta_s(\theta_M - \theta_a)}{(\theta_M - \theta_c)(\theta_c - \theta_a)}$$
 et donner la valeur numérique de A .

Remarque : on utilisera l'approximation linéaire des variations de $\theta(t)$ autour de sa valeur moyenne conduisant à poser $\theta(t) \approx \langle \theta(t) \rangle$ dans l'équation différentielle.

II.A.4) Tracer les chronogrammes de $p(t)$ et $\theta(t)$ pour $\theta_c = 80^\circ \text{C}$.

II.B - Prise en compte du retard pur de la sonde

On tient compte maintenant du retard pur. On conserve la consigne $\theta_c = 80^\circ \text{C}$. On choisit comme instant initial l'instant où le relais statique applique la puissance P_m aux thermoplongeurs. On note θ_{min} et θ_{max} les nouvelles valeurs de température minimale et maximale du bain. Soient α' le nouveau rapport cyclique et T'' la nouvelle période de fonctionnement de la régulation. On se place toujours dans le cadre de l'approximation linéaire précédente. Les évolutions de $\theta(t)$ et $\theta_m(t)$ ont alors l'allure de la figure II.2.



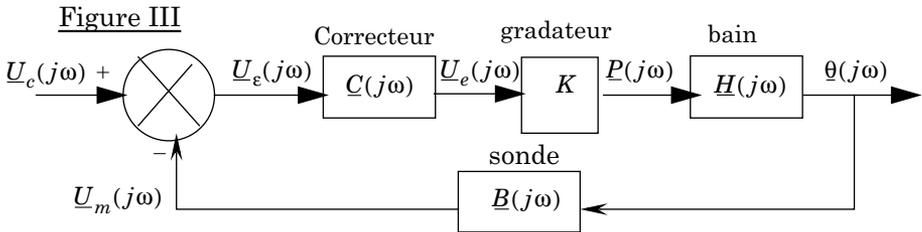
II.B.1) Déterminer les valeurs numériques de α' , $\langle \theta(t) \rangle$, θ_{min} , θ_{max} et T'' .

II.B.2) Conclure sur l'influence du retard pur en terme de précision et de stabilité.

Partie III - Régulation linéaire

Dans ce mode de régulation, le relais statique fonctionne en mode train d'onde et délivre une puissance électrique P dépendante de la tension U_e appliquée sur son entrée de commande, la plage $0 \leq U_e \leq 10 \text{ V}$ correspondant linéairement à la plage $0 \leq P \leq P_m = 12 \text{ kW}$. La sonde présente un retard pur. On peut écrire $U_m(t) = B_0 \cdot \theta(t - T_r)$ avec $T_r = 60 \text{ s}$. En statique, la sonde délivre une tension $U_m = 0 \text{ V}$ pour $\theta = 0^\circ \text{C}$ et une tension $U_m = 10 \text{ V}$ pour $\theta = 100^\circ \text{C}$. La relation $U_m(\theta)$ est linéaire. La tension de consigne évolue dans la plage $0 \leq U_c \leq 10 \text{ V}$. On envisage une correction PI de la boucle de régulation.

Le schéma fonctionnel de la régulation est représenté figure III. Les grandeurs complexes correspondent aux notations complexes des variations sinusoïdales autour d'un point de fonctionnement statique.



La température $\theta(t)$ suit une loi issue de la relation \mathcal{R}_1 du I.A.). On donne $P_m = 12\text{kW}$, $R_{th} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ K/W}$ et $\tau = 4000 \text{ s}$.

III.A.) Quel est l'apport attendu d'une régulation PI ?

III.B.) À partir de la relation \mathcal{R}_1 , montrer que $\underline{H}(j\omega)$ peut se mettre sous la forme :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{H_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

et donner les valeurs numériques de H_0 et ω_0 .

III.C.) Déterminer K .

III.D.) On ne tient pas compte pour l'instant du retard pur introduit par la sonde. Montrer que $\underline{B}(j\omega)$ est un réel positif B_0 et calculer sa valeur.

III.E.) On pose

$$\underline{C}(j\omega) = A \left(1 + \frac{1}{j\omega T_i} \right).$$

Montrer que $\underline{T}(j\omega)$, fonction de transfert en boucle ouverte, peut se mettre sous la forme

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{\omega_1}{j\omega}$$

pour une valeur particulière de T_i . Quelle est la marge de phase M_ϕ de cette régulation ?

III.F.) Déterminer A pour obtenir en boucle fermée une fonction de transfert $F(j\omega)$ du premier ordre, de pulsation de coupure $\omega_f = 5\omega_0$.

III.G.) Quelle est l'erreur statique de cette régulation ? Quel est son temps de réponse à 5% lors d'un échelon de consigne d'amplitude suffisamment faible pour que le fonctionnement reste linéaire ?

III.H. On conserve les réglages précédents, mais on tient compte maintenant du retard pur.

III.H.1) On pose $\theta(t) = \hat{\theta} \cos \omega t$. Exprimer $U_m(t)$. En déduire l'expression de $\underline{B}(j\omega)$.

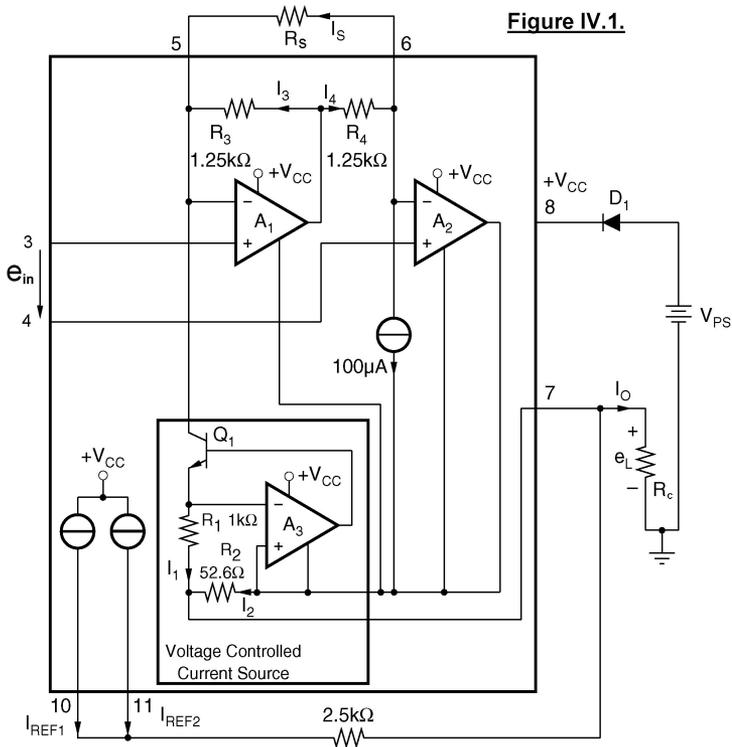
III.H.2) En déduire l'expression de $\underline{T}(j\omega)$ et calculer la nouvelle marge de phase M_φ de cette régulation.

III.I.) Conclure sur l'influence du retard pur en terme de précision et de stabilité.

Partie IV - Électronique associée à la sonde de température

L'entrée sonde de température Pt 100 du régulateur utilise un circuit intégré spécialisé, le XTR103 de Burr Brown, afin de convertir les variations de résistance de la sonde en un courant I_0 normalisé 4 – 20 mA. On reproduit figure IV.1 le schéma interne simplifié du circuit intégré associé à quelques composants externes. La tension e_{in} est une tension dépendante de la résistance $R(\theta)$ de la

sonde. Dans ce montage, tous les ALI fonctionnent en régime linéaire. On donne $I_{REF1} = I_{REF2} = 1 \text{ mA}$.



IV.A.) Quelle est la relation entre I_1 et I_2 ? Établir la relation

$$I_3 = I_s \left(1 + \frac{R_s}{R_3} \right) + 10^{-4}.$$

IV.B.) En déduire la relation :

$$I_0 = 4 \cdot 10^{-3} + e_{in} \left(16 \cdot 10^{-3} + \frac{40}{R_s} \right).$$

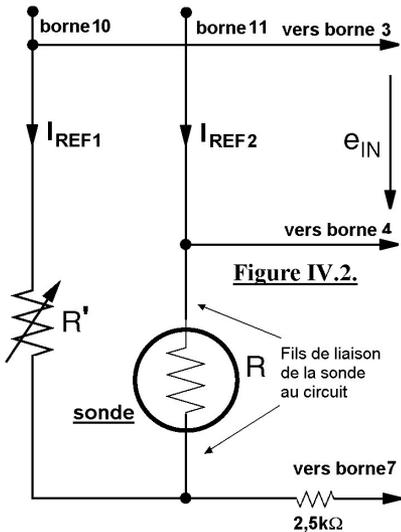


Figure IV.2.

IV.C.) La plage de température sélectionnée est $[0^{\circ}\text{C}, 100^{\circ}\text{C}]$. La sonde $Pt\ 100$ utilisée possède une résistance de 100Ω à 0°C et de $138,5\Omega$ à 100°C . Le raccordement de la sonde au circuit est représenté figure IV.2. Calculer les valeurs de R_s et R' permettant d'obtenir $I_0 = 4\text{ mA}$ à 0°C et $I_0 = 20\text{ mA}$ à 100°C .

IV.D.) La relation $R(\theta)$ est représentée à $0,1^{\circ}\text{C}$ près, dans la plage $[0^{\circ}\text{C}, 600^{\circ}\text{C}]$, par la relation issue de la formule de Calendar-Van-Dusen,

$$R(\theta) = R_0(1 + a\theta + b\theta^2) \text{ avec}$$

$$R_0 = R(0) = 100\Omega, a = 3,908 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\text{et } b = -5,802 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}.$$

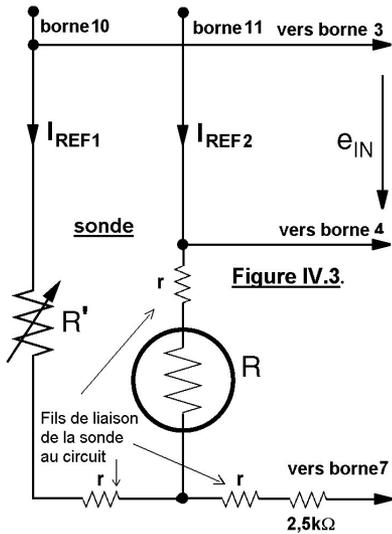
Le circuit offre la possibilité de compenser partiellement cette non-linéarité par choix d'une résistance R_L à connecter entre deux bornes du circuit (non représentées) faisant évoluer les intensités I_{REF1} et I_{REF2} d'après la loi

$$I_{REF1} = I_{REF2} = I_{R0} + \frac{e_{in}}{2R_L} \text{ avec } I_{R0} = 10^{-3} \text{ A.}$$

IV.D.1) Exprimer $e_{in}(\theta)$ puis calculer R_L en appliquant un développement limité à $e_{in}(\theta)$ et en annulant le terme en θ^2 .

IV.D.2) A.N. Calculer l'erreur de non-linéarité de e_{in} sans compensation et avec compensation pour $\theta = 100^{\circ}\text{C}$.

IV.E.) On tient compte maintenant des résistances (non représentées) $r(\theta)$ des fils de liaison de la sonde au circuit, soumises elles aux variations de la température ambiante (figure IV.2). Les résistances et leurs variations sont supposées identiques dans les deux fils. On pose $r(\theta) = r_0 + \Delta r(\theta)$, r_0 étant la valeur de la résistance d'un fil pour une température homogène de 15°C . R' est réglée de façon à obtenir $I_0 = 4\text{ mA}$ pour $\theta = 0^{\circ}\text{C}$. Montrer que la variation de r induit une erreur sur e_{in} (on ne tiendra pas compte de la compensation de non linéarité étudiée ci-dessus).



Pour compenser cette erreur, on utilise des sondes trois fils. Le raccordement de la sonde au circuit est représenté figure IV.3. Comment se traduit la variation précédente de résistance sur e_{in} ?

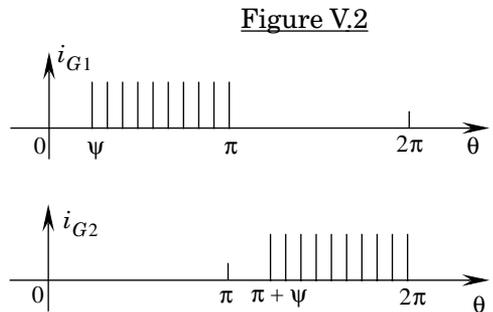
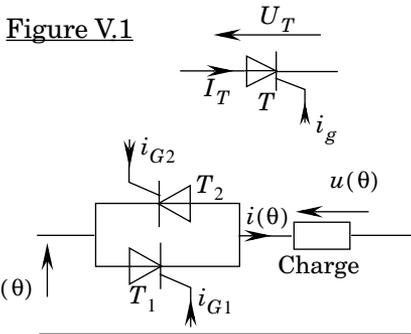
Partie V - Étude du relais statique

Un relais statique est un convertisseur statique alternatif-alternatif. Il est utilisé ici pour faire varier la puissance électrique dissipée dans les thermoplongeurs. Cette variation de puissance peut se faire suivant deux principes : la commande par angle de phase et la commande par train d'onde. Le relais statique utilisé permet le fonctionnement dans l'un ou l'autre de ces modes. Cette partie étudie les principes de ces commandes à partir d'une source monophasée et aborde les problèmes de la mise sous et hors tension d'un récepteur triphasé.

Le montage de principe est représenté figure V.1. Les commandes de courant de gâchette sont constituées de trains d'impulsions très rapprochées, périodiques, de périodes 2π , représentées figure V.2.

V.A - Commande par angle de phase

Le montage de principe est représenté figure V.1. Les commandes de courant de gâchette sont constituées de trains d'impulsions très rapprochées, périodiques, de périodes 2π , représentées figure V.2.



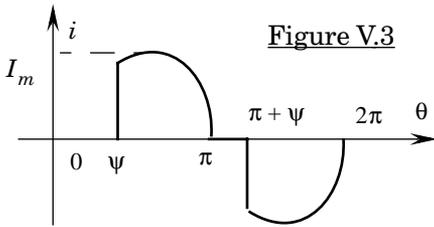


Figure V.3

On pose $v(\theta) = V_m \sin \theta$ avec $\theta = \omega t$, $\omega = 100\pi$ et $V = 230$ V. On étudie le cas d'une charge résistive $R = 26,5 \Omega$. Le courant dans la charge a alors l'allure de la figure V.3.

V.A.1) Rappeler les conditions de mise en conduction et de blocage d'un thyristor (notations figure V.1.). Quelles sont ses

caractéristiques dans l'état passant ?

V.A.2) Soit I_0 la valeur efficace du courant sinusoïdal dans la charge lors de son alimentation directe par la source $v(\theta)$. Établir l'expression de I , valeur efficace du courant $i(\theta)$, en fonction de ψ et I_0 .

V.A.3) En déduire la relation $P = k(\psi) P_0$, où P est la puissance active reçue par la charge, et P_0 la puissance active reçue par la charge en régime sinusoïdal. Quelle est la plage de réglage de P quand ψ varie de 0 à π ?

V.A.4) On définit le facteur de puissance F vu par la source sinusoïdale par $F = \frac{P}{S}$, où S est la puissance apparente définie par $S = VI$. Déterminer l'expression du facteur de puissance en fonction de ψ .

V.B - Commande par train d'onde

Le montage de la figure V.1. reste le même, seule la commande varie. Elle est maintenant cyclique et le cycle comporte N périodes de $v(\theta)$. On commande les thyristors à $\psi = 0$ pendant n périodes, n réglable. Les $N - n$ périodes restantes, aucun thyristor n'est commandé. On donne $N = 125$. On étudie le cas d'une charge résistive $R = 26,5 \Omega$. L'allure du courant dans la charge est représentée figure V.4.

$$\text{On pose } \alpha = \frac{n}{N}$$

V.B.1) Déterminer la puissance active reçue par la charge en fonction de α et P_0 , puissance active reçue par la charge en régime sinusoïdal.

V.B.2) Donner l'expression de I , valeur efficace du courant, en fonction de α et I_0 , valeur efficace du courant en régime sinusoïdal.

V.B.3) Exprimer en fonction de α le facteur de puissance F vu par la source sinusoïdale.

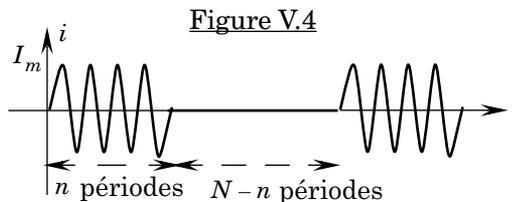


Figure V.4

V.C - Comparaison des commandes

Comparer sans calcul les deux types de commande en terme de facteur de puissance, de génération d'harmoniques, d'adaptation de la loi de commande de puissance aux systèmes régulés et en terme d'adaptation à la commande de procédés à constante de temps faible.

V.D - Commande triphasée par train d'onde

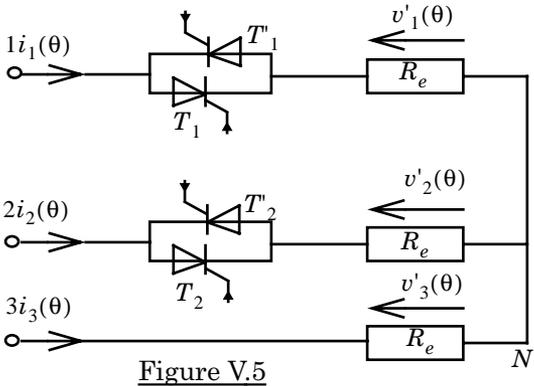


Figure V.5

Chaque thermoplongeur est constitué de 3 résistances $R = 26,5\Omega$ couplées en étoile. On relie borne à borne les thermoplongeurs afin de constituer un récepteur triphasé équivalent étoile de résistance R_e . Il est alimenté à partir du réseau triphasé 400 V – 50 Hz par l'intermédiaire du relais statique (voir figure V.5).

V.D.1) On étudie la mise en conduction et la mise hors conduction du récepteur triphasé. La tension simple $v_1(\theta)$ est prise comme origine des phases. On donne en annexe les chronogrammes des tensions simples et des tensions composées sur deux périodes. On applique les trains d'impulsions sur les thyristors concernés suivant le séquençement suivant :

0	$\pi/6$	$2\pi/3$	π	$5\pi/3$	2π	$8\pi/3$	3π	$7\pi/2$
	T_1	T_1	T_1'	T_1'	T_1	T_1	T_1	
		T_2	T_2	T_2'	T_2'	T_2	T_2	

Effectuer le tracé des tensions $v'_1(\theta)$, $v'_2(\theta)$ et $v'_3(\theta)$ sur le document réponse, en le justifiant.

V.D.2) Réglage de puissance, réglage de température

La commande en train d'onde est la même que celle décrite dans le V.B. La relation du V.B.1 reste valable, où P_0 est maintenant la puissance reçue par le groupement triphasé lors de son alimentation directe par le réseau 400 V – 50 Hz .

a) Déterminer la valeur numérique de P_0 pour ce montage.

b) On se place dans le cas de la régulation linéaire de la partie III, en régime permanent, avec $\theta_c = 80^\circ\text{C}$. Le bain nécessite en production une puissance $P = 5700\text{W}$ pour maintenir une température constante de 80°C . Calculer n . n étant un nombre entier, que se passera-t-il ?

V.E.) Choix de la solution

Indiquer quelle solution vous préconisez pour le type de régulation et le type de commande de puissance en justifiant votre choix.

••• FIN •••
