

Les Machines électriques à vitesse variable

(SUITE)

CHAPITRE III

Les génératrices autonomes

Pour ce genre de machines il y a lieu de considérer :

1° Les conditions d'excitation de la machine. Le champ magnétique peut être préexistant dans la machine (champ dû à des aimants ou des courants d'excitation donnés)

Ou bien la machine peut être inerte dans son état initial : il n'existe ni flux ni courants, et aucun phénomène électrique. Seulement du fer et du cuivre en présence. Ce sera le cas d'une machine shunt à courant continu, d'une machine d'induction dont le rotor est fermé sur capacités statiques, etc..

On dira alors que la machine fonctionne en auto-excitation ; il y a lieu de rechercher les conditions nécessaires et suffisantes de l'auto-excitation.

2° La régulation de la vitesse d'entraînement de la génératrice et de la tension (et de la fréquence en alternatif).

3° La répartition des charges entre deux machines, couplées en parallèle pour alimenter un circuit d'utilisation commun, et la stabilité de ce partage.

Le fonctionnement d'une génératrice autonome à tension constante pose encore un problème de stabilité électrique : le dispositif d'excitation étant ajusté pour que la génératrice maintienne une tension déterminée aux bornes d'un système récepteur donné, il faut que, si la tension vient à baisser, pour une raison accidentelle, la tension normale se rétablisse automatiquement lorsque la perturbation a cessé.

I. — GÉNÉRATRICE SHUNT A COURANT CONTINU

1° *Les conditions d'excitation.* — La machine à excitation séparée permet d'obtenir à vide, pour un réglage déterminé de l'excitation, la tension que l'on désire.

La machine shunt permet également d'obtenir ces conditions : la machine fonctionne alors en autoexcitation, la tension d'amorçage est réglée par le rhéostat d'excitation. Les conditions de saturation sont essentielles pour la stabilité du régime en auto-excitation : on ne peut donc pas obtenir telle tension que l'on désire par réglage du rhéostat.

L'autoexcitation est assujettie à certaines conditions ; en particulier il faut établir un sens de connexions bien déterminé entre inducteurs et induit, pour un sens de rotation donné.

2° *Régulation de la vitesse d'entraînement.* — La machine étant entraînée à vide à vitesse constante, et excitée à sa tension normale, on charge le circuit récepteur : le moteur d'entraînement baisse de vitesse si sa caractéristique est shunt ou série, ce qui est le cas général.

On dispose un régulateur d'admission qui augmente le couple moteur quand la vitesse baisse : ce régulateur maintient ainsi une vitesse pratiquement constante, mais cependant légèrement décroissante quand la charge augmente puisque l'admission est directement commandée par la vitesse. Il faut que la vitesse ait baissé pour que l'admission puisse augmenter.

3° *Régulation de la tension.* — La machine étant excitée à vide à une tension déterminée U_v , si on vient à la charger, la tension tombe du fait de la chute ohmique (et de la réaction d'induit démagnétisante), la vitesse étant maintenue pratiquement constante. Dans le cas de la machine autoexcitatrice la

chute de tension est plus grande, du fait de la réduction de tension d'excitation qui résulte de la chute de tension.

Pour maintenir la tension à une valeur constante U il faut donc un régulateur sur l'excitation.

4° *Répartition des charges.* — Quand deux machines fonctionnent en parallèle, une condition nécessaire de la marche en paral-

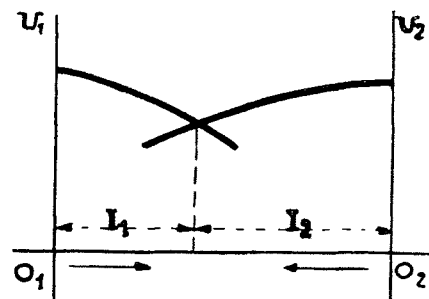


FIG. 97. — Génératrice shunt, répartition des charges.

lèle est que les tensions aux bornes des deux machines soient exactement les mêmes.

On se reportera à ce qui a été dit sur les conditions générales de la marche en parallèle.

Dans le cas des machines compound, pour lesquelles la courbe tension-charge n'est pas tombante, la marche en parallèle est encore possible moyennant l'artifice connu du fil d'équilibre : grâce à la présence de ce fil, le courant dans les électros série est déterminé par le courant total débité indépendamment de la répartition du courant entre les deux machines : les électros série représentent alors une excitation séparée additionnelle et on est ramené au cas de 2 machines shunt en parallèle.

II. — GÉNÉRATRICE SYNCHRONE

1. *Les conditions d'excitation* — L'excitation est en général prévue par excitatrice séparée à courant continu.

2. *Régulation de la vitesse d'entraînement.* — La machine étant entraînée à la vitesse de synchronisme N_s , et excitée à sa tension normale, fonctionne à la fréquence normale.

Si on charge le circuit récepteur, la vitesse tend à baisser ; un régulateur d'admission maintient la vitesse pratiquement constante comme avec la génératrice shunt.

3. *Régulation de la tension.* — Un régulateur de tension agissant sur l'excitation, maintient la tension constante. A excitation constante la tension tombe du fait de la chute ohmique, et de la réaction d'induit démagnétisante.

Cette dernière cause est de beaucoup la plus importante, lorsque la génératrice alimente un récepteur inductif : l'excitation nécessaire pour maintenir la tension constante dépend non seulement du courant débité, mais du facteur de puissance. Pour des kVA donnés, cette excitation augmente très rapidement lorsque le $\cos \varphi$ s'abaisse.

La différence entre l'excitation nécessaire à vide et l'excitation de pleine charge, dépend du dimensionnement particulier de la machine ; dans les machines dites à grande réaction, l'excitation à vide n'est que le tiers de l'excitation de pleine charge.

Il n'en faut pas plus pour concevoir que le fonctionnement d'une génératrice synchrone sans réglage de l'excitation est une

impossibilité pratique, tandis qu'une machine à courant continu peut fonctionner dans de bonnes conditions sans régulateur d'excitation.

Il est toutefois possible, avec la machine synchrone, de recourir à des dispositions de compoundage plus ou moins complexes.

4. *Régulation de la fréquence* — Nous avons vu que la vitesse baisse légèrement quand la charge augmente, par le jeu du régulateur d'admission. Il est possible en modifiant le réglage du régulateur en fonction de la charge, de maintenir la vitesse, et par suite la fréquence, exactement constante

5 — *Répartition des charges dans la marche en parallèle.* — Quand deux machines synchrones sont en parallèle, une condition nécessaire est qu'elles tournent rigoureusement à la même vitesse : en effet deux alternateurs non réunis en parallèle et conduits chacun par sa machine motrice propre, supposée munie d'un régulateur de vitesse, ne tournent pas rigoureusement à la même vitesse. Mais à partir du moment où les deux alternateurs sont réunis en parallèle, si l'une des machines tend à ralentir, ce ralentissement provoque automatiquement l'existence d'un couple correcteur. Ce couple élastique ou synchronisant est le phénomène qui rend possible la marche en parallèle ; il est dû à ce que tout décalage entre les roues polaires de deux machines qui fonctionnent en parallèle entraîne une différence de tensions qui engendre un courant de circulation sensiblement en phase avec les tensions respectives des deux alternateurs, d'où l'existence d'un couple.

Les vitesses de deux alternateurs couplés en parallèle sont, quoi qu'il arrive, identiques, exactement comme si les machines étaient manchonnées ensemble par un lien élastique

Puisque deux alternateurs en parallèle sont astreints à la même vitesse, les conditions suivant lesquelles ils se partagent la charge commune sont déterminées par la point d'intersection des caractéristiques de vitesse en fonction de la charge, car en ce seul point la condition d'égalité des vitesses est satisfaite.

Le réglage de la tension dans la marche en parallèle se fait en agissant sur les excitations, de manière à répartir sur les deux machines la demande de puissance dévattée venant du réseau.

III. — GÉNÉRATRICE D'INDUCTION SIMPLE

1. *Les conditions de fonctionnement à vitesse constante.* — Nous établissons d'abord la condition suivante .

La machine asynchrone entraînée à vitesse constante ne peut fonctionner en génératrice autrement qu'à fréquence décroissante.

En effet, l'existence d'un couple en génératrice implique un courant watté dans le rotor, et par suite, l'existence d'une tension développée dans le rotor. Le rotor ne tourne donc pas au synchronisme avec le champ tournant statorique, mais avec un glissement. Or, comme sa vitesse est constante, pour qu'il puisse avoir un glissement, il faut que le champ statorique tourne à une vitesse différente de celle de la rotation, par suite, que la fréquence statorique se modifie.

Comme d'autre part, la machine asynchrone ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de son synchronisme déterminé par la fréquence statorique et le nombre des pôles, le glissement est négatif : il faut que la vitesse de rotation du champ statorique soit inférieure à la vitesse de rotation du rotor.

A vide, la fréquence du champ statorique est la fréquence de la rotation. En charge, elle est inférieure.

Ces conditions sont vraies quelle que soit la vitesse de rotation : le fonctionnement en génératrice est possible dans ces conditions, indistinctement à toutes les vitesses de rotation.

Si N_0 est la vitesse de rotation et f la fréquence statorique, la fréquence de la rotation est :

$$f_0 = \frac{p N_0}{60} \quad \text{et} \quad \omega_0 = 2 f_0$$

On a :

$$N_s = \frac{60 f}{p} \quad g = \frac{N_s - N_0}{N_s}$$

La pulsation dans le stator est $\frac{\omega_0}{1-g}$ avec g négatif.

2. *Les conditions d'excitation.* — Il convient pour exciter la machine d'employer un alternateur auxiliaire d'excitation (fig. 98) muni de son excitatrice à courant continu. On placera

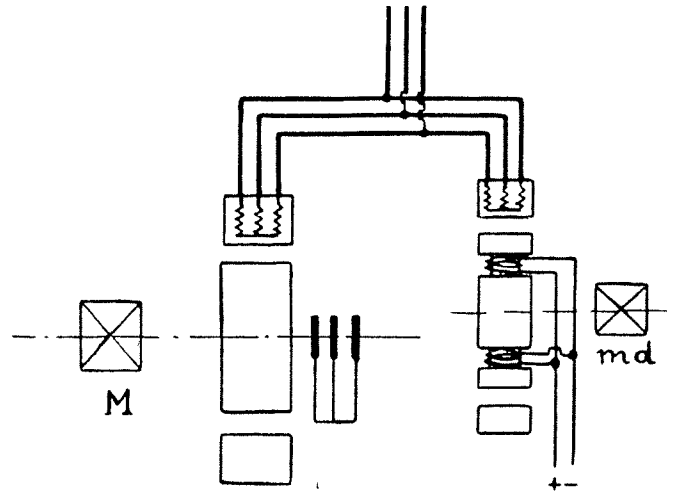


FIG 98. — Génératrice asynchrone autonome avec compensateur d'excitation.

M moteur d'entraînement de la génératrice asynchrone.
md moteur de démarrage de la machine, type synchrone

en parallèle avec le stator de la machine d'induction un alternateur synchrone entraîné à la vitesse qui convient pour que, eu égard à sa polarité, il débite à la fréquence f que l'on désire obtenir, et on excitera jusqu'à ce que la tension aux bornes communes soit la tension correspondant au flux normal.

L'alternateur débite les kVA à vide de la machine asynchrone à la fréquence voulue.

Dans le cas considéré, l'alternateur auxiliaire doit être entraîné par un moteur. Coupons alors l'alimentation du moteur qui entraîne l'alternateur ? Que va-t-il se passer ? La réponse n'est pas évidente.

On constate que le système reste en fonctionnement.

L'alternateur tourne en moteur synchrone à vide. La puissance correspondant aux pertes se traduit par un couple résistant sur l'arbre de la machine asynchrone, qui travaille en génératrice de puissance wattée.

On dit alors que la machine d'induction est excitée par *compensateur d'excitation*. — Une mise en vitesse initiale de ce compensateur est nécessaire.

3. *Régulation de la vitesse d'entraînement.* — Un régulateur d'admission doit être prévu pour maintenir la vitesse constante lorsque la charge augmente.

4. *Régulation de la tension.* — Quand la charge augmente, la tension baisse d'une façon plus ou moins accentuée selon le facteur de puissance des récepteurs. En augmentant l'excitation du compensateur d'excitation, il est possible de maintenir la tension constante ; un régulateur agissant sur l'excitation est donc nécessaire.

On peut démontrer que dans le fonctionnement à tension et vitesse constantes, le diagramme de fonctionnement de la géné-

matrice est tout à fait analogue à celui d'une génératrice asynchrone fonctionnant sur un réseau; la puissance dévattée que doit fournir le compensateur d'excitation est égale à celle demandée par le circuit d'utilisation, augmentée de la puissance dévattée d'excitation et de fuites de la machine d'induction.

5. *Régulation de la fréquence.* — Dans le fonctionnement à tension et vitesse constantes, il se produit un glissement de fréquence quand la charge augmente, comme nous l'avons vu. On démontre que ce glissement de fréquence, pour une charge donnée, est sensiblement égal au glissement de vitesse que l'on aurait avec la même machine fonctionnant sur le réseau.

Le compensateur d'excitation baisse de vitesse quand la fréquence diminue.

On conçoit que la génératrice d'induction, fonctionnant à vitesse constante, ne puisse recevoir son excitation d'un réseau synchrone, car la condition de concordance des fréquences ne serait pas satisfaite. La marche en parallèle avec un réseau synchrone ne serait possible que si le moteur qui entraîne la génératrice d'induction était muni d'un régulateur qui augmente sa

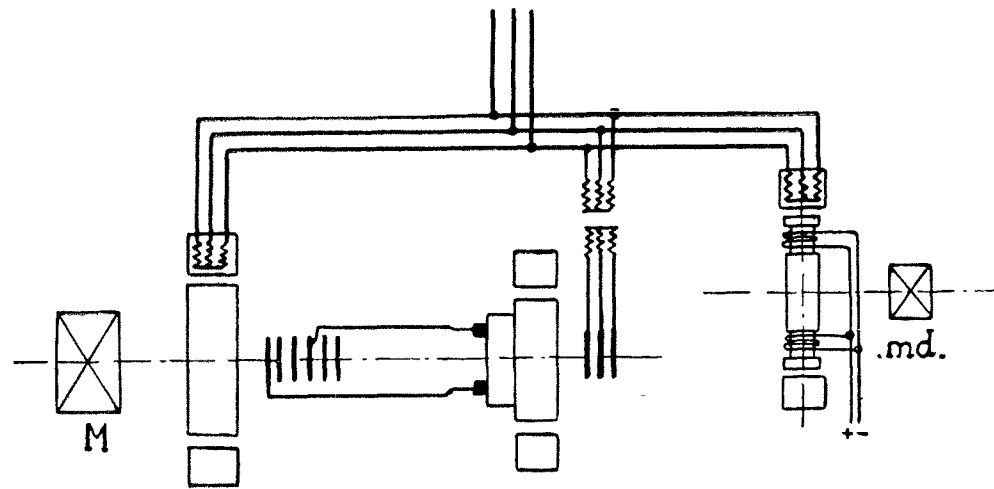


FIG. 99. — Génératrice asynchrone autonome avec changeur de fréquence en cascade et stabilisatrice automotrice.

vitesse quand la charge augmente, de manière à compenser la baisse de fréquence, ou si la fréquence du réseau était réglable : en diminuant la fréquence du réseau synchrone, on ferait prendre la charge à la machine asynchrone, dont la charge ne dépend que de la fréquence pour une vitesse de rotation donnée.

IV. — GÉNÉRATRICE D'INDUCTION AVEC EXCITATRICE DE COMPENSATION.

1. *Les conditions d'excitation à vitesse constante.* — a) *Fonctionnement en autoexcitation.*

Si l'on considère un moteur d'induction avec excitatrice fonctionnant à vide sur le réseau, le réglage de la machine à collecteur permet de débiter des kVA avant sur le réseau ou de prendre au réseau des kVA arrière; il existe une courbe continue des kVA débités en fonction du réglage, d'un certain maximum négatif à un maximum positif.

Cette courbe est l'équivalent exact de la courbe en V d'une machine synchrone : nous l'appellerons courbe en V de la machine asynchrone.

Dans les limites de réglage entre lesquelles la machine asynchrone débite des kVA avant, elle jouit de la propriété de l'autoexcitation; si on entraîne la machine ainsi réglée à sa vitesse normale sans aucune connexion avec le réseau, les connexions normales de la machine à collecteur étant établies avec le stator et le rotor de la machine d'induction, l'expérience montre que la

machine fonctionne en autoexcitation et s'amorce spontanément. La tension d'amorçage à vide est fonction du réglage : c'est-à-dire que plus le réglage en moteur à vide correspond à des kVA débités élevés, plus la tension d'amorçage est elle-même élevée. La saturation de la machine joue un rôle essentiel sur la stabilité de la tension : une machine non saturée ne peut s'amorcer à une tension stable. Aussi la détermination exacte de la tension d'amorçage est-elle sujette à quelque imprécision; et il n'y a aucun moyen de la régler.

On voit qu'un compensateur asynchrone fonctionnant sur un réseau s'amorcera en cas de déclenchement d'avec le réseau : on obtiendra une élévation de tension en cas de décharge, exactement comme pour un alternateur synchrone, mais le mécanisme des phénomènes est différent.

b) *Fonctionnement avec machine auxiliaire.*

Le fonctionnement avec machine synchrone en parallèle d'abord démarrée en alternateur et amenée à la fréquence normale, puis couplée sur la machine d'induction, et fonctionnant alors en machine autonome, présente l'avantage d'éviter toute difficulté relative à la saturation et de permettre un réglage facile de la tension par l'excitation du compensateur (fig. 99).

2. *Régulation de la vitesse d'entraînement et de la fréquence.* — Ce qui a été dit de la génératrice d'induction simple s'applique sans modification.

3. *Régulation de la tension.* — a) *Fonctionnement en autoexcitation.*

Le fonctionnement autonome en charge d'une machine amorcée à vide peut être réalisé avec une machine convenablement saturée, la caractéristique externe ou courbe de chute de tension dépend alors essentiellement du facteur de puissance des récepteurs.

b) *Fonctionnement avec machine auxiliaire.*

La puissance magnétisante échangée avec le réseau est sensiblement nulle à toute charge pour un calage convenable des balais, comme on peut le démontrer; les conditions sont sensiblement les mêmes à ce point de vue que dans le fonctionnement sur réseau à fréquence constante.

Par suite le compensateur auxiliaire d'excitation a pour rôle, non pas d'exciter la machine, mais de stabiliser sa tension : aussi convient-il de le désigner sous le nom de *stabilisatrice*.

Cette stabilisatrice est de dimensions très réduites par rapport à la machine principale.

D'une façon générale les kVA débités par la stabilisatrice pour une puissance utile déterminée, sont donnés par la somme algébrique de la puissance magnétisante débitée par la génératrice, et de celle qui est consommée par les récepteurs.

V. — GÉNÉRATRICE D'INDUCTION AVEC EXCITATRICE DE GLISSEMENT

Bien que l'on puisse concevoir le fonctionnement en régime amorcé, il convient, comme dans le cas de l'excitatrice de compensation, d'utiliser une *stabilisatrice*.

Supposons par exemple, que l'on se propose de fonctionner en génératrice autonome avec un groupe de synchronisme N_s entraînant la machine à une vitesse constante différente de N_s : soit $0,8 N_s$.

Peut-on avec ce système obtenir le fonctionnement à vide à la fréquence du réseau, et cela sans liaison électrique avec le

réseau, avec une machine tournant à une vitesse différente du synchronisme ? Le fait apparaît au premier abord paradoxal. Et cependant le fonctionnement envisagé est facile à obtenir comme suit :

Le dispositif de réglage de la machine en cascade étant à la position qui correspond à la vitesse $0,8 N_s$ en moteur à vide, on entraîne la stabilisatrice auxiliaire à sa vitesse de synchronisme pour 50 périodes, on la met en parallèle sur le primaire de la machine d'induction (reliée à son changeur par le primaire et le secondaire, et entraînée à $0,8 N_s$); on règle l'excitation pour avoir la tension voulue aux bornes communes, et on coupe l'alimentation du moteur qui entraîne l'alternateur. Le système reste amorcé à 50 périodes et la machine synchrone auxiliaire joue le rôle de stabilisatrice en fournissant ou absorbant le complément de kVA nécessaires à l'excitation sous tension normale.

Les différentes circonstances du fonctionnement en charge sont analogues à celles qui ont été exposées précédemment.

TROISIÈME PARTIE

LA SPÉCIFICATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES A VITESSE VARIABLE

CHAPITRE I

Diagramme définissant le service d'un moteur

Nous reviendrons d'abord sur cette question qui est du ressort des lois générales de la mécanique. L'électricien n'a rien à voir dans cette partie du problème, qui constitue le point de départ pour le choix du moteur.

Un cycle de fonctionnement simple comprend démarrage, marche à vitesse constante et freinage.

Les courbes caractéristiques du cycle sont celles du couple utile et de la vitesse en fonction du temps. La courbe de puissance utile s'en déduit immédiatement. Nous allons considérer successivement les notions qui permettent d'arriver à ces courbes.

1° Couple et effort résistant. — Un moteur est utilisé pour surmonter une résistance le long d'un certain chemin. Le déplacement est selon les cas une rotation ou une translation; on dira dans le premier cas que le moteur surmonte un *couple résistant* C et dans le second cas un *effort résistant* F. Le couple s'exprime en Kilogrammètres et l'effort en Kilogrammes.

De toute façon le moteur électrique fournit un *couple moteur* C_m . Par suite, dans le cas d'une translation, il existe une relation de correspondance entre l'effort F et le couple correspondant C_m que le moteur doit développer sur son arbre.

On a :

$$F = C_m \times 2 \rho \frac{m}{d}$$

m est le rapport du nombre des dents $\frac{\text{engrenages}}{\text{pignon (moteur)}}$

d est le diamètre de la roue motrice en mètres

ρ est le rendement de la transmission de l'arbre moteur aux roues.

De même, entre la vitesse angulaire N_m du moteur et la vitesse linéaire V du déplacement de translation, il existe la relation de correspondance

$$V = N_m \times 0,19 \frac{d}{m}$$

V s'exprime en Km à l'heure et N en tours par minute.

Dans le cas d'un mouvement de rotation, on peut utiliser un engrenage ou une courroie entre l'arbre moteur et l'arbre conduit :

Soit K le rapport $\frac{\text{diam. arbre conduit}}{\text{diam. arbre moteur}}$

le couple C_m sur l'arbre du moteur est lié au couple C sur l'arbre conduit par la relation

$$C_m = \frac{C}{K}$$

et la vitesse N_m sur l'arbre du moteur est liée à la vitesse N de l'arbre conduit par la relation

$$N_m = K N.$$

2° Puissance. — Un moteur surmonte un effort résistant le long d'un certain chemin à une certaine vitesse; la puissance absorbée par l'effort résistant est, exprimée en watts :

$$P = 1,03 C N$$

dans le cas d'un mouvement de rotation,

et $P = 2,7 F V$

dans le cas de la translation.

Pour développer une puissance utile donnée, déterminée par l'effort à surmonter et la vitesse de ce déplacement, on voit que le couple du moteur n'est pas déterminé si l'on dispose du rapport de réduction K, c'est-à-dire si l'attaque directe n'est pas une nécessité. Or, ce qui fixe les dimensions d'une machine électrique ce n'est pas sa puissance seule, mais encore sa vitesse : l'une des règles fondamentales de la similitude des machines électriques est que, toutes choses égales, la puissance que l'on peut tirer d'une machine de dimensions données est proportionnelle à sa vitesse. Par suite, une même puissance peut être développée avec des machines électriques de dimensions très différentes.

Remarque. — La règle que nous venons d'indiquer pour la similitude des machines, ne s'applique qu'aux machines *ouvertes à ventilation naturelle ou forcée*, mais non aux machines type hermétique. En effet, avec une machine hermétique, les pertes que l'on peut évacuer en régime continu, ne dépendent que de la surface de la machine en contact avec l'air. Les pertes étant ainsi limitées à une certaine valeur, la puissance est par la même limitée : on ne gagne rien à augmenter la vitesse de rotation.

3° Différents termes du couple et de l'effort résistant dans le fonctionnement à vitesse constante. — Dans le fonctionnement en régime de vitesse constante, la vitesse se fixe à l'intersection des courbes du couple moteur et du couple résistant. Nous admettons que l'on connaît la courbe du couple moteur.

Nous examinerons ici les différents termes dont se compose le couple résistant.

a) Rotation. — Le couple nécessaire pour entraîner un arbre récepteur à une vitesse donnée, comprend en général différents termes :

1° Un couple de frottements mécaniques, qui peut être pratiquement admis proportionnel au poids de la partie tournante, et au rayon des tourillons;

2° Un couple de frottements sur l'air qui est une fonction croissante de la vitesse de rotation;

3° Le couple résistant utile proprement dit qui peut suivre toute loi particulière en fonction de la vitesse selon l'application envisagée.

b) Translation. — Dans le cas d'un mouvement de translation, il y a lieu d'introduire la notion de *coefficient de traction*.

Nous rappellerons rapidement les idées fondamentales familières aux ingénieurs de traction :

Pour déplacer un objet de poids P parallèlement à une direction donnée, à une vitesse constante V, il faut appliquer à ce

pois un effort F que l'on peut en général écrire sous la forme

$$F = P \times R$$

R est désigné sous le nom de coefficient de traction . rapport de l'effort dépensé au poids mis en mouvement. L'intérêt de ce coefficient est qu'il représente une constante indépendante de l'effort total F , pour un genre de matériel donné.

Comme on exprime F en Kg, P en tonnes, R sera exprimé en Kg par tonne

Le coefficient R est une somme d'autant de coefficients élémentaires qu'il y a de résistances partielles à surmonter.

On distingue trois sortes de résistances :

(a) Résistance en palier et alignement droit r .

Ce terme comprend :

les frottements mécaniques . résistance constante indépendante de la vitesse,

la résistance de l'air : résistance fonction croissante de la vitesse.

(b) Résistance additionnelle en rampe i .

Quand le corps se déplace de dl sur sa trajectoire rectiligne, faisant l'angle α avec l'horizontale, le travail de la pesanteur est :

$$P dl \sin \alpha = F dl$$

F étant l'effort de traction correspondant.

d'où $R = \sin \alpha$.

On pose $\sin \alpha = tg \alpha =$ pente, pour les faibles pentes, et l'on représente par i la pente exprimée en m/m par m

L'effort de traction en Kg/tonne est alors numériquement égal à i .

(c) Résistance additionnelle en courbe. Le coefficient correspondant est fonction du rayon de la courbe.

Au total $R = r + i + c$

r étant fonction de la vitesse N

Il existe une limite à l'effort de traction . c'est l'adhérence (notion qui n'intervenait pas dans le cas du mouvement de rotation, avec liaison positive entre l'arbre moteur et l'arbre conduit). Si l'effort de traction dépasse une certaine limite F_a , dite effort adhérent, il cesse d'y avoir engrènement des aspérités des surfaces en contact de la roue et du rail les roues patinent.

La force pressant les surfaces en contact est le poids qui charge les essieux moteurs ou poids adhérent P_a .

On a la relation :

$$F_a = P_a \times n$$

n est le coefficient d'adhérence qui est de l'ordre de 1/5 l'effort adhérent est de l'ordre de 100 Kg par tonne.

4° Démarrage — 1° Rotation. — Le démarrage se calcule en écrivant l'équation du mouvement

$$K \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt} = C_m - C_r$$

C_m représentant la somme des couples moteurs, et C_r la somme des couples résistants.

K est le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes, égal à $\frac{PD^2}{4g}$, D étant le diamètre de giration exprimé en mètres et P le poids en Kg.

La caractéristique mécanique du moteur donne la courbe

$$C_m = f(N)$$

que nous supposons connue, et la courbe $C_r = \varphi(N)$ est déterminée par la charge à entraîner comme nous l'avons vu au paragraphe précédent.

L'équation du mouvement donne le temps en fonction de la vitesse par une quadrature que l'on pourra toujours résoudre par intégration graphique.

Dans la pratique, on ne démarre pas suivant une caractéristique naturelle : on passe d'une caractéristique à une autre, de façon à maintenir le couple moteur autour d'une valeur moyenne comprise entre un maximum et un minimum. Le couple moteur est alors discontinu quand on saute d'une caractéristique à la suivante, cette variation est d'autant moindre qu'il y a plus de touches. On peut, en général, admettre alors que le couple moteur C_m est sensiblement constant.

Si, en outre, C_r est constant à toute vitesse, alors l'accélération est constante et le démarrage se poursuit suivant la loi simple du mouvement uniformément accéléré.

On peut le plus souvent dans un calcul de démarrage simplifier le problème pour ne distinguer que deux périodes :

(a) Démarrage à accélération constante pendant lequel on passe de la première à la dernière caractéristique.

(b) Fin du démarrage suivant la dernière caractéristique naturelle à accélération décroissante

Les 2 périodes correspondent aux portions (1) et (2) de la courbe vitesse-temps (fig. 100)

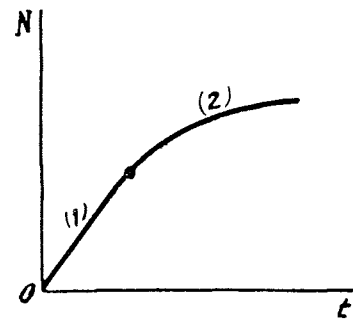


FIG. 100. — Les 2 périodes du démarrage.

Première période : accélération constante. On utilise les lois simples du mouvement uniformément accéléré

(a) Couple. — Pour passer de la vitesse nulle à la vitesse angulaire finale ω_n le couple nécessité par la mise en vitesse est

$$C_\gamma = K \times \gamma$$

avec

$$\gamma = \frac{\omega_n}{T_1}$$

T_1 la durée de la période de démarrage considéré.

Le moteur doit donc développer (fig. 101) un couple

$$C_m = C_r + C_\gamma$$

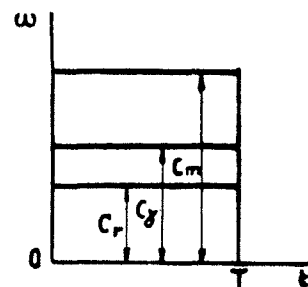


FIG. 101. — Couples pendant le démarrage.

On voit qu'un moteur, lorsqu'il doit surmonter au démarrage un couple résistant égal au couple normal, doit développer sur son arbre un couple supérieur au couple normal par suite du couple exigé par la mise en vitesse. Pour un démarrage rapide le

couple de mise en vitesse peut être très supérieur au couple résistant normal.

b) Vitesse. — La vitesse varie linéairement en fonction du temps de 0 à ω_n (fig. 102).

c) Puissance. — Le moteur doit développer une puissance

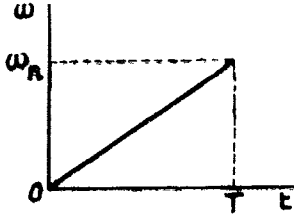


FIG. 102. — Vitesses pendant le démarrage.

$C_m \omega$; C_m étant constant, cette puissance augmente linéairement jusqu'à la fin du démarrage, où elle prend la valeur

$$C_m \omega_n = C_i \omega_n + \frac{K \omega_n^2}{T_1}$$

La puissance moyenne développée est :

$$\frac{C_m \omega_n}{2}$$

Deuxième période : accélération décroissante.

Il faut recourir à l'intégration graphique.

L'arc de courbe vitesse-temps correspondant à cette période du démarrage est indépendant de l'accélération constante réalisée pendant la première période du démarrage.

2° *Translation*. — Les relations sont analogues, mais la notion d'espace parcouru joue un rôle tandis que dans le cas du mouvement de rotation la notion d'angle décrit pendant la rotation ne présentait pas d'intérêt particulier.

L'équation du mouvement est :

$$\frac{P'}{g} \frac{dv}{dt} = F_m - F_r$$

P' est le poids d'inertie : poids du véhicule majoré d'un certain pourcentage pour tenir compte de l'inertie des pièces en rotation

F_r est l'effort résistant, égal à $P (r \times i)$ en alignement droit.

F_m et F_r sont des fonctions de V , ce qui permet l'intégration

On démarre de même à accélération constante.

a) Effort. — Pour passer de la vitesse 0 à la vitesse finale V_n , l'effort nécessaire pour la mise en vitesse est

$$F_\gamma = \frac{P'}{g} \gamma$$

avec

$$\gamma = \frac{V_n}{T_1}$$

Le coefficient de traction correspondant avec l'effort de démarrage est :

$$\frac{F_\gamma}{P} = \frac{P'}{P} \frac{\gamma}{g}$$

il est exprimé en Kg par tonne par le même nombre que l'accélération en cm/sec^2 majorée du rapport $\frac{P'}{P}$.

Le moteur développe au démarrage l'effort total

$$F_m = F_r + F_\gamma$$

b) Vitesse. — La vitesse varie linéairement en fonction du temps de 0 à V_n .

c) Espace. — L'espace parcouru pendant la durée du démarrage est :

$$e = \frac{V_n T_1}{2}$$

d) Puissance. — La puissance développée par le moteur à la vitesse V est :

$$F_m \times V$$

sa valeur finale est :

$$F_i V_n + \frac{P'}{g} \frac{V_n^2}{T_1}$$

5° *Freinage d'arrêt*. — 1° *Rotation*. — Le problème est assujéti à l'équation du mouvement

$$-K \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt} = C_i - C_m$$

C_i étant la somme des couples retardateurs, qui doit l'emporter sur la somme C_m des couples moteurs qui tendent à entretenir le mouvement, car il n'y a ralentissement que si $C_r > C_m$.

Le terme $-\frac{dN}{dt}$ est alors positif car N diminue quand t augmente

On représentera le premier membre par C_γ .

Si l'on connaît la courbe de C_r en fonction de la vitesse (caractéristique du moteur dans son fonctionnement en génératrice), et la courbe de C_m , on pourra résoudre le problème.

Dans la pratique, on freinera à couple C_r constant en sautant d'une caractéristique sur une autre ; si le couple C_m reste sensiblement constant, le freinage se fera à retardation constante. Les formules sont analogues à celles du démarrage.

Le moteur travaillant en génératrice doit développer un couple

$$C_i = C_m + C_\gamma$$

En général, le couple C_r est une somme de deux couples :

1° Couple C_{rp} dû aux résistances passives (frottements, ventilation. .)

2° Le couple C_{rg} dû au moteur travaillant en génératrice.

Le moteur devra développer en génératrice le couple

$$C_{rg} = C_m + C_\gamma - C_{1p}$$

c'est-à-dire que les résistances passives viennent en *déduction* du couple à fournir par le moteur travaillant en génératrice, tandis qu'au démarrage les résistances passives représentaient un effort *additionnel*.

2° *Translation*. — L'équation du mouvement est analogue :

$$-\frac{P'}{g} \frac{dV}{dt} = F_r - F_m$$

relation qui exige $F_r > F_m$ pour que la vitesse varie toujours dans le même sens en fonction du temps.

La question *adhérence* est à considérer pendant le freinage et intervient pour limiter l'effort de freinage possible du moteur ; l'effort retardateur exercé sur l'arbre pendant le freinage est équilibré par la réaction du bandage sur le rail (engrènement des aspérités des surfaces en contact), effort proportionnel au poids qui charge les essieux freinés.

Si cet effort vient à dépasser une certaine limite — égale à l'effort adhérent — il y a patinage : les roues s'immobilisent et glissent sur le rail, l'effort retardateur devient alors indépendant de l'effort de freinage exercé sur l'essieu.

(A suivre.)