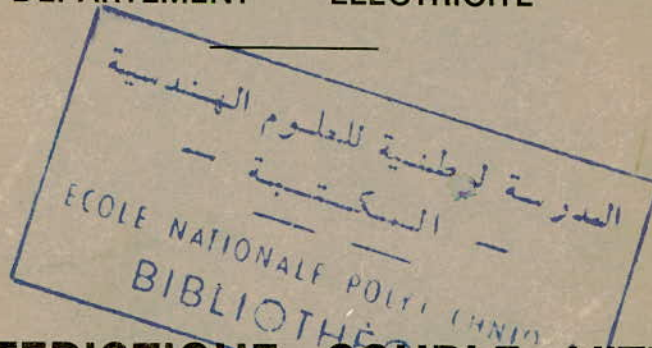


UNIVERSITE D'ALGER

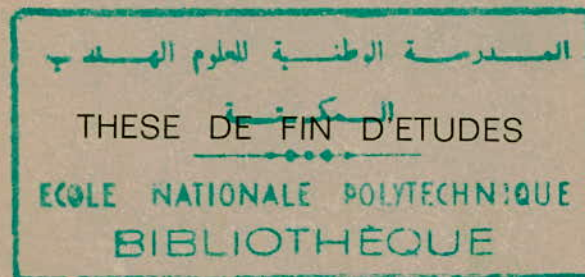
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT " ELECTRICITE "



CARACTERISTIQUE COUPLE - VITESSE

COUPLE TRANSITOIRE AU DEMARRAGE
D'UN MOTEUR ASYNCHRONE



proposée par M. LAPORTE
étudiée par A. AHMED CHAOUCH
et M. T. FADEL

— PROMOTION 1973 —

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT "ELECTRICITE "

CARACTERISTIQUE COUPLE/VITESSE
COUPLE TRANSITOIRE AU DEMARRAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

SUJET PROPOSE PAR : M. LAPORTE

ETUDIE PAR : A. AHMED CHAOUCH & M.T. FADEL

MEMBRES DU JURY :

PRESIDENT : M. RAJAGOPALAN

MEMBRES : MM. LAPORTE
LEDOEUF
HAYON

NOUS AVONS L'AGREABLE DEVOIR DE REMERCIER TOUTE PERSONNE AYANT AIDEE
A LA PREPARATION DE CE TRAVAIL.



NOUS AVONS L'AGREABLE DEVOIR DE REMERCIER TOUTE PERSONNE AYANT AIDEE
A LA PREPARATION DE CE TRAVAIL.



H ABLE. DES MATIERES

INTRODUCTION

CHAPITRE : I

GENERALITES

CHAPITRE : II

MOMENT D'INERTIE

COURBE DE VARIATION DU COUPLE RESISTANT DE FROTTEMENT EN FONCTION DE LA VITESSE

1- Introduction

2- Description sommaire d'une machine asynchrone

3- Etude des frottements

4- Expression générale du couple de frottement et de ventilation en fonction de la vitesse

5- Moment d'inertie

6- Courbe de variation du couple résistant de frottement en fonction de la vitesse

CHAPITRE : III

MESURE DE LA VITESSE

1- Introduction

2- Emploi d'une dynamo tachymétrique

3- Emploi d'un alternateur tachymétrique

CHAPITRE : IV

CARACTERISTIQUE MECANIQUE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

- 1-Commentaire sur le programme de la détermination du couple
- 2- Caractéristique mécanique dynamique
- 3- Couple transitoire au démarrage
- 4- Caractéristique mécanique statique

CHAPITRE : V

ESSAIS & ERREURS

- 1- Représentation schématique
- 2- Appareillage
- 3- Montage mécanique
- 4- Précision de la méthode

ANNEXES

Calcul d'intégrales

Résolution des systèmes linéaires

Lissages de courbes et approximation de fonctions

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

- ^o INTRODUCTION -



Lors du travail d'un moteur électrique il y a transformation de l'énergie électrique venant du réseau en énergie mécanique. L'énergie est transmise par le champ magnétique, à travers l'entrefer, du stator au rotor.

Le couple développé dans le rotor entraîne la charge à une certaine vitesse qui pourrait être déterminée à partir des caractéristiques mécaniques du moteur.

On appelle caractéristique mécanique du moteur (ou caractéristique COUPLE / VITESSE) d'un moteur électrique la variation de son couple en fonction de la vitesse, c'est à dire $C = F(\Omega)$

Le Fonctionnement correct et l'exploitation économique d'un moteur électrique, actionnant une charge, nécessitent donc l'étude de sa caractéristique mécanique.

La caractéristique mécanique et autres caractéristiques d'un moteur électrique, qui déterminent ses propriétés, peuvent être trouvées par une étude expérimentale de la machine en charge. Mais l'essai en charge est parfois difficile ou même impossible lorsqu'il s'agit des machines de très grande puissance.

Ces caractéristiques peuvent être aussi établies à l'aide du diagramme du cercle construit en partant des données obtenues lors des essais à vide et en court circuit ou des données théoriques.

Mais le " diagramme du cercle " , lieu géométrique de l'extrémité du vecteur du courant primaire I_1 pour $U_1 = Cte$, lorsque le glissement varie de $(- \infty, + \infty)$, représente un cercle seulement dans le cas où les paramètres de la machine sont constants et ne dépendent pas du courant et du glissement.

Cette dernière condition n'est pas satisfaite étant donné que tous les paramètres de la machine sont variables; vu que les résistances dépendent de la température des enroulements et les réactances inductives sont déterminées par le degrés de saturation du fer par le Flux principal ou les Flux de dispersion.



Nous présentons ici une méthode de détermination de la caractéristique mécanique à partir de la courbe de variation de la vitesse en fonction du temps pendant le démarrage, sous pleine tension et à vide du moteur.

Notons que la méthode est basée essentiellement sur le calcul numérique.

Dans un premier chapitre nous déterminerons la courbe de variation du couple résistant de frottement en fonction de la vitesse ainsi que le moment d'inertie à partir d'un essai de ralentissement du moteur.

Un chapitre important est consacré aux différentes méthodes de mesure de la vitesse pendant le démarrage.

Dans le chapitre qui suit nous déterminons la courbe de variation du couple moteur en fonction du temps pendant le démarrage.

Le dernier chapitre traitera des erreurs de la chaîne de mesure et du calcul numérique.

Les essais ont été faits sur une machine asynchrone à rotor bobiné et les calculs sur l'ordinateur I.B.M. II30 de L'E.N.P.A.

- (C H A P I T R E I -



GENERALITES

Lorsqu'on met sous tension un moteur électrique, son rotor se met en vitesse puis se stabilise à une vitesse donnée.

Nous allons examiner le phénomène assez bref que constitue le démarrage.

A l'établissement de la tension, alors que la vitesse est pratiquement nulle, le couple fourni par le moteur est C_d (couple de démarrage) Au fur et à mesure que la vitesse augmente le point figuratif suit la courbe $C_m = F(\Omega)$ qui est la caractéristique mécanique.

Mais dans le même temps les frottements dans les parties mobiles du moteur opposent un couple résistant C_r qui varie en fonction de la vitesse.

L'arbre du moteur est finement sollicité par le couple accélérateur $C_m - C_r$ égal au couple d'inertie Si J caractérise le moment d'inertie des masses tournantes, la vitesse angulaire Ω de l'arbre du moteur obéit à chaque instant à l'équation différentielle :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + C_r = C_m \quad (1)$$

Il en résulte que la loi de variation de la vitesse en fonction du temps pendant le démarrage s'exprime par une courbe

variant avec le couple accélérateur, c'est dire dépendant du moteur.

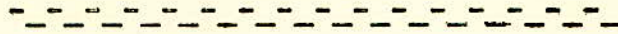
Pour la détermination de la courbe de variation du couple en fonction de la vitesse on se servira de la relation

(1) après avoir déterminé C_r et J

CHAPITRE II

MOMENT D'INERTIE

COURBE DE VARIATION DU COUPLE RESISTANT DE FROTTEMENT EN FONCTION DE LA VITESSE



1 - INTRODUCTION

L'Étude du démarrage, comme on vient de le voir nécessite la connaissance du moment d'inertie des masses tournantes ramené à l'arbre du moteur et la loi de variation du couple résistant dû aux frottements, en fonction de la vitesse. Ceci oblige une parfaite connaissance des frottements qui se produisent dans le moteur.

La détermination du moment d'inertie et de la courbe de variation du couple résistant de frottement en fonction de la vitesse se fait à partir d'une essai de ralentissement du moteur au cours duquel on relève la courbe de variation de la vitesse en fonction du temps.

2 - DESCRIPTION SOMMAIRE D'UNE MACHINE ASYNCHRONNE.

Avant d'aborder l'étude des frottements nous donnons une description sommaire d'une machine asynchrone cela va nous permettre de définir les organes essentiels, dont la connaissance est nécessaire pour l'étude des frottements.

Un moteur asynchrone possède une carcasse munie intérieurement d'un circuit magnétique constitué d'un empilage de toles en fer au silicium dont les encoches contiennent des spires de fil de cuivre composant les enroulements.

L'ensemble de ces éléments constitue le stator.

De part et d'autre du stator sont montés deux paliers qui permettent généralement par l'intermédiaire de roulements à billes ou à rouleaux, la rotation d'un arbre sur lequel est calé le rotor, lui-même constitué d'un empilage de tôles magnétiques de même nature que celles du stator, et, comme elles, munies d'encoches.

Dans les moteurs à cage les encoches sont occupées par des barreaux en aluminium ou en cuivre dont les extrémités de part et d'autre des tôles, sont court-circuitées entre elles par des joues.

Dans les moteurs à rotor bobiné les encoches rotoriques sont occupées par des spires en fil de cuivre isolé constituant des enroulements ouverts, généralement couplés en étoile et dont les extrémités libres sont connectées à des bagues sur l'arbre et tournant avec lui. Sur ces bagues frottent des balais en charbon spécial par l'intermédiaire desquels il est possible, soit de court-circuiter les enroulements rotoriques soit de les fermer électriquement à travers des résistances.

L'arbre dépasse de l'un des paliers de façon à permettre la prise de force mécanique, tandis qu'à sa seconde extrémité il entraîne généralement un ventilateur soufflant de l'air sur la carcasse pour en assurer le refroidissement. Un capot protège le ventilateur contre les contacts accidentels.

"2 - ETUDE DES FROTTEMENTS

3-1 - Différents types de frottements.

On observe toujours le phénomène de frottement quand des corps quelconques solides, liquides ou gazeux, en contact sont en mouvement l'un par rapport à l'autre ou bien lorsqu'ils sont soumis à l'action de forces susceptibles de provoquer leur mouvement relatif.

Pendant le mouvement relatif de deux corps solides en contact, pressés l'un contre l'autre par une certaine force, une force s'opposant au mouvement relatif agit sur les surfaces en contact. Cette force s'appelle force de frottement.

Pendant le mouvement relatif de deux corps solides en contact il peut y avoir glissement ou roulement d'un corps par rapport à l'autre, en fonction de quoi il se crée soit le frottement de glissement, soit le frottement de roulement, ou soit encore simultanément ces types de frottements.

L'Expérience montre que la force de frottement de glissement diminue si la surface de contact des corps solides est lubrifiée. Si les deux surfaces en contact sont complètement séparées par une couche de lubrifiant, le frottement s'appelle alors frottement fluide; en l'absence totale de lubrifiant, le frottement s'appelle le frottement sec. Si les deux surfaces ne sont pas séparées par une couche de lubrifiant le frottement s'appelle alors semi-fluide ou semi-sec.

3 - 2 - FROTTEMENTS DANS LES PALIERS DES GLISSEMENTS

Selon la loi générale du frottement, le couple résistant de frottement dans les paliers s'exprime de la façon suivante :

$$C_{fp} = K_f F_t = K_f f_t d_t l_t$$

où

K_f est le coefficient de frottement;

F_t est la pression totale sur le tourillon;

f_t est la pression spécifique sur le tourillon

d_t et l_t sont respectivement le diamètre et la longueur du tourillon.

Pour la lubrification des paliers on utilise de l'huile. Au repos, l'huile se trouvant entre les parties frottantes est chassée et le métal du tourillon est en contact direct avec le métal du coussinet.

Lorsque l'arbre tourne l'huile est entraînée par le tourillon et produit dans l'espace entre la surface de l'arbre et celle du coussinet une pression augmentée qui maintient l'arbre suspendu de sorte qu'entre les surfaces frottantes apparaît une fine pellicule d'huile.

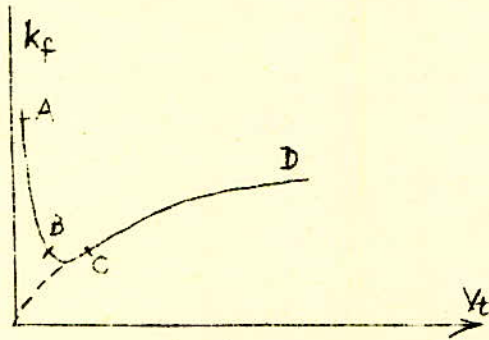
De nombreuses études ont montré que le coefficient de frottement K_f est inversement proportionnel à la pression spécifique f_t , inversement proportionnel à la température du palier et dépend de façon variable de la vitesse à la périphérie du tourillon v_t .

$$K_f = (h \ v_t^x) / f_t$$

.../...

h est une constante dont la valeur dépend du genre d'huile et du jeu dans le palier.

La variation du coefficient de frottement k_f est enregistrée par la courbe de la figure:



- A B frottement sec
- B C frottement mixte
- C D frottement fluide (allure parabolique)

En introduisant la valeur de k_f dans l'égalité (2.1) on obtient pour le couple de frottement dans les paliers l'expression suivante :

$$C_{fp} = \frac{h}{C_t} d_t \cdot l_t \cdot v_t^{0,5} = k_p \cdot v_t^{0,5} \quad (2.2)$$

De l'expression (2.2) on peut tirer une conclusion importante selon laquelle le couple C_{fp} ne dépend pas de la pression spécifique, donc ne dépend pas de la charge de la machine.

3 - 2 - FROTTEMENTS DANS LES PALIERS DE ROULEMENT.

Fait partie de ce groupe de paliers les roulements à billes utilisés dans les petites machines et les roulements à rouleaux utilisés dans les machines de puissance moyenne.

Comparés aux paliers de glissement les paliers de roulement présentent plusieurs avantages : un coefficient de frottement beaucoup plus petit et des dimensions réduites.

Le couple de frottement dans les paliers de roulement est calculé d'après la formule:

$$(2,1) \quad C_{fp} = k_f \frac{F}{D_b}$$

où F représente la charge sur la bague du palier

D_b le diamètre de la circonférence passant par les Centres des billes ou des rouleaux.

3 - 4 - FROTTEMENT DES BALAIS.

Soit k_f le coefficient de frottement des balais contre le collecteur ou contre la bague; f_b la pression spécifique exercée sur le balai; S_b la surface de contact avec le collecteur ou la bague. On a

$$C_{fb} = k_f f_b S_b$$

Le coefficient k_f varie sensiblement avec la vitesse et dépend des matériaux en contact.

3 - 5 - COUPLE RESISTANT DE VENTILATION

Dans les machines à ventilateur incorporé on a

$$C_{rv} = k_v \cdot V \cdot v$$

où V est la quantité d'air de ventilation,
v la vitesse à la périphérie du ventilateur.

Etant donné que la quantité d'air V est proportionnelle à la vitesse v, le couple résistant de ventilation sera proportionnel au carré de la vitesse v

$$C_{rv} = K_v v^2$$

4 - EXPRESSION GENERALE DU COUPLE DE FROTTEMENT ET DE VENTILATION EN FONCTION DE LA VITESSE.

4 - 1 - COUPLE RESISTANT TOTAL

L'Etude des lois du frottement est très difficile parceque les causes du frottement sont très complexes et dépendent d'un nombre considérable de paramètres. Les formules établies précédemment ne sont alors qu'approximatives. Cependant nous pouvons obtenir les résultats satisfaisants en les utilisant.

L'Expression du couple résistant total s'écrit alors:

$$C_r = C_{fp} + C_{fb} + C_{rv} = \\ = A_0 + A_1 \Omega + A_2 \Omega^2 + A_3 \Omega^{0,5}$$

Ω étant la vitesse angulaire de l'arbre (rad/sec)

4 - 2 - EQUATION DU MOUVEMENT DE ROTATION DE L'ARBRE PENDANT LE RALENTISSEMENT.

Lorsqu'on débranche un moteur de réseau, son rotor ralentit puis s'arrête. Lors du ralentissement la vitesse angulaire obéit à l'équation différentielle.

$$J \frac{d\Omega}{dt} + I_0 + I_1 \Omega + I_2 \Omega^2 + I_3 \Omega^{0,5} = 0 \quad (2.3)$$

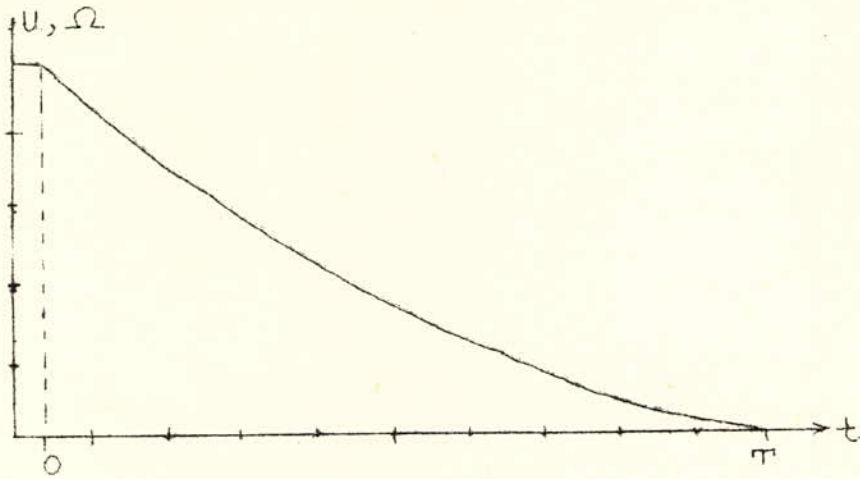
4 - 3 DETERMINATION DES COEFFICIENTS A_0, A_1, A_2, A_3

L'équation peut se mettre sous la forme :

$$(2, 4) \quad a_0 + a_1 \Omega + a_2 \Omega^2 + a_3 \Omega^{0,5} = - \frac{d\Omega}{dt}$$

en posant:

$$a_0 = \frac{I_0}{J}; \quad a_1 = \frac{I_1}{J}; \quad a_2 = \frac{I_2}{J}; \quad a_3 = \frac{I_3}{J}$$



Courbe de variation de la vitesse en fonction du temps du ralentissement.

Calibre : 10 V/div

vitesse de balayage: 1 s/div

Multiplions les deux membres de l'égalité (24) par un polynome $P_i(t)$ s'annulant pour 0 et T, on aura:

$$a_0 P_i(t) + a_1 \Omega P_i(t) + a_2 \Omega^2 P_i(t) + a_3 \Omega^{0,5} P_i(t) =$$

et en intégrant entre 0 et T
$$= - \frac{d\Omega}{dt} P_i(t)$$

$$a_0 \int_0^T P_i(t) dt + a_1 \int_0^T \Omega P_i(t) dt + a_2 \int_0^T \Omega^2 P_i(t) dt + a_3 \int_0^T \Omega^{0,5} P_i(t) dt$$

$$= - \int_0^T P_i(t) \frac{d\Omega}{dt} dt = \int_0^T \Omega P_i'(t) dt$$

Si P_i représente l'un des quatres polynomes

$$P_1 = t (t-T)$$

$$P_2 = t (t-T) (t-T/2)$$

$$P_3 = t (t-T) (t-2T)$$

$$P_4 = t (t-T) (t-3T)$$

et nous multiplions tour à tour les membres de l'égalité(2,4) par les polynomes $P_i(t)$ nous obtenons un système de quatre équations à quatre inconnues.

$$C_{i1} a_0 + C_{i2} a_1 + C_{i3} a_2 + C_{i4} a_3 = B_i$$

où

$$C_{i1} = \int_0^T P_i(t) dt$$

$$C_{i2} = \int_0^T \Omega P_i(t) dt$$

$$C_{i3} = \int_0^T \Omega^2 P_i(t) dt$$

$$C_{i4} = \int_0^T \Omega^{0,5} P_i(t) dt$$

$$B_i = \int_0^T \Omega P_i'(t) dt$$

Le calcul des intégrales C_{ij} et B_i et la résolution du système d'équation se font numériquement .

Pour cela nous prenons ND points sur la courbe de ralentissement entre 0 et T avec un pas constant BTD

Les programmes de calcul d'intégrale et de résolution des systèmes d'équations algébriques sont donnés en Annexe.

§- Moment d'inertie.

Dans le paragraphe précédent on a déterminé le coefficient $a_o = A_o / J$, A_o est un couple résistant de frottement ne dépendant pas de la vitesse, nous pourrions donc le mesurer alors que la machine est à l'arrêt.

La méthode consiste à enrouler une corde (un ou deux tours) sur l'arbre du moteur, à l'extrémité inférieure de la corde est suspendu un poids réglable ou un plateau portant des poids.

Au moment où il y aura égalité entre le couple de frottement a_o et de celui exercé par le poids, le rotor commence à tourner si d est le diamètre de l'arbre.

si P le poids suspendu à la corde on aura

$$A_o = 9,8I \times P \times d / 2$$

Nous en déduisons le moment d'inertie.

$$J = A_o / a_o$$



6- Courbe de variation du couple désistant de frottement en fonction de la vitesse

Vu la diversité des modes de construction des machines électriques et la complexité de l'étude des frottements qui s'y produisent, il sera préférable de déterminer expérimentalement la courbe de variation du couple résistant de frottement.

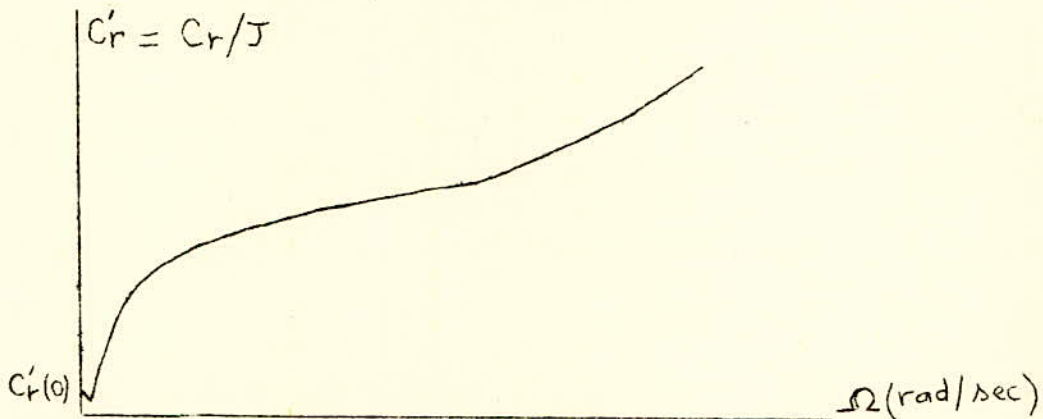
Nous partons de la courbe de variation de la vitesse au ralentissement et de l'équation différentielle.

$$J \frac{d\Omega}{dt} + C_r = 0$$

$$\frac{C_r}{J} = C'_r = - \frac{d\Omega}{dt}$$

Nous approximations la courbe $\Omega(t)$ par une exponentielle et nous tirons la dérivée $d\Omega/dt$

Nous obtenons ainsi la courbe de la **figure**



Le moment d'inertie est donnée par

$$J = A_0 / C'_r(0)$$

CHAPITRE III

MEASURE DE LA VITESSE

1 - INTRODUCTION :

La vitesse angulaire des objets en mouvement est déterminée ordinairement par le nombre de rotations effectués pendant l'unité de temps.

Pour la mesure de la vitesse angulaire on emploie généralement des transducteurs électromagnétiques connus sous le nom de tachymètres.

Les transducteurs électromagnétiques sont à aimants permanent.

Deux variantes sont possibles :

- La première variante, plus fréquemment rencontrée dans les applications, consiste en un circuit magnétique fixe et en un aimant permanent qui tourne avec la pièce en mouvement.
- Dans le cas de la deuxième variante l'aimant permanent fait partie du circuit magnétique fixe.

Dans les deux cas, une variation du flux magnétique a lieu qui cause l'apparition d'un signal aux bornes de l'enroulement réalisé sur le circuit magnétique.

Les procédés de la mesure de la vitesse sont très nombreux et les critères retenus pour les comparer sont la précision et la facilité de mise en œuvre :

Nous pouvons classer les transducteurs électromagnétiques en deux types en distinguant :

- les dynamos qui délivrent une tension continue.
- les alternateurs qui délivrent une tension approximativement sinusoïdale.

2. EMPLOI D'UNE DYNAMO TACHYMETRIQUE

2.1 CONSTITUTION

Une dynamo tachymétrique comprend deux parties principales :

- Une partie fixe destinée à créer le flux magnétique .
- Une partie mobile dans laquelle a lieu la transformation de la vitesse en un signal électrique.

Elle comprend une armature dentée, un enroulement placé sur cette armature et un collecteur sur lequel frottent des balais connectés au circuit extérieur :

2.2 REPARTITION DE L'INDUCTION DANS L'ENTREFER.

La courbe de répartition de l'induction sous un pôle a une forme trapézoïdale que nous pourrions développer en une série d'harmoniques comprenant l'harmonique fondamental et les harmoniques d'ordre supérieur.

En négligeant les harmoniques d'ordre supérieur nous pouvons considérer que l'induction dans l'entrefer sous les pôles est répartie sinusoidalement.

2.3 FORCE ELECTROMOTRICE INDUITE.

Lorsque l'induit tourne à une vitesse constante dans un champ sinusoidal, une section de l'enroulement est l'objet d'une fem induite qui varie sinusoidalement dans le temps. La fem de la section peut être représentée par un vecteur qui est égal en amplitude à la fem de la section et tournera à la vitesse :

$$\omega = 2 \pi f$$

La projection du vecteur sur l'axe des ordonnées est la valeur instantanée de la fem dans la section .

Examinons maintenant le processus d'induction de la fem dans l'enroulement de l'induit.

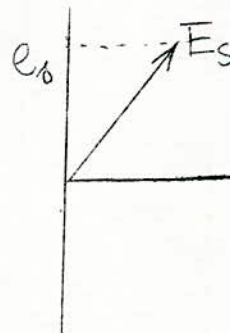
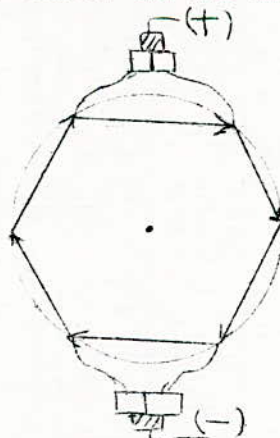
Etant donné que les sections de l'enroulement d'induit sont réparties sur la circonférence de ce dernier de façon uniforme, chaque section est décalée de la section voisine d'un angle :

$$\alpha = (p * 2) / S$$

S étant le nombre de sections.
p le nombre de paires de pôles.

Etant donné que toutes les bobines de l'enroulement d'induit sont connectées en série, les fem induites dans les sections se composent géométriquement.

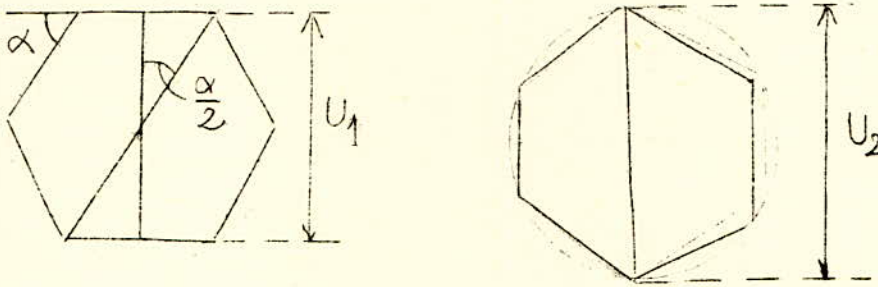
A cet effet si on trace tous les vecteurs on obtient un polygone :



2.4 ONDULATION DE LA TENSION AUX BALAIS.

Pour un nombre fini de sections de l'enroulement de l'induit la tension aux balais, placés aux lignes neutres théoriques du collecteur, varie entre certaines limites en fonction de la position de l'induit.

En effet, par l'examen du polygone des fem, nous voyons que la tension aux balais varie de U_1 à U_2 pour reprendre ensuite la valeur U_1 ainsi de suite ...



Les ondulations de la tension aux balais sont importantes, si le polygone des fem comprend un nombre pair de cotés.

La valeur moyenne de la tension aux balais est égale à la demi somme des tensions U_1 et U_2 , c'est à dire :

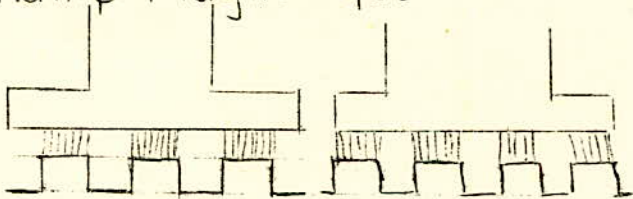
$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{2} U_2 \left(1 + \cos \frac{\alpha}{2} \right)$$

Cette tension est supérieure à U_1 et inférieure à U_2 d'une valeur:

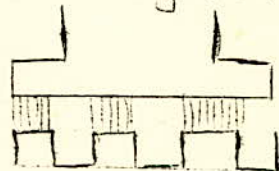
$$\Delta U = \frac{1}{2} U_2 \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right)$$

L'induit étant denté la tension peut avoir des ondulations supplémentaires provoquées par les oscillation longitudinales et transversales du flux magnétique.

ondulations longitudinales du champ magnétique



ondulations transversales du flux magnétique



La valeur moyenne de la tension aux balais est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit, vu que le flux magnétique utile est

créé par l'aimant permanent est constante :

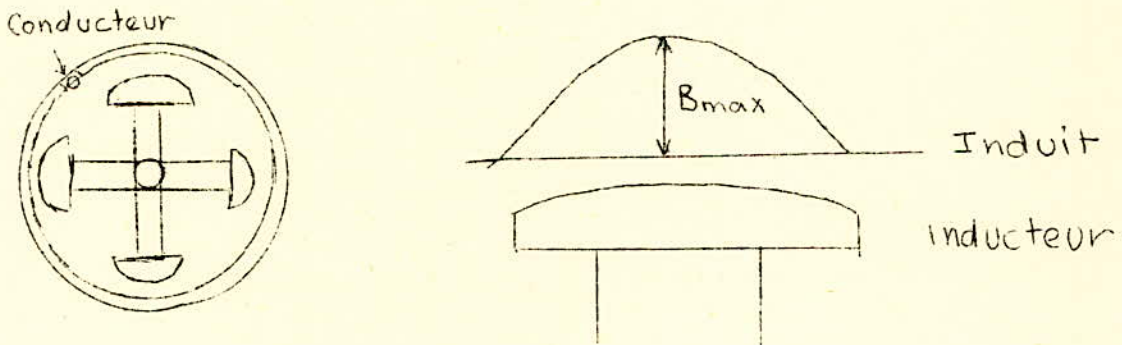
$$U = k \Omega$$

k étant une constante qui dépend des paramètres de la dynamo

3 - EMPLOI D'UN ALTERNATEUR TACHYMETRIQUE.

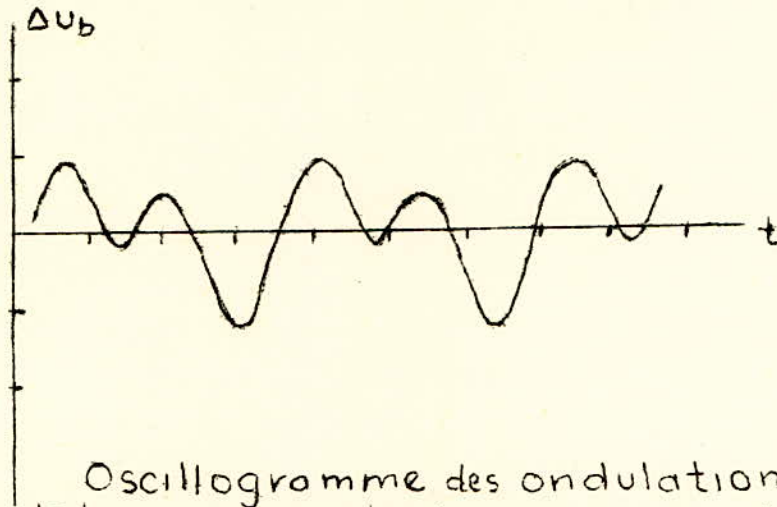
La répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer d'un alternateur tachymétrique, est sinusoïdale.

A un double pas polaire, suivant la circonférence de l'induit, correspond une sinusoïde de la courbe de répartition de l'induction:



Examinons le phénomène de la formation d'une fem dans un conducteur de l'enroulement, placé sur le circuit magnétique fixe, de l'alternateur.

Admettons que suivant toute la longueur de la partie active du conducteur, c'est à dire de sa partie qui coupe les lignes de champ magnétique, l'induction B a la même valeur.

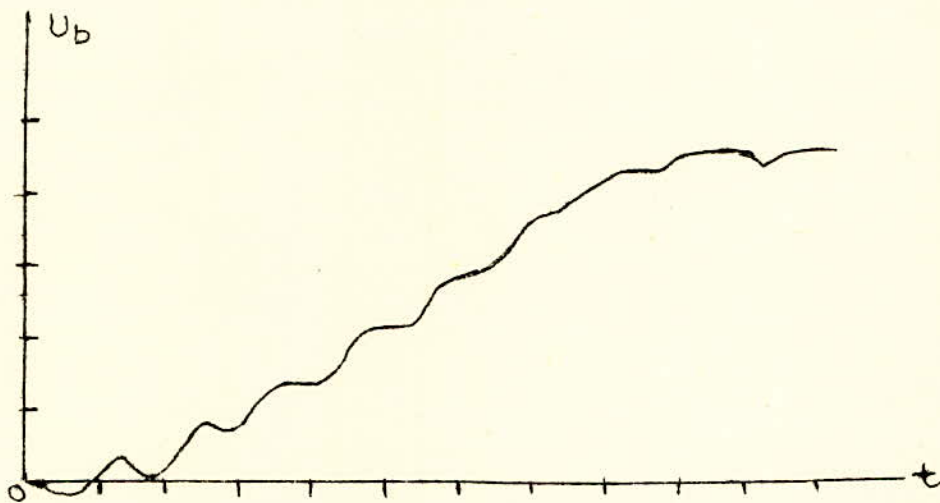


Oscillogramme des ondulations de tension aux balais par rapport à la valeur moyenne de la tension

Ici, pour une dynamo : 0,06 V/(tr/mn)

vitesse de rotation : 1500 tr/mn

Oscilloscope { Calibre : 0.5 V/div
vitesse de balayage : 20 ms/div



- Courbe de variation de la tension aux balais en fonction du temps pendant le démarrage

20 V/div
20 ms/div

Si l'on désigne par v la vitesse de rotation du conducteur par rapport au champ magnétique, d'après la loi de l'induction électromagnétique formulée par Faraday, la valeur instantanée de la fem, induite dans le conducteur lors de la rotation de l'inducteur, est déterminée par la formule :

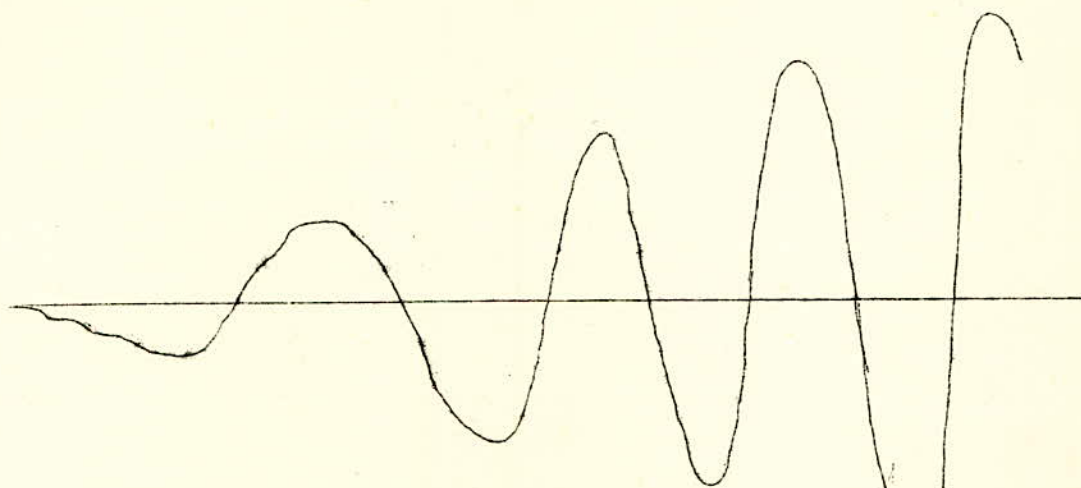
$$e_c = B_x l v$$

B_x : induction magnétique à l'endroit où le conducteur se trouve à l'instant considéré.

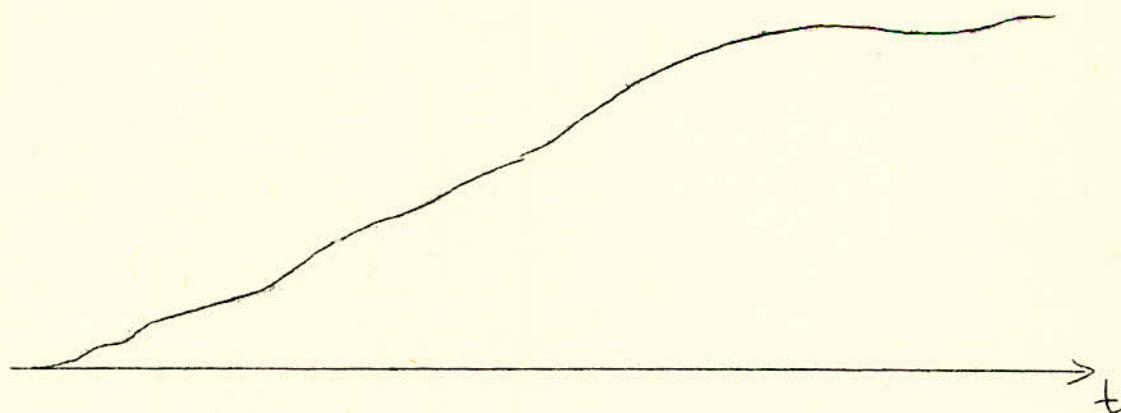
l : longueur active du conducteur .

De cette façon, dans les conditions examinées la variation de la fem dans le conducteur en fonction du temps est entièrement déterminée par la répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer et par la vitesse.

A la vitesse constante la forme de la courbe de répartition de l'induction dans l'entrefer suivant la cir-conférence de l'induit, correspond exactement à la courbe de variation de la fem induite dans le conducteur .



Oscillogramme de la tension aux bornes
de l'alternateur pendant le démarrage



Courbe de variation de la vitesse en
fonction du temps, pendant l'essai de
démarrage

3-1- Expression de la f.e.m. pendant le démarrage

La f.e.m. totale induite dans l'enroulement, par sa forme, ne diffère pas de celle d'un seul conducteur

$$e = k e_c = k l B_x v$$

k étant une constante qui dépend du nombre de conducteurs et du type d'enroulement.

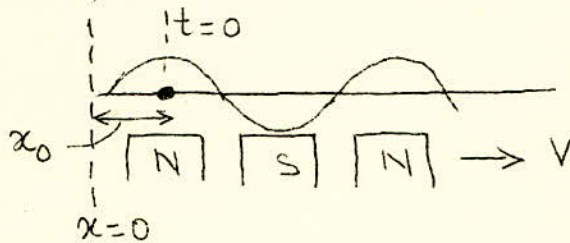
La répartition sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer se traduit par

$$B_x = B_{\max} \sin \left(\frac{2p}{\pi D} x \right)$$

p : nombre de paires de pôles
 D : diamètre de la circonférence de l'induit

$$x = x_0 + \int_0^t v(t) dt.$$

d'où



$$e(t) = k l B_{\max} v(t) \sin \left[\frac{2p}{\pi D} \left(x_0 + \int_0^t v(t) dt \right) \right]$$

où :

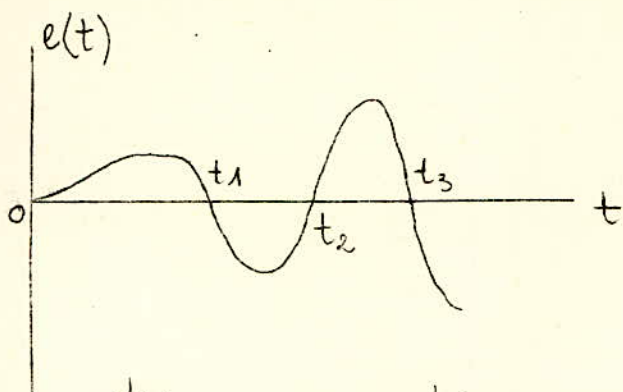
$$v = \pi D \Omega \quad \text{et} \quad x = \frac{D \theta}{2p}$$

Ω étant la vitesse angulaire et θ l'angle électrique

$$e(t) = K \Omega(t) \sin \left(\theta_0 + p \int_0^t \Omega(x) dx \right)$$

θ_0 représente la phase de démarrage de l'alternateur.

3-2 - Détermination de K et de θ_0



Soit t_1 l'instant du premier passage par zéro de $e(t)$
 Au moment du $i^{\text{ème}}$ passage de $e(t)$ par zéro, on a

$$\theta = \theta_0 + p \int_0^{t_i} \Omega(t) dt = i \times \pi$$

$$\int_0^{t_1} e(t) dt = K \int_0^{t_1} \Omega(t) \sin \left(\theta_0 + p \int_0^t \Omega(x) dx \right) dt$$

faisons le changement de variable :

$$u = \int_0^t \Omega(x) dx \quad ; \quad du = \Omega(t) dt$$

$$\int_0^{t_1} e(t) dt = K \int_0^{\int_0^{t_1} \Omega(t) dt} \sin(\theta_0 + pu) du$$

$$= -\frac{K}{p} \left(\cos \left(\theta_0 + p \int_0^{t_1} \Omega(t) dt \right) - \cos \theta_0 \right)$$

$$\int_0^{t_1} e(t) dt = \frac{K}{p} (1 + \cos \theta_0)$$

on en déduit :

$$\cos \theta_0 = \frac{p}{K} \int_0^{t_1} e(t) dt - 1$$

d'où

$$\theta_0 = \text{Arc cos} \left(\frac{p}{K} \int_0^{t_1} e(t) dt - 1 \right)$$

que : De la même manière, on montre facilement

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} e(t) dt = \frac{2K}{p}$$

d'où

$$K = \frac{p}{2} \int_{t_i}^{t_{i+1}} e(t) dt$$

3.3. - Courbe de variation de la vitesse en fonction du temps

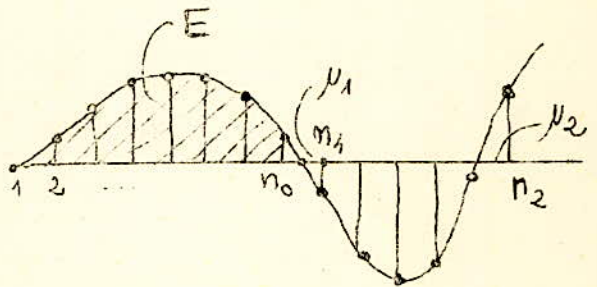
la forme : Nous partons de la relation () mise sous

$$\Omega(t) = \frac{e(t)}{K \sin(\theta_0 + p \int_0^t \Omega(x) dx)}$$

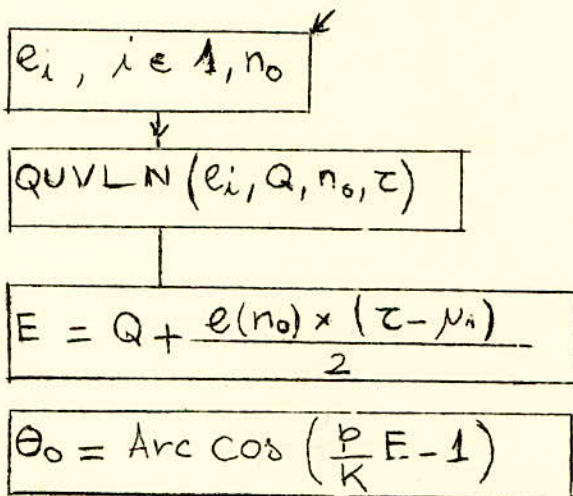
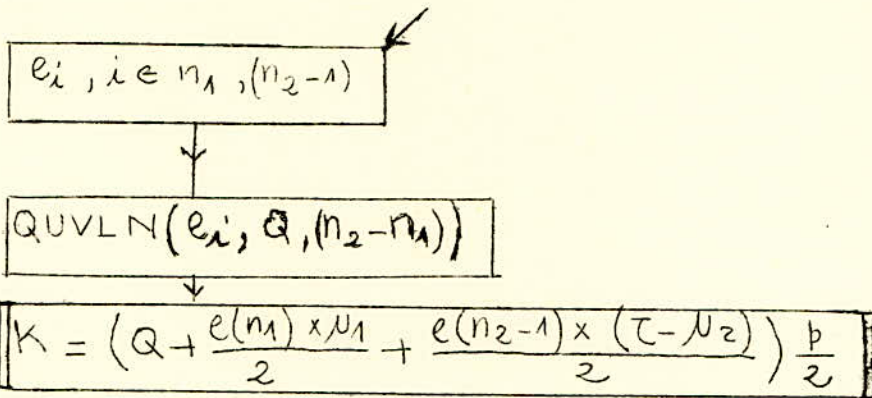
La résolution de cette équation se fait numériquement. Pour cela nous commençons par définir la courbe $e(t)$ par n couple de points :

$$t_i = (i-1)\tau, \quad e_i$$

a) Détermination de K et θ_0



- 12 -



b) Expression numérique de $p \int_0^t \Omega(x) dx$

Pour $x_i = (i-1)\tau$, on a : $p \int_0^{x_i} \Omega(x) dx = S_i$

$$S_i = S'_i + Q_i \times p \times \tau$$

$$\text{avec } S'_i = p \sum_{j=3}^{i-1} Q_j + p \frac{\tau \times \Omega_2}{2}$$

Q_i étant l'aire partielle délimitée par la courbe $\Omega(t)$, et les droites $t = \tau(i-1)$ et $t = \tau(i-2)$,
Pour le calcul de Q_i , on approxime, dans l'intervalle (Ω_{i-2}, Ω_i) , la courbe par un polynôme de degré 2

$\Omega(t) = \alpha t^2 + \beta t + \gamma$
passant par les points Ω_i, Ω_{i-1} et Ω_{i-2}

- 13 -

On obtient facilement:

$$\gamma = \Omega_i ; \beta = \frac{\Omega_i - \Omega_{i-2}}{2} ; \alpha = \frac{\Omega_i + \Omega_{i-2} - 2\Omega_{i-1}}{2}$$

et

$$Q_i = \left\{ \frac{10}{24} \Omega_i + \frac{2}{3} \Omega_{i-1} - \frac{1}{12} \Omega_{i-2} \right\}$$

c) Résolution de l'équation

$$\Omega_i = \frac{e_i}{K \sin \left\{ \theta_0 + S_i + \left(\frac{10}{24} \Omega_i + \frac{2}{3} \Omega_{i-1} - \frac{1}{12} \Omega_{i-2} \right) p\tau \right\}}$$

ou encore :

$$\Omega_i = \frac{e_i}{K \sin \left(S + p\tau \frac{\Omega_i}{12} \right)} \quad i \in 3, n$$

$$\Omega_1 = 0$$

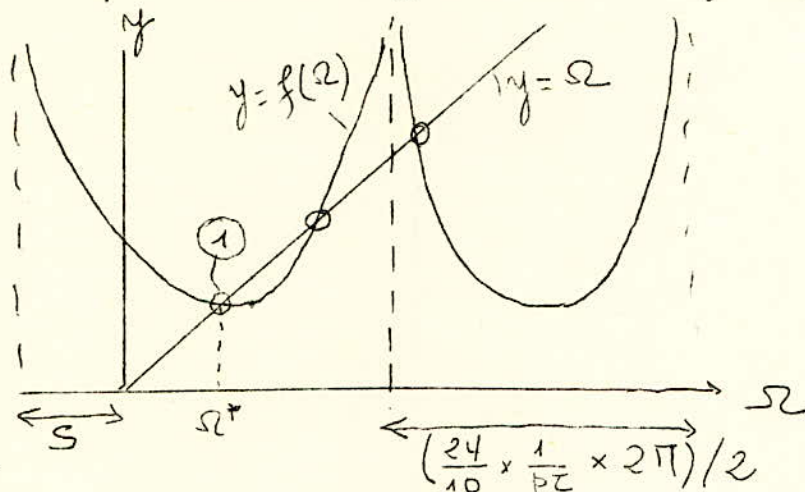
$$\Omega_2 \approx \frac{e_2}{K \sin(\theta_0)}$$

Il s'agit là de résoudre, pour chaque point, une équation de la forme:

$$\Omega = f(\Omega)$$

Il s'agit de résoudre une équation de la forme $\Omega = f(\Omega)$ pour chaque point. On peut utiliser la méthode de Newton-Raphson pour trouver la solution. La solution est obtenue en itérant la fonction $f(\Omega)$ jusqu'à convergence.

On pose : $y = \Omega$, $y = f(\Omega)$



Comme on le voit, sur le graphique ci-dessus, l'équation admet une infinité de solutions (intersections des courbes $y = f(\Omega)$ et $y = \Omega$). Le premier point d'intersection, est la solution cherchée.

Il existe plusieurs méthodes, toutes itératives, permettant la résolution des équations transcendentes, mais elles ont l'inconvénient de donner l'une quelconque des solutions.

Nous donnons ici une méthode, basée sur les itérations successives :

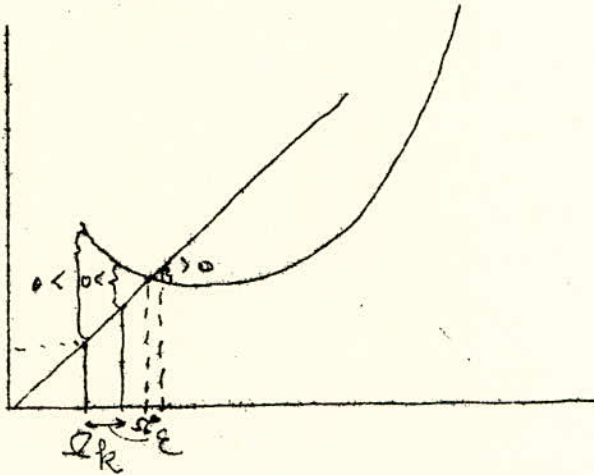
On part de $\Omega_0 = \Omega_k$ ($k = i - 1$)
on écrit

$$y_1 = \frac{e^i}{K \sin\left(s + \frac{10}{24} p\pi \Omega_k\right)}$$

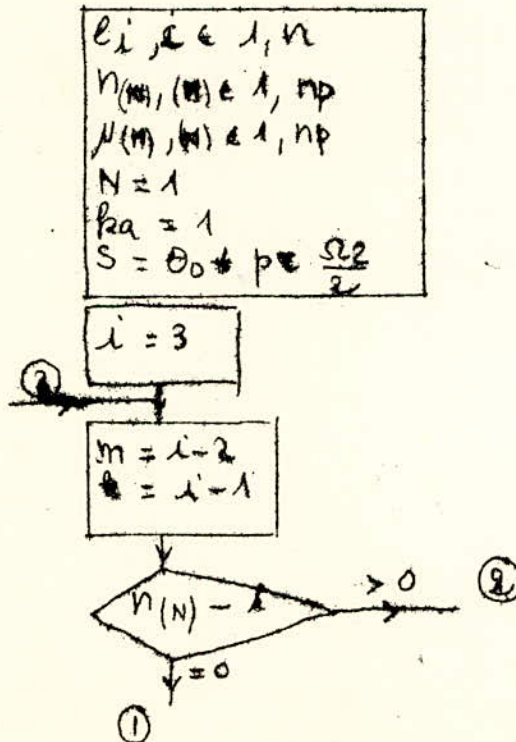
et

$$y_2 = \frac{e^i}{K \sin\left(s + \frac{10}{24} p\pi (\Omega_k + \epsilon)\right)}$$

Lorsque $(\Omega_k + \epsilon) - y_2$ et $(\Omega_k - y_1)$ ont le même signe, on ajoute ϵ à Ω_k on refait le même test jus qu'au moment où on trouve que les deux quantités ont des signes différents : la solution est alors comprise entre Ω_k et $\Omega_k + \epsilon$



L'ensemble des opérations est schématisée par le diagramme suivant :



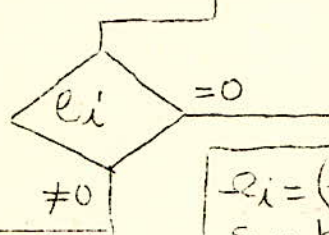
n_p : nombre de passages par zéro de $e(t)$

① ↓

$PB1 = p \cdot N(N)/2$
 $S = S + ka \cdot \pi + PB1 \times \Omega$
 $ka = ka + 1$
 $N = N + 1$

② ↓

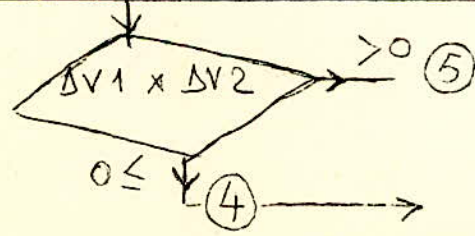
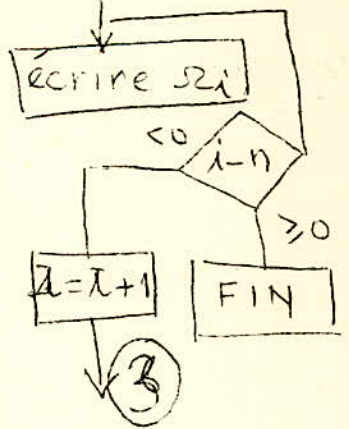
$PB1 = PE \times 10/24$
 $S = S + P \cdot \left(\frac{2}{3} \Omega R - \frac{1}{12} \Omega m \right)$

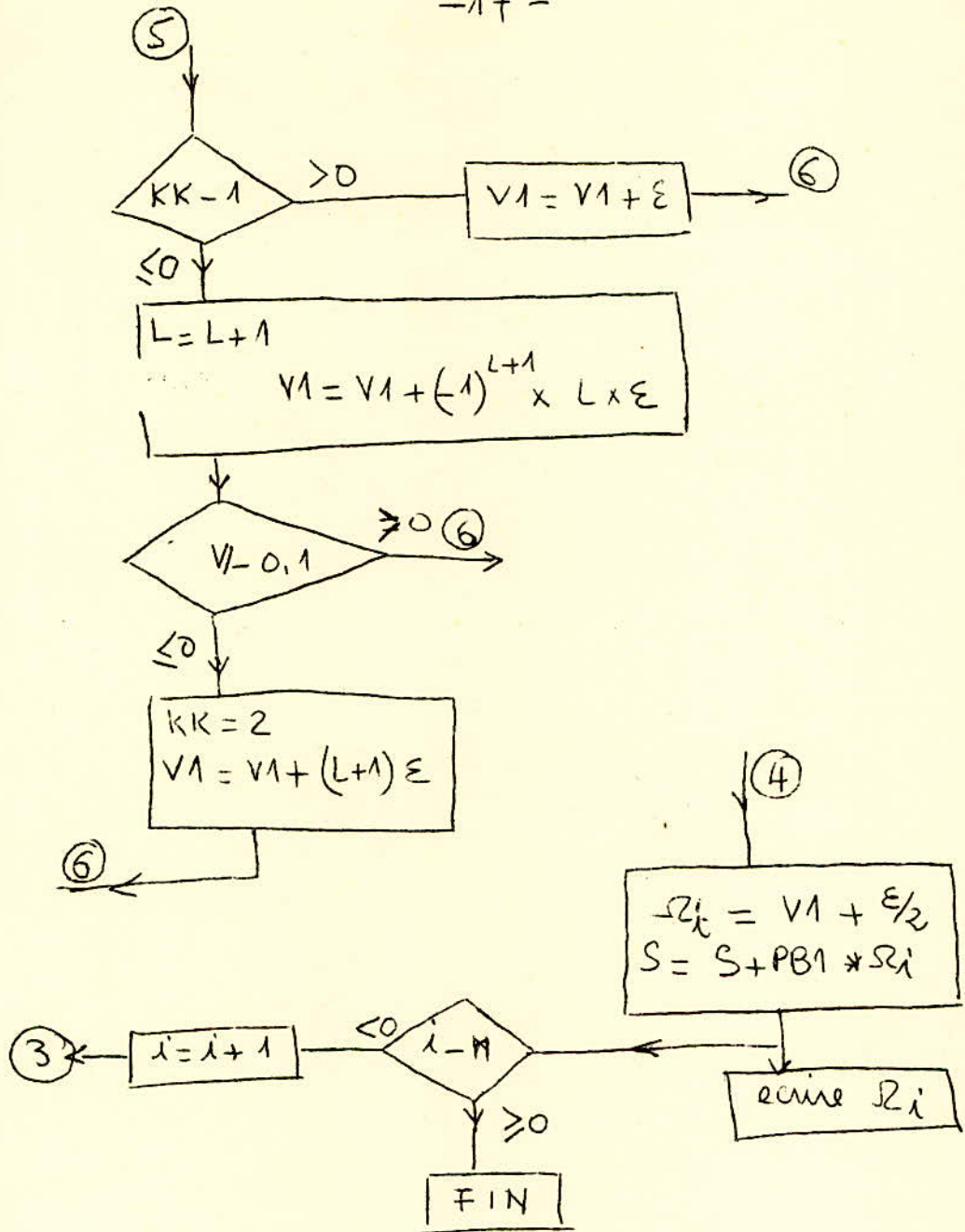


$R_i = (ka \cdot \pi - S) / PB1$
 $S = ka \cdot \pi$
 $ka = k + 1$

⑥ →

$V1 = \Omega R_i$
 $L = 0$
 $KK = 1$
 $\Omega I = \frac{e_i}{K \cdot |\sin(S + PB1 \times V1)|}$
 $V2 = V1 + \epsilon$
 $\Omega K = \frac{e_i}{K \cdot |\sin(S + PB1 \times V2)|}$
 $\Delta V1 = V1 - \Omega I$
 $\Delta V2 = V2 - \Omega K$





CHAPITRE IV

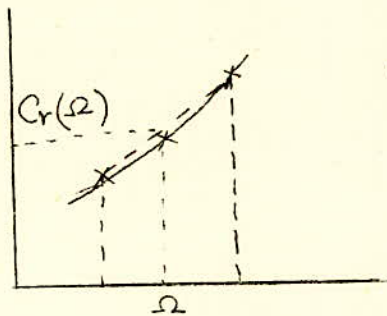
CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE.

Maintenant qu'on connaît la courbe de vitesse en fonction du temps pendant le démarrage, le moment d'inertie et la caractéristique de frottement, on peut facilement déterminer la courbe de variation du couple moteur en C_m en fonction du temps et en fonction de la vitesse pendant le démarrage.

1 - COMMENTAIRE SUR LE PROGRAMME DE LA DÉTERMINATION DU COUPLE.

On prend NM points sur la courbe de vitesse avec un pas Δt et NC points sur la courbe de frottement avec un pas DV .

Le lissage de courbe de vitesse et le calcul de la dérivée $d\Omega/dt$ est exécuté par le sous-programme LISSA.



$$C_m = J \left(\frac{d\Omega}{dt} + C_r' \right)$$

Pour la détermination résistante pour une vitesse quelconque, on localise le point Ω_1 dans un intervalle (V_k, V_{k+1}) où k représente la partie entière du rapport Ω_1 / DV puis on fait une interpolation linéaire.

$$C_{rk}' = C_r'(k) + (C_r'(k+1) - C_r'(k)) \cdot (\Omega_1 - V_k) / DV.$$

Finalement :

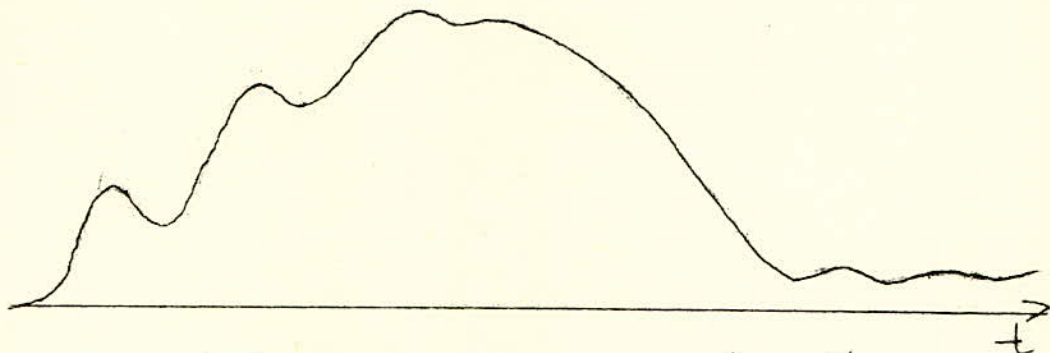
$$C_{mi} = J \cdot \left(\left(\frac{d\Omega}{dt} \right)_i + C_{rk}' \right)$$

- 2 - CARACTERISTIQUE MECANIQUE DYNAMIQUE

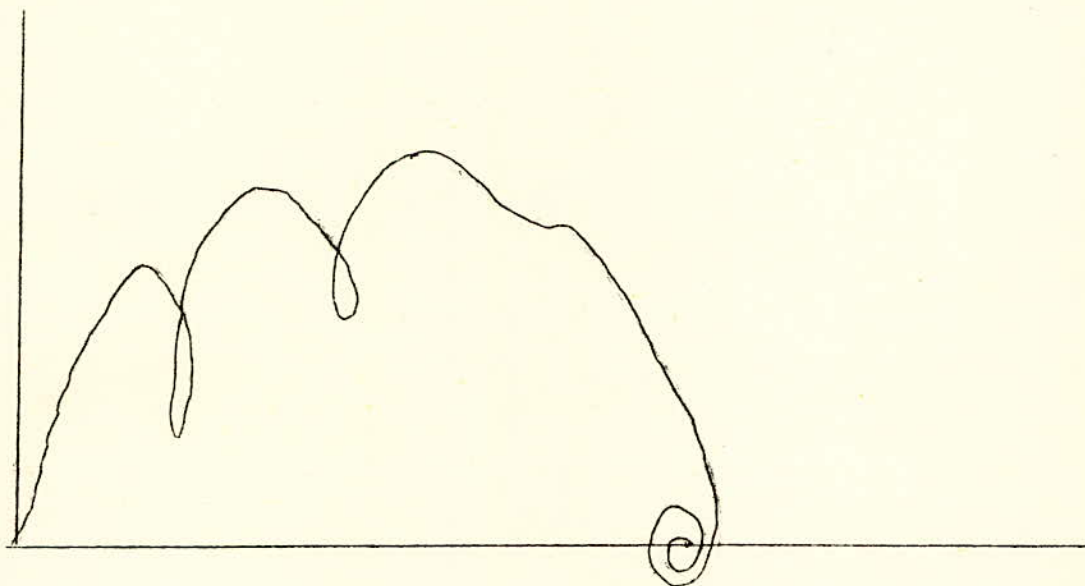
Les figures (a et b) montrent les graphiques de variation du couple moteur en fonction du temps et de la vitesse pendant le démarrage . On note que les points de la caractéristique mécanique de la figure (b), dite dynamique, ne répondent pas à la valeur permanente du couple pour une vitesse de rotation donnée..

L'analyse du processus de démarrage a été réalisée en supposant qu'à chaque valeur de la vitesse correspondait un couple bien déterminé défini par les paramètres des bobinages, la grandeur et la fréquence de la tension du réseau. Il en découlait qu'au moment du branchement du moteur sur le réseau, ses bobinages étaient instantanément parcourus par des courants déclenchant aussitôt le couple de démarrage ; ces grandeurs pouvant être calculées d'après les formules établies à partir du schéma équivalent du moteur. Cette approche de l'analyse du processus de démarrage est simpliste car elle néglige les processus transitoires électromagnétiques.

.../...



variation du couple en fonction
du temps pendant le démarrage.
fig(a)



Caractéristique mécanique
dynamique -
fig (b)

3 - COUPLE TRANSITOIRE AU DEMARRAGE

La machine asynchrone est un système complexe de circuits statoriques et rotoriques couplés magnétiquement entre eux, l'inductance mutuelle des paires distinctes de circuits variant avec la rotation du rotor.

3-I- Calcul du couple transitoire

A- Hypothèses et notations:

Nous supposons les tensions d'alimentation sinusoïdales et formant un système triphasé équilibré. Les flux créés par chaque phase sont considérés comme présentant une répartition sinusoïdale. Il n'est pas tenu compte des flux rémanents. Enfin le circuit magnétique du moteur est supposé non saturé, il ya alors proportionnalité entre les flux et les courants qui les créent.

Notations adoptées:

p : nombre de paires de pôles

R_1, R_2 : résistance d'une phase du stator, du rotor

L_1, L_2 : inductance d'une phase primaire, secondaire

M_{1ij} : inductance mutuelle entre les phases i et j du stator

M_{2ij} : inductance mutuelle entre les phases i et j du rotor

m_{sr} : inductance mutuelle entre la phase s du stator et la phase r du rotor

i_{1s} : courant dans la phase s du stator

i_{2r} : courant dans la phase r du rotor

Etant donnée la symétrie des armatures, les divers coefficients d'induction mutuelle entre les diverses phases de chaque armature sont égaux: $M_{1ij} = M_{1j}$, $M_{2ij} = M_{2j}$

D'autre part si M désigne l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor lorsque les axes sont confondus, lorsque les axes de phase des deux armatures sont décalés d'un angle électrique $p\theta$,

$$m_{11} = M \cos p\theta$$

$$m_{sr} = M \cos \left\{ p\theta + (r-s) \frac{2\pi}{3} \right\} \quad ()$$

B- Expression générale du couple:

Le courant i_{1s} crée à travers la phase r du rotor, parcourue par i_{2r} , un flux $m_{sr} i_{1s}$; le couple électromagnétique développé est donné par:

$$C_{sr} = \frac{d(m_{sr} i_{1s} i_{2r})}{d\theta}$$

ou encore

$$C_{sr} = \frac{m_{sr}}{p\Omega(t)} \frac{d(i_{1s} i_{2r})}{dt} + i_{1s} i_{2r} \frac{d m_{sr}}{d\theta}$$

Le couple total développé est la somme des 9 termes obtenus en faisant varier dans l'expression précédente s et r de 1 à 3.

Ce procédé montre qu'il est indispensable de passer par l'étude des courants et de la vitesse pour déterminer le couple

C- Etablissement des équations mécanique et électriques

Equations des tensions des trois phases au primaire:

$$V_{sm} \sin (wt + \alpha_s) = R_1 i_{1s} + \mathcal{L}_1 \frac{di_{1s}}{dt} + \frac{d}{dt} (n_{s1} i_{2r}) + \frac{d}{dt} (n_{s2} i_{22}) + \frac{d}{dt} (n_{s3} i_{23})$$

α_s sert à caractériser la phase d'enclenchement de la tension

\mathcal{L}_i désigne l'inductance cyclique $L_{11} - M_{11}$

De même les équations des trois phases rotoriques seront de la forme :

$$0 = R_2 i_{2r} + \mathcal{L}_2 \frac{di_{2r}}{dt} + \frac{d}{dt} (n_{r1} i_{1s}) + \frac{d}{dt} (n_{r2} i_{12}) + \frac{d}{dt} (n_{r3} i_{13})$$

L'équation mécanique s'écrit:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + C_r(\Omega) = C_m$$

avec
$$\Omega(t) = \frac{1}{p} \frac{d\theta}{dt}$$

Les sept équations que nous venons d'établir permettent de déterminer l'expression des 3 courants primaires, des trois courants secondaires et de la vitesse.

La difficulté de la résolution du système des sept équations différentielles non linéaires nous a amené à étudier expérimentalement les couples transitoires au démarrage par la méthode présentée précédemment.

En considérant la partie initiale du graphique de variation du couple en fonction du temps on remarque la valeur maximale du couple transitoire est très supérieure au couple de démarrage. Comme le montre le graphique de la figure (), la variation du couple tend à s'amortir.

Dans la phase finale du processus transitoire de démarrage la variation du couple a un caractère oscillatoire amorti.

L'expérience montre que la courbe de variation du couple au démarrage ne dépend ni de la phase d'enclenchement de la tension ni de la position initiale du rotor p_0 .

3-2- Expression du couple transitoire de démarrage

Lorsque l'on met sous tension le moteur asynchrone arrêté, il développe un couple présentant des oscillations dont l'amplitude peut atteindre cinq fois la valeur du couple permanent de démarrage.

Pendant l'intervalle qui débute avec la mise sous tension du stator, nous supposerons la vitesse du rotor nulle: $p_0 = p_0$.

De l'expression générale du couple et compte tenu de la relation (), le couple développé par le moteur à l'arrêt est donné par :

$$C = \sum_s \sum_r -p M i_{1s} i_{2r} \sin \left\{ p\theta_0 + (r-s) \frac{2\pi}{3} \right\}$$

Les équations des tensions des trois phases au primaire et au secondaire forment un système de six équations différentielles linéaires dont la résolution par l'intermédiaire du calcul opérationnel nous donne l'expression des trois courants primaires et des trois courants secondaires :

$$i_{11} = I_{1m} \left\{ \sin(\omega t + \alpha + \beta) + \frac{\xi_2 - R_2 T_1}{T_1 - T_2} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_2^2}{R_2^2 + \xi_2^2 \omega^2}} \sin(\alpha - \delta) \right. \\ \left. \cdot e^{-t/T_1} - \frac{\xi_2 - R_2 T_2}{T_1 - T_2} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_1^2}{R_2^2 + \xi_2^2 \omega^2}} \sin(\alpha - \varepsilon) e^{-t/T_2} \right\}$$

avec :

$$I_{1m} = \frac{V_{1m} T_1 T_2}{\xi_1 \xi_2 - \frac{9}{4} M^2} \sqrt{\frac{R_2^2 + \xi_2^2 \omega^2}{(1 + \omega^2 T_1^2)(1 + \omega^2 T_2^2)}}$$

$$\beta = \arctg \frac{\omega \{ \xi_2 (1 - \omega^2 T_1 T_2) - R_2 (T_1 + T_2) \}}{R_2 (1 - \omega^2 T_1 T_2) + \xi_2 \omega^2 (T_1 + T_2)}$$

$$\delta = \arctg \omega T_1, \quad \varepsilon = \arctg \omega T_2$$

$$T_1 = \frac{2(\xi_1 \xi_2 - \frac{9}{4} M^2)}{R_1 \xi_2 + R_2 \xi_1 \mp \sqrt{(R_1 \xi_2 - R_2 \xi_1)^2 + 9 R_1 R_2 M^2}}$$

Les courants dans les deux autres phases primaires se déduisent de l'expression de i_{11} en y remplaçant α par $\alpha - 2\pi/3$, puis $\alpha - 4\pi/3$.

Le premier des courants secondaires est donné par :

$$i_{21} = I_{2m} \left\{ \sin(\omega t + \alpha + \delta - p\theta_0) \frac{\sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}}{\omega(T_1 - T_2)} \sin(\alpha - \delta - p\theta_0) \right. \\ \left. \cdot e^{-t/T_1} + \frac{\sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}}{\omega(T_1 - T_2)} \sin(\alpha - \varepsilon - p\theta_0) e^{-t/T_2} \right\}$$

avec : $I_{2m} = \frac{3M V_{1m} \omega T_1 T_2}{2 \left(\xi_1 \xi_2 - \frac{g}{4} M^2 \right) \sqrt{(1 + \omega^2 T_1^2)(1 + \omega^2 T_2^2)}}$

$$\gamma = \arctg \frac{1 - \omega^2 T_1 T_2}{\omega(T_1 + T_2)}$$

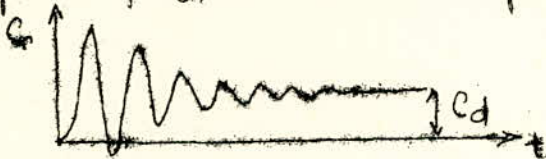
En reportant dans l'expression du couple les six courants ainsi trouvés, on obtient le couple total :

$$C = C_d \left[1 + e^{-t/T_1} \cdot e^{-t/T_2} \frac{1}{\sin(\delta - \varepsilon)} \sin(\omega t + \delta - \varepsilon) e^{-t/T_1} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sin(\delta - \varepsilon)} \sin(\omega t - [\delta - \varepsilon]) e^{-t/T_2} \right]$$

avec $C_d = \frac{g}{2} p M I_1 T_2 \sin(\beta - \delta)$

Cette expression du couple instantané de démarrage montre :

- qu'à l'instant initial le couple est nul
- que l'instant de la mise sous tension, n'intervient pas dans l'expression du couple
- que la position du rotor par rapport au stator, caractérisée par $p\theta_0$, n'intervient pas non plus.



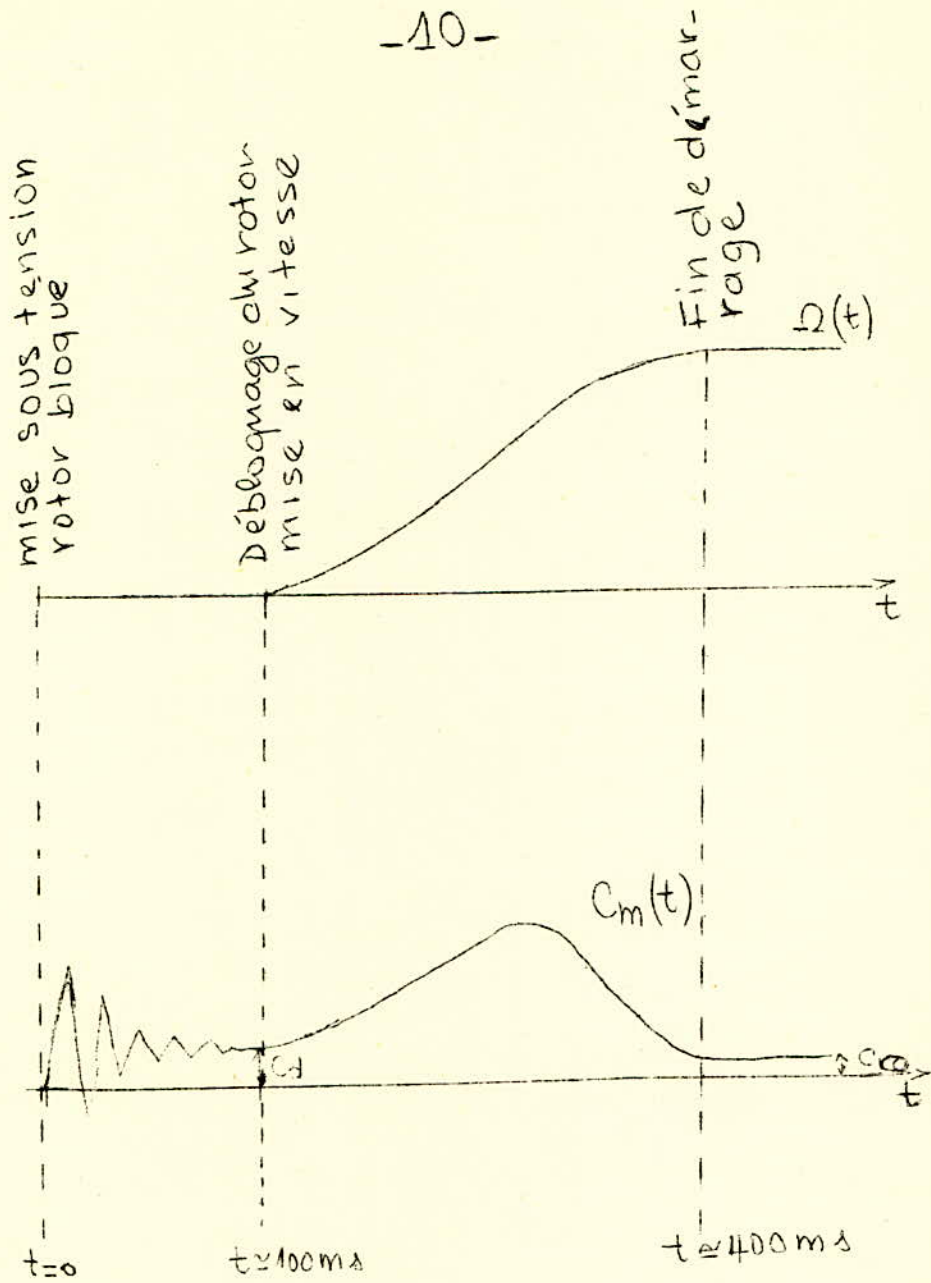
- Oscillations du couple de démarrage à la mise sous tension.

4- CARACTERISTIQUE MECANIQUE STATIQUE

La caractéristique mécanique statique est la courbe de variation du couple en fonction de la vitesse, chaque point de cette caractéristique répondant à la valeur permanente pour une vitesse de rotation donnée.

La détermination de la caractéristique mécanique statique peut se faire, du moins pour les moteurs de petite puissance, en procédant de la manière suivante:

- Nous bloquons l'arbre du moteur avant de le mettre sous tension.
- Nous mettons le moteur sous pleine tension.
- Nous observons, sur l'oscilloscope, la variation du courant primaire. Au moment où le courant atteint sa valeur permanente, nous déduisons que le couple a la valeur C_d .
- Nous débloquons l'arbre du moteur, le moteur se met alors en vitesse.
- A partir de l'enregistrement de la loi de variation de la vitesse nous déterminons la courbe de variation du couple en fonction de la vitesse. La courbe ainsi obtenue représente la caractéristique mécanique statique du moteur, les couples transitoires électromagnétiques s'étant amortis avant le démarrage.

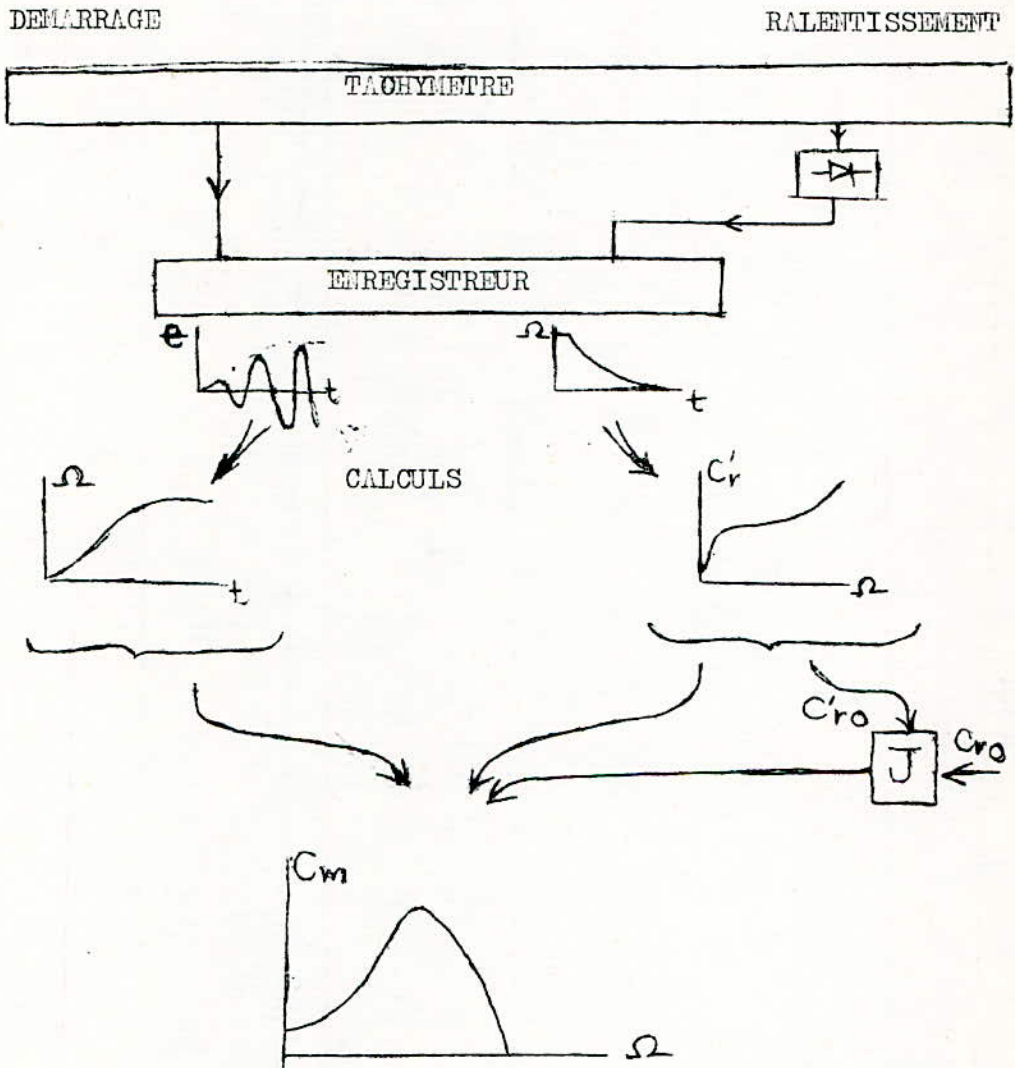


Détermination de la caractéristique mécanique statique

CHAPITRE V

ESSAIS & ERREURS

I- ~~REPR~~ I- REPRESENTATION SCHEMATIQUE



2- APPAREILLAGE :

1) - Moteur Asynchrone LEROY

Rotor Bobiné

Série : NA 13251 N° : 307 30

CV \approx 7; PH = 3; Hz = 50

(220 V ; 18 , 8 A)

(380 V ; 10, 8A)

1 435 TR/mn .

Cos = 0 , 8 5

2) - Alternateur tachymétrique : p= 3

3) - OSCILLOSCOPE HEWLETT PACKARD Modèle 1201 A.

- 2 canaux

- persistance variable

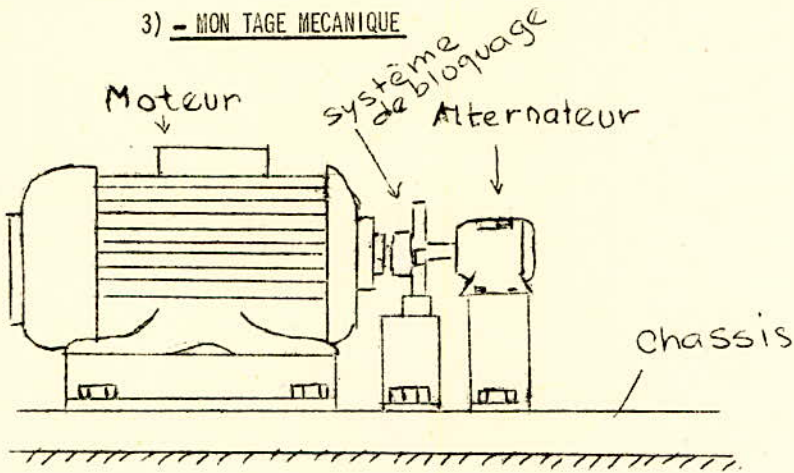
- mémoire

- entrée : 1 MEGM 45 pF

4) - CAMERA d'oscilloscope H.P. Modèle 197 A.

5) - RETROPROJECTEUR 3M

3) - MON TAGE MECANIQUE

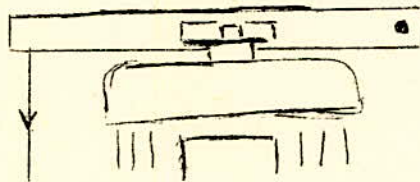
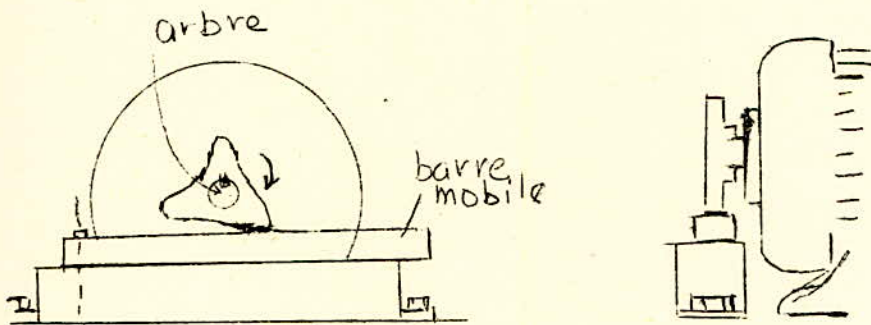


Le moteur est monté sur un chassis rigide. Il faut s'assurer qu'il ne branche pas pendant l'essai à rotor bloqué.

L'alignement du moteur et de l'alternateur doit être soigneusement réalisé.

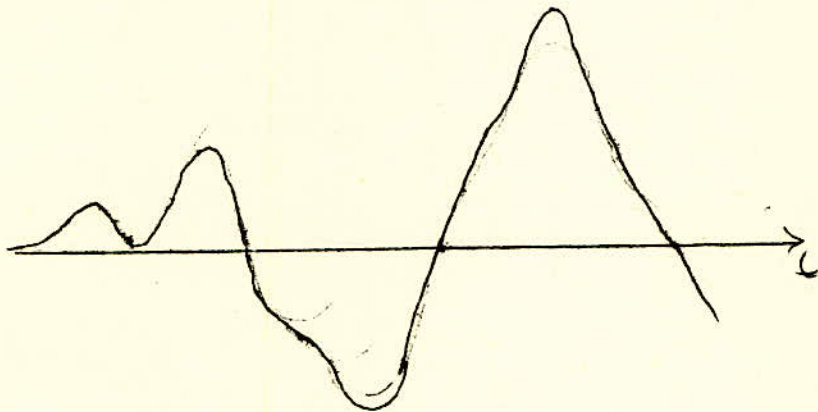
L'accouplement doit être rigide.

Pour bloquer l'arbre du moteur mis sous pleine tension, on utilise le montage suivant :

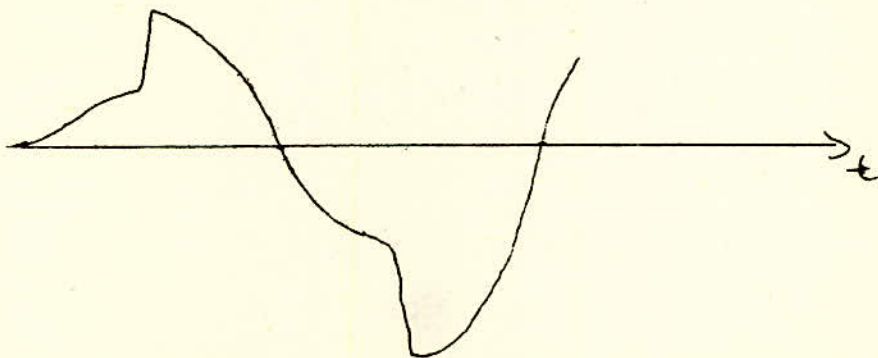


Exemples d'oscillogrammes
obtenus avec des montages incorrects

- Accouplement élastique



- Accouplement rigide (avec un jeu)



4- PRECISION DE LA METHODE

4- PRECISION DE LA METHODE

Pour apprécier les qualités d'une méthode de mesure et ses possibilités d'emploi, il faut connaître la précision des résultats.

La précision est difficile à évaluer car elle dépend de deux erreurs: erreur de mesure et erreur de calcul.

4-I- Erreurs de mesures

Cette erreur est déterminée par plusieurs facteurs. Une manière de les grouper consiste à considérer les composantes d'erreur suivantes:

- Erreur de bruit: A la sortie de chaque élément de la chaîne de mesure apparaît généralement un signal, même pour des valeurs nulles de la grandeur d'entrée. Ce signal est une source d'erreur, parce qu'il ne peut pas être séparé du signal utile et est interprété comme une variation de la grandeur mesurée.
- Erreur dynamique: L'erreur dynamique est déterminée par l'impossibilité dans laquelle se trouve la grandeur de sortie de suivre les variations de la grandeur d'entrée. Les erreurs dynamiques apparaissent en particulier dans les appareils enregistreurs.

- Erreur d'échelle: L'erreur d'échelle est la conséquence des déplacements constants du zéro, de la non conformité entre la fonction de transfert réalisée et celle envisagée, des distorsions de non linéarité etc.

4-2- Erreur de calcul

Elle est difficile à évaluer car elle dépend de:

- l'erreur de méthode, qui est due, la plupart du temps, au remplacement d'une fonction continue par un ensemble de valeurs discrètes.
- l'erreur d'arrondi, qui est due à l'abandon d'un certain nombre de chiffres à chaque opération, une position de mémoire ayant une capacité finie.

4-3- Erreur intermédiaire

Les courbes enregistrées sur l'écran de l'oscilloscope sont prises en photo à l'aide de la caméra et sont ensuite agrandies par projection. La première opération introduit des erreurs de parallaxe, que l'on peut éviter par un bon réglage de la caméra. C'est l'agrandissement qui introduit la plus grande erreur sur le résultat final.

ANNEXES

COMMENTAIRE SUR LES METHODES NUMERIQUES.

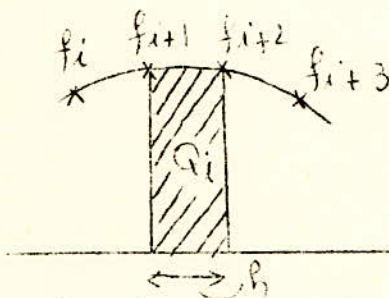
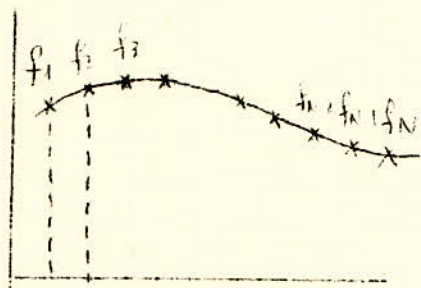
ECRITURE DES PROGRAMMES EN LANGAGE FORTRAN.

- 1 -
Calcul d'intégrales

Toutes les méthodes de calcul numérique se ramènent à exprimer l'intégrale à l'aide d'une formule ne contenant que des opérations simples.

Une intégrale $\int_a^b f(x) dx$ est l'aire algébrique de la surface délimitée par la courbe $y = f(x)$ et les droites $x = a$ et $x = b$; si on divise l'intervalle (a, b) en N parties, elle est encore égale à la somme des aires partielles obtenues

Etant donné une fonction définie par N points $f(i), i \in \{1, \dots, N\}$



On approxime la courbe, dans un intervalle de quatre points, par un polynôme de degré 3 passant par ces points

On démontre facilement que l'aire partielle Q_i est donnée par la formule :

$$Q_i = h \left\{ -\frac{1}{24} [f(i) + f(i+3)] + \frac{13}{24} [f(i+1) + f(i+2)] \right\}$$

h étant le pas d'intégration

Pour le calcul des aires partielles extrêmes on peut approximer les tronçons de courbe par des droites, on aura donc à calculer des aires de trapèzes :

$$h \left\{ \frac{f(1) + f(2)}{2} + \frac{f(N-1) + f(N)}{2} \right\}$$

Finalement la formule donnant la valeur de l'intégrale s'écrit :

$$Q = h \left\{ \frac{11}{24} (f(1) + f(N)) + (f(2) + f(N-1)) + \frac{25}{24} (f(3) + f(N-2)) + \sum_{i=4}^{N-3} f(i) \right\}$$

On écrit donc le sous-programme QUVLN du type SUBROUTINE à quatre arguments

- 1^{er} argument : tableau des ordonnées des points définissant la courbe
- 2^{ème} argument : valeur de l'intégrale
- 3^{ème} argument : Nombre de points définissant la courbe
- 4^{ème} argument : pas d'intégration.

SOUS PROGRAMME D'INTEGRATION NUMERIQUE PAR LA METHODE

LEGPAS

```
SUBROUTINE QUVLN(F,Q,N,PAS)
DIMENSION F(200)
S=0.
S1=F(1)+F(N)
S2=F(2)+F(N-1)
S3=F(3)+F(N-2)
N3=N-3
DO 1 I=4,N3
1 S=S+F(I)
Q=S+(11./24.)*S1+ S2+(25./24.)*S3
Q=Q*PAS
RETURN
END
```

Résolution des systèmes linéaires

Soit à résoudre le système linéaire de n équations à m inconnues suivant:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$\bar{a}_{i1}x_1 + \bar{a}_{i2}x_2 + \dots + \bar{a}_{ij}x_j + \dots + \bar{a}_{in}x_n = \bar{b}_i$$

$$\bar{a}_{n1}x_1 + \bar{a}_{n2}x_2 + \dots + \bar{a}_{nj}x_j + \dots + \bar{a}_{nn}x_n = \bar{b}_n$$

On sait que l'on peut réaliser une combinaison linéaire entre les équations sans pour autant changer la solution du système.

On peut donc conserver la première équation et réaliser une combinaison linéaire entre celle équation et les $(m-1)$ autres équations, c'est à dire que l'on appliquera la transformation:

$$a_{ij}^{(1)} = a_{ij} - r_i \cdot a_{1j}$$

$$b_i^{(1)} = b_i - r_i \cdot b_1$$

avec $r_i = a_{i1}/a_{11}$ pour $\begin{cases} i \in (2, n) \\ j \in (1, n) \end{cases}$

On obtient ainsi un nouveau système où tous les éléments a_{i1} , exception faite de a_{11} , sont nuls

On peut alors considérer le nouveau système obtenu de $(m-1)$ équations et lui appliquer la même transformation.

$$a_{ij}^{(2)} = a_{ij}^{(1)} - r_i^{(1)} a_{2j}^{(1)}$$

$$b_i^{(2)} = b_i^{(1)} - r_i^{(1)} b_2^{(1)}$$

avec $r_i^{(1)} = a_{i2}^{(1)} / a_{22}^{(1)}$ pour $i \in (3, n)$ et $j \in (2, n)$

On se ramène ainsi à un système de $(m-2)$ équations et en continuant ainsi, on peut finalement ramener le système initial au système:

-5-

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{22}^{(1)}x_2 + \dots + a_{2j}^{(2)}x_j + \dots + a_{2n}^{(1)}x_n = b_2^{(1)}$$

$$a_{jj}^{(j-1)}x_j + \dots + a_{jn}^{(j-1)}x_n = b_j^{(j-1)}$$

$$a_{nn}^{(n-1)}x_n = b_n^{(n-1)}$$

on a: Ce système est alors immédiat à résoudre;

$$x_n = \frac{b_n^{(n-1)}}{a_{nn}^{(n-1)}}$$

$$x_{n-1} = \frac{b_{n-1}^{(n-2)} - a_{n-1,n}^{(n-2)}x_n}{a_{n-1,n-1}^{(n-2)}}$$

et d'une manière générale:

$$x_j = \frac{b_j^{(j-1)} - a_{j,j+1}^{(j-1)}x_{j+1} - a_{j,j+2}^{(j-1)}x_{j+2} - \dots - a_{j,n}^{(j-1)}x_n}{a_{jj}^{(j-1)}}$$

On peut alors remarquer que cette méthode ne sera applicable que dans la mesure où les coefficients $a_{k,k}^{(k-1)}$ seront différents de zéro et qu'elle sera d'autant plus précise que ces mêmes coefficients ne seront pas trop faibles, on cherchera donc toujours à se ramener à un pivot maximum en fermant les diverses équations

On écrit donc le sous-programme RSE du type SUBROUTINE à quatre arguments

- 1^{er} argument: Matrice des coefficients du 1^{er} membre du système
- 2^{em} argument: Matrice des coefficients du 2^{em} membre
- 3^{em} argument: Solutions
- 4^{em} argument: nombre d'équations du système

SOUS PROGRAMME DE RESOLUTION D'UN SYSTEME
D'EQUATIONS ALGEBRIQUES PAR LA METHODE DE GAUSS - SIEDEL

```
SUBROUTINE RSE(A,B,X,N)
DIMENSION A(15,15),B(15),X(15)
NM1=N-1
DO 1 K=1,NM1
  I=K+1
  M=K
  IF(ABS(A(I,K))-ABS(A(M,K))) 2,2,3
3  M=I
2  IF(ABS(A(M,K))-1.E-7) 4,4,5
5  IF(M=K) 6,7,6
6  CONTINUE
  DO 10 J=K,N
    R=A(K,J)
    A(K,J)=A(M,J)
10  A(M,J)=R
    R=B(K)
    B(K)=B(M)
    B(M)=R
7  KP1=K+1
  DO 12 I=KP1,N
    R=A(I,K)/A(K,K)
    A(I,K)=0.
  DO 13 J=KP1,N
13  A(I,J)=A(I,J)-R*A(K,J)
12  B(I)=B(I)-R*B(K)
1  CONTINUE
  X(N)=B(N)/A(N,N)
  DO 14 IE=1,NM1
    I=N-IE
    TX=0.
    IP1=I+1
    DO 15 J=IP1,N
15  TX=TX-A(I,J)*X(J)
14  X(I)=(B(I)+TX)/A(I,I)
4  RETURN
END
```

Lissages de Courbes et approximations de fonctions

Nous ne possédons pas de fonctions mathématiques pour représenter les phénomènes qu'on étudie mais nous disposons de points correspondants aux relevés sur des courbes expérimentales.

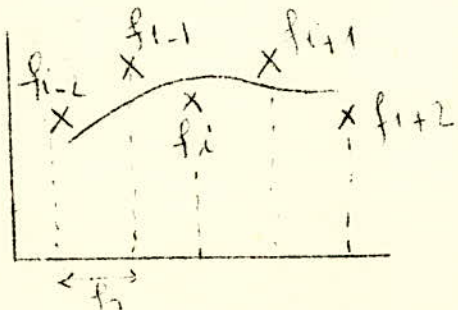
En est alors obligé de réaliser des interpolations pour trouver les valeurs intermédiaires. Dans d'autres cas : on cherchera une fonction représentant le phénomène étudié dans un intervalle donné

1- Approximation par un polynôme déterminé par le critère des moindres carrés

Dans le calcul numérique des intégrales, nous avons remplacé une fonction de forme par points par un polynôme passant par tous les points. Cette méthode dans le cas du calcul d'une dérivée, ne peut donner de résultats satisfaisants que lorsque ces points sont issus d'une fonction mathématique.

Dans le cas où les points sont issus de courbes expérimentales on prendra comme fonction d'approximation un polynôme déterminé par la condition de passer le plus près possible de ces points.

Etant donné une fonction déterminée par N points



on prendra comme fonction d'approximation au point x_i le polynôme

$\alpha x^2 + \beta x + \gamma$
passant aux mieux entre les cinq points

$f_{i-2}, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, f_{i+2}$

en calculera la distance du polynôme en chaque point, c'est à dire l'erreur commise en chaque point, et on déterminera les coefficients du polynôme en minimisant l'erreur quadratique

$$E = \sum_{k=-2}^2 \varepsilon^2(i+k)$$

Aux points considérés, on aura les erreurs :

$$\varepsilon(i-2) = f(i-2) - (4\alpha - 2\beta + \gamma)$$

$$\varepsilon(i-1) = f(i-1) - (\alpha - \beta + \gamma)$$

$$\varepsilon(i) = f(i) - \gamma$$

$$\varepsilon(i+1) = f(i+1) - (\alpha + \beta + \gamma)$$

$$\varepsilon(i+2) = f(i+2) - (4\alpha + 2\beta + \gamma)$$

Les conditions pour que E soit minimum seront alors :

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \frac{\partial E}{\partial \beta} = \frac{\partial E}{\partial \gamma} = 0$$

Ce qui s'écrit

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial \alpha} = \left[f(i+1) - (\alpha + \beta + \gamma) \right] + \left[f(i-1) - (\alpha + \gamma - \beta) \right] + 4 \left[f(i+2) - (4\alpha + 2\beta + \gamma) \right] + 4 \left[f(i-2) - (4\alpha - 2\beta + \gamma) \right] = 0$$

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial \beta} = \left[f(i+1) - (\alpha + \beta + \gamma) \right] - \left[f(i-1) - (\alpha - \beta + \gamma) \right] + 2 \left[f(i+2) - (4\alpha + 2\beta + \gamma) \right] - 2 \left[f(i-2) - (4\alpha - 2\beta + \gamma) \right] = 0$$

-9-

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial \delta} = (f(i) - \delta) + [f(i+1) - (\alpha + \beta + \delta)] \\ + [f(i-1) - (\alpha + \beta + \delta)] + [f(i+2) - (4\alpha + 2\beta + \delta)] \\ + [f(i-2) - (4\alpha - 2\beta + \delta)] = 0$$

Les coefficients α, β, δ sont donc solutions d'un système linéaire

$$1\alpha + 5\delta = f(i) + S_1 + S_2$$

$$10\beta = D_1 + 2D_2$$

$$34\alpha + 10\delta = S_1 + 4S_2$$

ou

$$S_1 = f(i+1) + f(i-1)$$

$$S_2 = f(i+2) + f(i-2)$$

$$D_1 = f(i+1) - f(i-1)$$

$$D_2 = f(i+2) - f(i-2)$$

en lire facilement :

$$\delta = P_i = (3,4 f(i) + 2,4 S_1 - 0,6 S_2) / 7$$

$$\beta = h_1 \left(\frac{dP_i}{dx} \right) = DP_i = (D_1 + 2D_2) / 10$$

Pour les points extrêmes de la courbe on pose

$$P_1 = f(1) ; P_2 = f(2) \text{ et } DP_1 = DP_2 = DP_3 ; DP_n = DP_{n-1} = DP_{n-2}$$

Le sous programme LISSA est du type Subroutine à 5 arguments

- 1° ordonnées des points définissant la fonction ; - 2° valeurs du polynôme ; - 3° Dérivées du polynôme ; 4° nombre de points définissant la courbe ; 5° pas

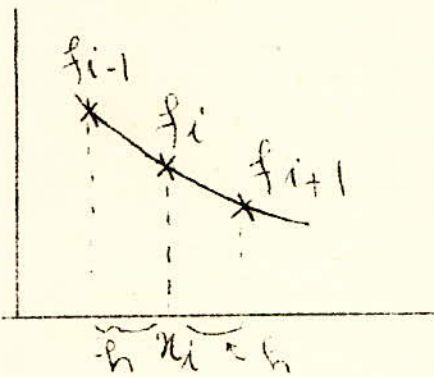
SOUS PROGRAMME
DE LISSAGE D'UNE COURBE. PAR LA METHODE
DU MOINDRE CARRE

```
SUBROUTINE LISSA(F,P,DP,NM,PAS)
DIMENSION F(200),P(200),DP(200)
P(1)=F(1 )
P(2)=F(2)
P(NM)=F(N M)
P(NM-1)=F(NM-1)
K =NM-2
DO 1 I =3,K
S1=F(I+1)+F(I-1)
S2=F(I+2)+F(I-2)
D1=F(I+1)-F(I-1)
D2=F(I+2)-F(I-2)
P(I)=(3.4*F(I)+2.4*S1-0.6*S2)/7.
1 DP(I)=(D1+2D2)/(10*PAS)
DP(1)=DP(3)
DP(2)=DP(3)
DP(NM)=DP(NM-2)
DP(NM-1)=DP(N M-2)
RETURN
END
```

2 - Approximation exponentielle

Soit une fonction déterminée par N couples de valeurs $x^{(i)} = (i-1)h$ et $y^{(i)}$
 on cherche une solution de la forme :

$$y = A + B e^{\beta x}$$



Si on pose $e^{\beta h} = u$.

on aura

$$y(i) = A + B e^{\beta x_i}$$

$$y(i-1) = A + \frac{B}{u} e^{\beta x_i}$$

$$y(i+1) = A + B u e^{\beta x_i}$$

$$\text{et } B e^{\beta x_i} = (y(i) - A)$$

$$y(i-1) = A + \frac{(y(i) - A)}{u} \quad ; \quad y(i+1) = A + (y(i) - A) u$$

$$u = \frac{y(i) - A}{y(i-1) - A} = \frac{y(i+1) - A}{y(i) - A}$$

finalement, on a :

$$A = \frac{y^2(i) - y(i-1)y(i+1)}{2 \{ y(i) - y(i+1) - y(i-1) \}}$$

et

$$\beta = -\frac{1}{h} \ln \frac{y(i-1) - A}{y(i) - A}$$

La dérivée au point i est alors

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=x_i} = A + B \beta e^{\beta x} = A + \beta (y(i) - A)$$

SOUS PROGRAMME
D'APPROXIMATION EXPON ENTIELLE
D'UNE FONCTION DEFINIE PAR DES POINTS SUR UN INTERVALLE

```
SUBROUTINE APEXP(F,DF,N,PAS)
DIMENSION F(200),DF(200)
N1=N-1
DO 1 I=2,N1
  K=I-1
  L=I+1
  A=(F(I)**2 - F(K)*F(L))/(2*F(I) - F(K) - F(L))
  C=ALOG ((F(K) - A)/F(I) - A)/PAS
1 DF(I) = - C*(F(I) - A)
DF(1)=DF(2)
DF(N)=DF(N-1)
RETURN
END
```

FONCTION ARC COSINUS
"DEVELOPPEMENT EN SERIE DE MAC LAURIN"

```
FUNCTION ACOS(X)
ACOS=1.57079-X
A=1.
DO 1 I=1,15
  KP=2*I-1
  A=A*(2*I-1)/(2*I)
1 ACOS=ACOS-A*(X**(KP))/K P
RETURN
END
```

PROGRAMME DE LA DETERMINATION DE L'EXPRESSION
ANALYTIQUE DU COUPLE RESISTANT DE FROTTEMENT
EN FONCTION DE LA VITESSE

DIMENSION YD(200), VD(200), B(5), A(5), C(5,5), F1(200), F2(200), F3(200), F4(200), G1(200), G2(200), G3(200), G4(200), H1(200), H2(200), H3(200), H4(200), Q1(200), Q2(200), Q3(200), Q4(200), P1(200), P2(200), P3(200), P4(200)

ND=180

HA=0.31777

U=10.2

BTD=0.04

T=(ND-1)*BTD

T21=T/2.

T22=T*2.

READ(2,4)(YD(I), I=1,ND)

DO 1 I=1,ND

VD(I)=U*YD(I)/HA

TI=(I-1)*BTD

P1(I)=TI*(TI-T)

P2(I)=P1(I)*(TI-T21)

P3(I)=TI*(TI-T)*(TI-T22)

P4(I)=TI*(TI-T)*(TI-4.*T)

F1(I)=VD(I)*TI*(TI-T)

F2(I)=F1(I)*(TI-T21)

F3(I)=F1(I)*(TI-T22)

F4(I)=F1(I)*(TI-4.*T)

G1(I)=VD(I)*F1(I)

G2(I)=VD(I)*F2(I)

G3(I)=VD(I)*F3(I)

G4(I)=VD(I)*F4(I)

Q1(I)=P1(I)*(VD(I)**0.5)

Q2(I)=Q1(I)*(TI-T21)

Q3(I)=Q1(I)*(TI-T22)

Q4(I)=Q1(I)*(TI-4.*T)

H1(I)=VD(I)*(2.*TI-T)

H2(I)=VD(I)*(3.*TI**2-3.*TI*T+T*T21)

H4(I)=VD(I)*(3.*(TI**2)-10.*T*TI+4.*(T**2))

1 H3(I)=VD(I)*(3.*(TI**2)-6.*T*TI+2.*(T**2))

CALL QUVLN(P1,C(1,1),ND,BTD)

CALL QUVLN(P2,C(2,1),ND,BTD)

```
CALL QUVLN(P3,C(3,1),ND,BTD)
CALL QUVLN(P4,C(4,1),ND,BTD)
CALL QUVLN(D1,C(1,2),ND,BTD)
CALL QUVLN(F2,C(2,2),ND,BTD)
CALL QUVLN(F3,C(3,2),ND,BTD)
CALL QUVLN(F4,C(2,4),ND,BTD)
CALL QUVLN(G1,C(1,3),ND,BTD)
CALL QUVLN(G2,C(2,3),ND,BTD)
CALL QUVLN(G3,C(3,3),ND,BTD)
CALL QUVLN(G4,C(3,4),ND,BTD)
CALL QUVLN(H1,B(1),ND,BTD)
CALL QUVLN(H2,B(2),ND,BTD)
CALL QUVLN(H3,B(3),ND,BTD)
CALL QUVLN(H4,B(4),ND,BTD)
CALL QUVLN(Q1,C(1,4),ND,BTD)
CALL QUVLN(Q2,C(2,4),ND,BTD)
CALL QUVLN(Q3,C(3,4),ND,BTD)
CALL QUVLN(Q4,C(4,4),ND,BTD)
WRITE(3,10)((C(I,J),J=1,4),I=1,4)
WRITE(3,10)(B(I),I=1,4)
CALL RSE(C,B,A,N)
WRITE(3,10)(A(I),I=1,4)
AO=0.289
AINER=AO/A(1)
A1=A(2)*AINER
A2=A(3)*AINER
A3=A(4)*AINER
WRITE(3,5)AO,A1,A2,AINER,A3
4  FORMAT(20F4.2)
5  FORMAT(10X,5F8.5)
10 FORMAT(10X,4F13.5)
```

PROGRAMME DE LA DETERMINATION DE LA COURBE
VARIATION DU COUPLE RESISTANT DE FROTTEMENT EN FONCTION
DE LA VITESSE

```
DIMENSION YD(200),VD(200),CRP(200)
HA=0.31777
BTD=0.1
U=10.2
ND=98
READ(2,40) (YD(I), I=1,ND)
DO 1 I=1,ND
1 VD(I)=U*YD(I)/HA
CALL APEXP(VD,CRP,ND,BTD)
DO 2 I=1,ND
CRP(I)=CRP(I)
2 WRITE(3,5) YD(I),VD(I),CRP(I)
5 FORMAT(10X,3F13.5)
40 FORMAT(16F5.3)
```


PROGRAMME DE LA DETERMINATION DE LA COURBE DE
VARIATION DE LA VITESSE EN FONCTION DU TEMPS
A PARTIR DE L'OSCILLOGRAMME DE LA TENSION
AUX BORNES DE L'ALTERNATEUR TACHYMETRIQUE

```
DIMENSION Y(300), VM(300), YM(100), NN(20), DEP(20)
NM=288
NMI=8
NMO=63
BTM=0.5E-3
HA=0.30443
P=3.
U=20.4
VM(1)=0.
PI=3.14159
EPSI=0.1E-1
READ(2,60) (NN(I), I=1, NMI)
READ(2,70) (DEP(I), I=1, NMI)
READ(2,40) (Y(I), I=1, NM)
DO 33 I=1, NMO
33  YM(I)=Y(I)*U
CALL QUVLN (YM, E, NMO, BTM)
TETAO=ACOS((P*E/HA-1)
S=TETAO

WRITE (3,30) TETAO, E
PB=P*BTM
N=1
KA=1
VM(2)=(U*Y(2))/(HA*ABS(SIN(S)))
S=S+PB*VM(2)/2.
WRITE (3,50) VM(2), S
DO 1 I=3, NM
K=I-1
M=I-2
IF (NN(N)-I) 44, 55, 44
55  PB1=(P*DEP(N)*1.E-3)/2.
S=KA*PI+PB1*VM(K)
KA=KA+1
N=N+1
GO TO 3
44  PB1=PB*10./24.
S=S+PB*((2./3.)*VM(K)-(1./12.)*VM(M))
IF(Y(I)-1.E-3) 2, 2, 3
2   VM(I)=(KA*PI-S)/PB1
S=KA*PI
KA=KA+1
GO TO 1
3   OMAR=VM(K)
L=0
KK=1
10  VI=(U*Y(I))/(HA*ABS(SIN(S+PB1*OMAR)))
AMAR=OMAR+EPSI
VK=(U*Y(I))/(HA*ABS(SIN(S+PB1*AMAR)))
ALI=OMAR-VI
ALA = AMAR-VK
IF (ALI*ALA) 4, 4, 5
```

```
5 IF (KK-1)7,7,6
7 L=L+1
  OMAR=OMAR+((( -1)**(L+1)))*(L*EPSI)
  IF (OMAR-0.1) 8,8,10
8 KK=2
  OMAR=OMAR+(L+1)*EPSI
  GO TO 10
6 OMAR=OMAR+EPSI
  GO TO 10
4 VM(I)=OMAR
  S=S+PB1*VM(I)
1 WRITE (3,50) VM(I),S,I
60 FORMAT (20I3)
70 FORMAT (20F4.2)
40 FORMAT (16F5.3)
30 FORMAT (20X,F8.3,20X,F10.3)
50 FORMAT (10X,F8.3,5XE15.8,5X,13)
```

PROGRAMME DE DETERMINATION DE LA COURBE
DE VARIATION DU COUPLE MOTEUR EN FONCTION DE LA VITESSE

DIMENSION VM(300),OMEGA(300),DOMEG(300),G AMMA(300),CRP(100)

A INER=

NC=94

NM=288

DV=2.

BTM=0.5E-3

READ(2,40) (VM(I),I=1,NM)

READ(2,50) (CRP(I),I=1,NC)

CALL LISSA(OMEGA,DOMEG,NM,BTM)

DO 1 I=1,NM

K=OMEGA(I)/DV

M=K+1

CRAI=CRP(K)+(CRP(M)-CRP(K)) * (OMEGA(I)-K*DV)/DV

GAMMA(I)=A INER * (DOMEG(I)+CRAI)

1 WRITE(3,60) VM(I),OMEGA(I),G AMMA(I)

40 FORMAT (10F8.13)

50 FORMAT(16F15.3)

60 FORMAT(10X,F10.3)

CONCLUSIONS

En n'ayant recours qu'aux courbes de variation de la vitesse en fonction du temps, pendant les essais de démarrage et de ralentissement, nous avons pu déterminer la caractéristique mécanique du moteur asynchrone. Notons que cette méthode est applicable à tous les types de machines électriques.

Nous avons commencé par nous représenter le phénomène de démarrage à partir de la caractéristique mécanique statique. Cette représentation, comme nous l'avons constaté, déforme la vraie nature du processus de démarrage, par suite de la négligence des transitoires électromagnétiques. Nous avons alors obtenu la caractéristique mécanique dynamique. Cela nous a amenés à étudier les processus électromagnétiques transitoires au démarrage.

Nous avons abordé le calcul du couple au démarrage. Mais vu sa complexité, nous nous sommes contenté de donner, dans le cas particulier du rotor bloqué, les étapes du calcul et l'expression finale du couple. Cette étude avait pour but l'explication des oscillations du couple qui suivent la mise sous tension du moteur. Nous avons ensuite montré qu'il est possible d'obtenir la caractéristique mécanique statique.

La qualité de cette méthode dépend beaucoup du relevé des courbes de vitesse. La mesure des vitesses a été le problème qui nous a posés le plus de difficultés. Nous avons commencé par

employer une dynamo tachymétrique, mais nous avons constaté qu'elle se prête mal aux mesures des vitesses à variation rapide, à cause des ondulations de tension aux balais. Nous avons résolu ce problème en employant un alternateur tachymétrique, d'emploi plus difficile à mettre en oeuvre. La tension délivrée par ce tachymètre n'est pas proportionnelle à la vitesse, elle est liée à la vitesse par une équation transcendante que nous avons pu résoudre numériquement.

En prenant les précautions nécessaires dans la mesure des vitesses, nous avons pu constater que la valeur maximale du couple transitoire peut de beaucoup dépasser le couple nominal du moteur. Les oscillations de couple, pendant les instants qui suivent la mise sous tension, facilitent le démarrage du moteur, mais elles peuvent produire des contraintes anormales dans l'arbre et un phénomène de fatigue.

Notons que, dans le cas des moteurs de grande puissance, on peut faire l'essai de démarrage sous tension réduite, on fait la correction ensuite puisqu'on sait que le couple, dans le cas où on suppose les paramètres de la machine ne dépendant pas du courant, dépend du carré de la tension.

À l'aide de cette méthode on peut déterminer des caractéristiques de couple mettant en évidence certains effets, tel que l'effet GORGES. On peut aussi, par des méthodes analogues, déterminer les autres caractéristiques de la machine.

- M. KOSTENKO Et L. PIOTROVSKI. - Machines électriques (t1, II). Edition Moscou 1969.
- M. TCHILIKIN. - Cours de commande électrique. Edition de Moscou.
- V. BERNARD, A.L. TOUTANCHOU et A. BRU. - Elements de construction à l'usage de l'ingénieur (t1, III°). DUN OD 1965.
- V. SIN OVIEV. - Théorie des mécanismes et des machines. Edition de Moscou.
- G. QUADRI. - Technique d'emploi des moteurs asynchrones industriels et de leur appareillage.
- P. PELLETIER. - Technique numériques appliquées au calcul scientifique. Massone et cie 1971.
- F. N OTEL ET. - Le couple transitoire de démarrage du moteur asynchrone triphasé. RGE-t 79-
N °6 juin 1970.