

19/2000

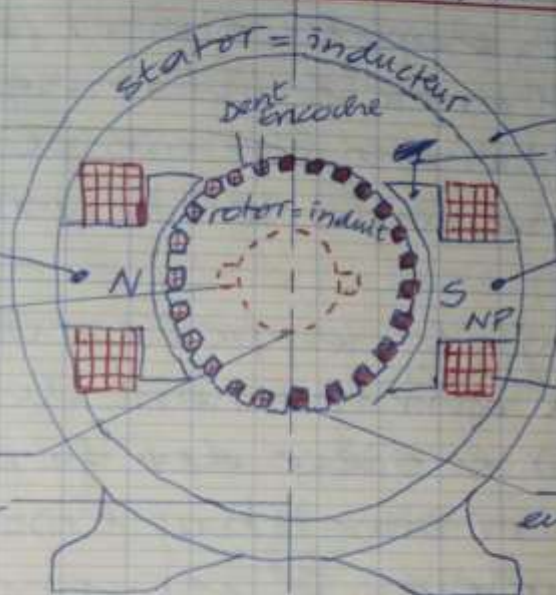
Partiel: CONSTRUCTION - PRINCIPE DES MACHINES A COURANT CONTINU

Description:

arbre à aigles

pôle principal
(Nord)
balai

collecteur
ligne (plan) neu-
tre.



culasse
épanouissement
polaire

pôle principal
(Sud)

NP = noyau polaire

Bobines in-
ductrices

Bobines ou
enroulement
d'induit

Fig. 1. Schéma simplifié d'une machine à
courant continu bipolaire vue en bout.

support de balai

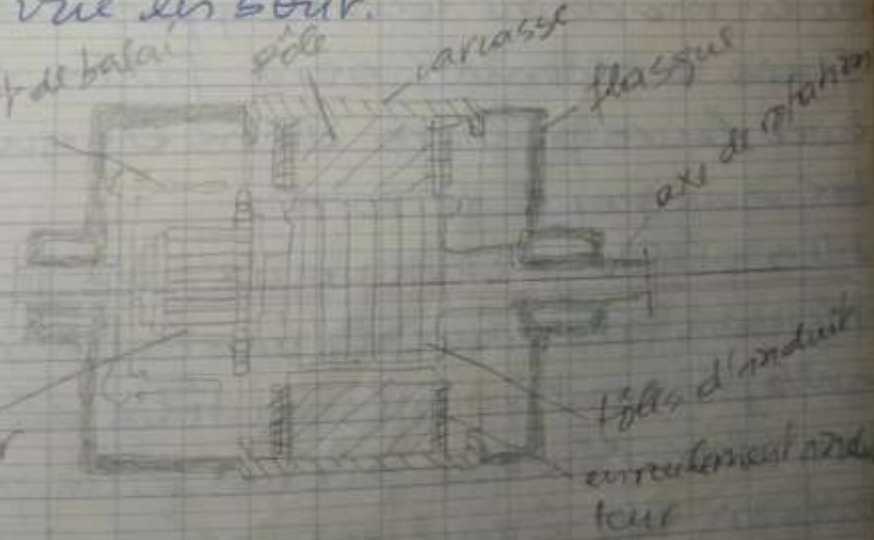
pôle

carcasse

flaques

axe de rotation

collecteur



lâtes d'induit
enroulement inducteur

La machine à courant continu est totalement réversible elle peut indifféremment fonctionner en moteur ou en génératrice. Elle a donc une construction unique.
La machine comporte deux parties principales :

- l'une fixe, appelée stator, est un électroaimant. Il porte le bobinage qui crée le flux (il peut aussi être simplement un aimant permanent). Le stator constitue l'inducteur.
- l'autre mobile, appelée rotor, qui porte le bobinage ^{lequel} ~~sur~~ tournant dans le flux inducteur est le siège des forces électromotrices. Le rotor constitue l'induit.

I-1 L'Inducteur: Il est constitué par :

- Une culasse en acier. C'est la carcasse de la machine. Elle ^{porte les pôles et sur} ~~supporte toutes les parties~~ fixes. Extrémités sont fixées les flasques ^{de} avec leurs paliers dans lesquels tourne l'arbre qui porte le rotor.

- les pôles principaux: Ils peuvent être massifs mais très souvent, pour des raisons économiques, ils sont formés de tôles ^{de 1 à 1,5 mm d'épaisseur} découpées puis assemblées. Chaque pôle a deux parties: le noyau polaire sur lequel est logé la bobine inductrice,

laquelle, parcourue par le courant excitateur produit un champ magnétique; et les bobines inductrices peuvent être associées ~~en parallèle~~ en série ou en parallèle) et les épanouissements polaires qui élargissent la section de passage de la section de passage du flux dans l'entrefer. Le moyeu polaire et les épanouissements polaires constituent la même pièce métallique. Les pôles sont faits en nombre pair (Nord et Sud). Les lignes d'induction sortent du pôle Nord et pénètrent dans le pôle Sud. Une machine ayant 2 pôles est dite bipolaire (resp. 4, 6, etc...). Une machine ayant 4 pôles est dite tétrapolaire, 6 pôles est dite hexapolaire, etc...)



bipolaire



tétrapolaire

- les bobines inductrices: Placées autour des pôles, elles servent à produire le champ magnétique (flux).

I-2 l'Induit: Il tourne dans un champ magnétique fixe et sera donc le siège de per-

car ces pertes produisent le freinage de la rotation pour les courants de Foucault (opposition à la source de leur création (lois de Lenz) et l'échauffement (courants de Foucault et hystérésis)

inadmissibles par hystérésis et par courants de Foucault. L'induit doit donc être feuilleté. Les tôles qui le constituent ^(0,2 à 0,5 mm) sont découpées à la presse isolées les unes des autres au papier ou au vernis, calées sur l'arbre de la machine et pressées les unes contre les autres par des flasques de serrage. La qualité des tôles est choisie pour que les pertes par hystérésis soient aussi faibles que possibles.

Sur la périphérie de l'induit, on a découpé des encoches ou des rainures dans lesquelles viendront se loger les conducteurs de l'induit. Le morceau de tôle restant entre deux encoches s'appelle une dent. ^{l'espace entre l'induit et les pôles est l'entrefer}

Définitions pratiques pour le bobinage de l'induit
chaque fil pris isolément s'appelle un conducteur, ou encore un brin. Un conducteur ou un brin est dit actif lorsqu'il est logé dans une encoche du rotor. C'est alors dans ce brin qu'est induite la f.e.m. de la machine (fonctionnement en génératrice) ou que s'exerce la force électromagnétique ($F = I \cdot l \cdot B$) dont la

point importante : Etant donné que l'enroulement d'induit est formé de spires dont chacune a deux conducteurs actifs, le nbr total de conducteurs actifs d'art mach. à ce est toujours pair.
 moment ou couple fait tourner le rotor (par exemple en moteur). le conducteur ou brin est dit inactif s'il n'est pas logé dans une encoche. Deux conducteurs actifs (consécutifs) forment une spire. Un groupe de spires préparées ensemble ^{et isolées} d'où ne sortent que le début de la 1^{ère} spire et la fin de la dernière spire pour permettre la liaison à avec les autres groupes de spires s'appelle une section. les brins actifs d'une même section, placés dans une même encoche constitue un faisceau. Plusieurs sections peuvent être groupées (= placées sous le même enrubannage) on obtient alors une bobine ^{ou enroulement} qui comporte autant ~~de~~ de fils d'entrée et de fils de sortie, que de sections.



Fig 2 brin actif, spire, section.
 aller au collecteur.

lame de collecteurs et le nbre de sections.
Alors à I-3 Reaching magn. d'induit.

I-3-2 Le collecteur: Il est placé à l'extrémité de l'induit et est calé sur le m arbre. Il est formé de lames de cuivre isolées l'une de l'autre par un isolant à base de mica. Il a une forme cylindrique. chaque lame de collecteur ~~est~~^{se ter-}mine du côté de l'induit par une ailette dans laquelle sont soudées l'entrée d'une section et la sortie d'une autre. Il y a donc autant de lames de collecteur que de sections.

sur la surface latérale du collecteur frottent, grâce à des ressorts, des balais en graphite

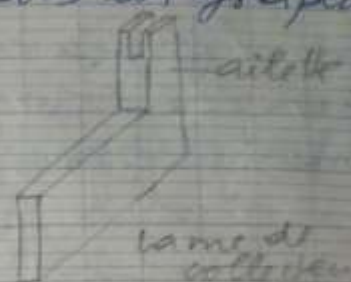
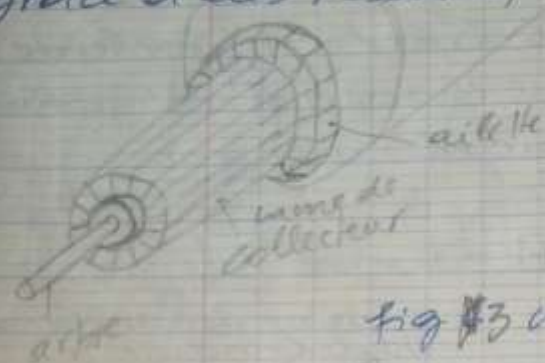
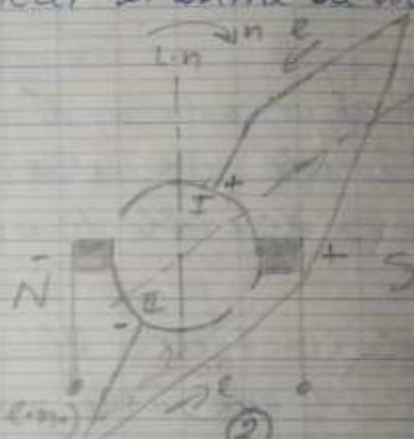
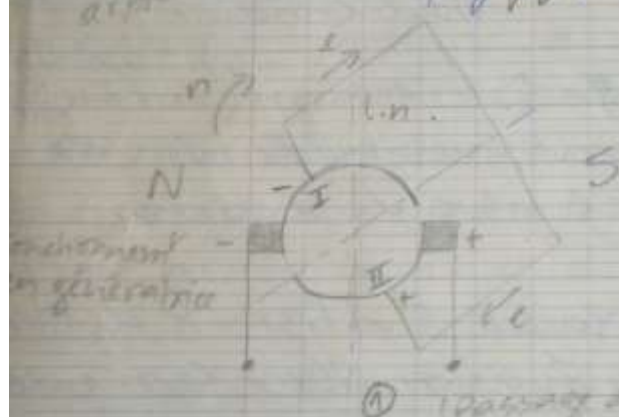


fig #3 collecteur et lame de collecteur



expliquer que du passage de ① à ② les 2 lames I et II de collecteur changent de polarité mais aussi de bob. En résulte que les balais conservent tjs la m^{me} polarité et qu'entre les 2 bornes la tension est continue. Toutefois bien que les f.e.m. induites soient alternées. Si on envoyait le courant de la spire (moteur) à travers de la ligne neutre, le courant s'inverserait et la rotation continuerait.

5-2-3
entrer à Dispositions.
les sections de l'induit (paires de la fem)



I-2-3

Disposition des sections de l'induit:

les deux moitiés d'une section se trouvent dans des encoches presque diamétralement opposées de façon à embrasser ds le plan neutre la totalité ^{ou la plus grande partie} du flux qui sort ~~du~~ du pôle Nord vers le pôle sud (machine bipolaire). les sections sont mises en série et à la fin de cette mise en série la fin de la dernière section est soudée au début de la 1^{ère} section. ^{cette mise en série se fait en} les conducteurs d'entrée et gros, de 2 façons: l'enroulement imbriqué et de sorte d'une section peuvent être soudés à l'enroulement ondulé.

deux lames de collecteur ~~origines~~ (enroulement imbriqué) ou ~~enroulement ondulé~~ (enroulement ondulé) les balais, en graphite, frottent sur le collecteur et permettent le passage du courant de l'induit vers l'extérieur (générateur) et vice-versa (moteur)

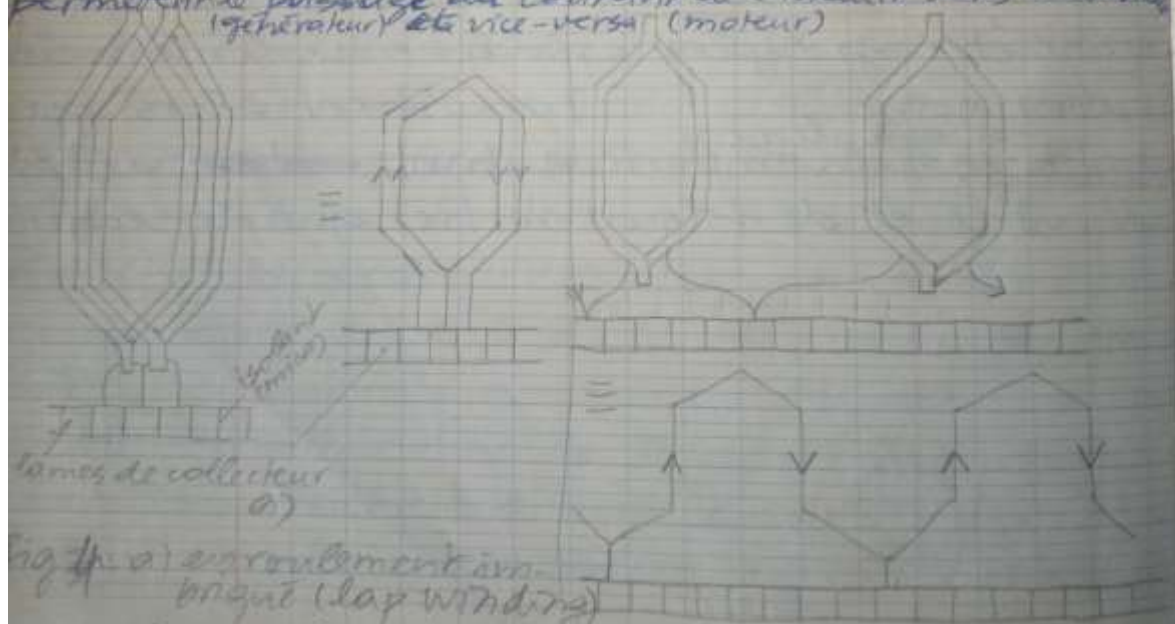


Fig. 11: a) enroulement imbriqué (lap winding)

b) enroulement ondulé (wave winding)

lignes neutres (plan neutre) \equiv ligne (plan) où l'axe spire est
perpendiculaire aux lignes de champ du champ magnétique
(plan maximum) \rightarrow

Enroulement imbriqué ds une
lame à c.c. bipolaire
lignes de collecteur

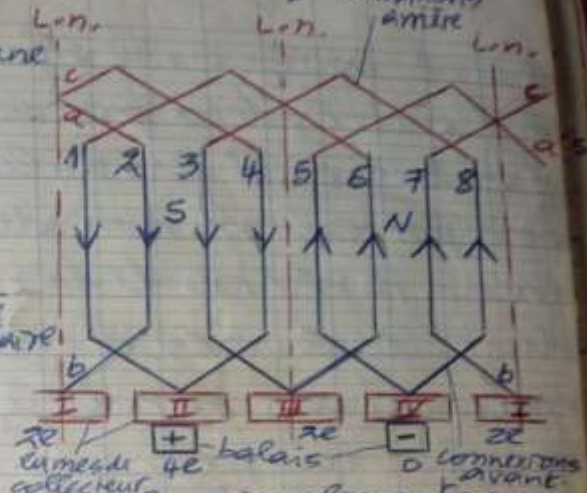
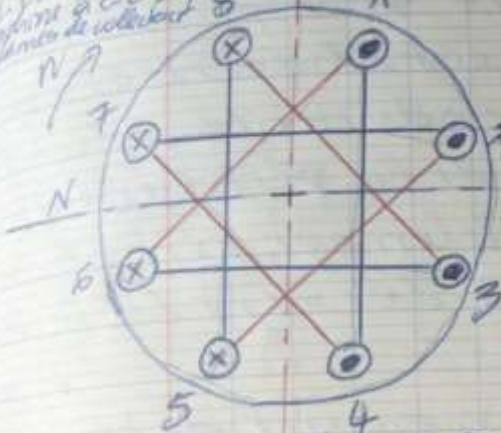


Fig 6 Développement panoramique de la fig 4.

Fig 6 Vue en bout d'un enroulement à 3 conducteurs

- connexions 5 arrière

x fem dirigée vers l'arrière

o fem dirigée vers l'avant

on suppose que ds chacune des 8 encoches, on a un conducteur

et les lames de collecteur II et IV sont reliées à des

conducteurs ayant des fems de m sens. En partant

de la lame IV choisie coe référence (arbitrairement)

et si on parcourt l'enroulement, on rencontre les conducteurs

avec des fems de m sens: IV (zéro); 8 et 3 en

série; III (2e); 6 et 1 (en série); II (4e). De m ds l'autre

sens on a: IV (zéro); 5-a-2; I (2e); 7-c-4; III

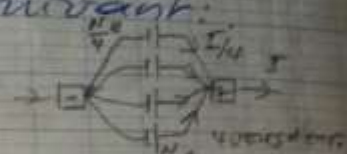
la ddp est + gde entre les lames II et IV,

c'est entre ces 2 lames qu'on place les balais

⊕ en I et ⊖ en IV. Pour aller d'un balai à l'autre, deux parcours sont possibles. Il y a 2 voies d'enroulement. Chacune de ces voies comporte le m^{ème} n^{bre} de conducteurs, identiquement repartis le long de la périphérie d'induit. Ces 2 voies d'enroulement sont électriquement en parallèle et donnent la m^{ème} fem totale (ici 4e).

Si l'induit tourne d'un quart de tour, les conducteurs et les lames de collecteur tournent $\frac{1}{4}$ d'un quart de tour, seuls les balais sont immobiles. Les conducteurs 1, 2 prennent la place de 3 et 4; 3, 4 la place de 5, 6; 5, 6 la place de 7, 8 et 7, 8 la place de 1, 2. De m^{ême} chaque lame de collecteur a pris la place de la suivante. On retrouve la m^{ême} configuration que précédemment. Dès qu'un conducteur traverse la ligne neutre (l.n.), il change (p.ex. ici, 3, 4 et 7, 8), il change de voie d'enroulement et la fem induite de sorte que pour le circuit extérieur, la fem totale reste la m^{ême} change de sens, il en est de m^{ême} pour le courant. On dit que le conducteur commute et ce phénomène s'appelle la commutation. Chaque conducteur actif produisant une fem

c'est assimilable à un générateur. Entre les 2 bornes, les 2 voies d'enroulement sont en parallèle, chacune d'elle étant équivalente à 4 générateurs de f.e.m. e chacun, d'où le schéma électrique équivalent suivant:



N = nombre de conducteurs actifs de l'induit.

Si on a 2a voies d'enroulement, il y a $\frac{N}{2a}$ conducteurs par voie et soit $\frac{N}{2a}$ une f.e.m. induite. Cette étude est valable quel que soit le nombre de lames de collecteurs et le nombre de sections.
 Voir à I-3 Réaction magn. d'induit.

3-3-2 Collecteur: Il est placé à l'extrémité de l'induit et est calé sur le m. arbre. Il est formé de lames de cuivre isolées l'une de l'autre par un isolant à base de mica. Il a une forme cylindrique. Chaque lame de collecteur ~~est~~ se termine du côté de l'induit par une ailette dans laquelle sont soudées l'entrée d'une section et la sortie d'une autre. Il y a donc autant de lames de collecteur que de sections.

nouvelle ligne neutre.



I-3 Réaction magnétique d'Induit



fig 7: Moteur fonctionnant en moteur

- lignes d'induction magn. produites par l'induit seul
- lignes d'induction magn. produites par l'inducteur seul

fig 8: lignes d'induction résultantes

si on suppose que le sens du courant des conducteurs est celui indiqué sur la fig 7, on voit que l'induit équivaut à une bobine dont l'axe (magnétique) est dirigé suivant N_1-S_1 . Dans ces conditions l'induit tourne dans le sens indiqué. Les lignes d'induction magn. résultantes ont la forme indiquée sur la fig. 8. Lorsque l'inducteur et l'induit sont parcourus simultanément, chacun, par son courant normal. le flux de l'induit déforme le flux inducteur (lignes d'induction en bleu fig 7). C'est la réaction magnétique d'induit. On constate sur la figure 8, un

renforcement de l'induction dans les cornes polaires c_2 et c_4 et une diminution de l'induction dans les cornes polaires c_1 et c_3 . L'induction résultante s'incline sur sa position initiale, de sorte que la ligne neutre N-S, [sur laquelle sont placés les balais] n'est plus perpendiculaire aux lignes d'induction.

conséquences : 1) Il y a une réduction du flux utile par pôle ^(à cause de l'apparition d'un flux de fuite) (de l'inducteur) et donc une diminution de la f.e.m.

2) L'induction magnétique près des cornes c_2 et c_4 étant + gde que près des cornes c_1 et c_3 , la f.e.m. (variation du flux par unité de temps) ~~est~~ des les conducteurs qui s'y trouvent est bien + gde que celle induite des les autres conducteurs ~~est~~. Une tension assez élevée peut apparaître entre 2 lames consécutives du collecteur et un arc (électrique) peut s'établir entre ces 2 lames et, selon la puissance de la machine, les détruire (brûler) d'où une limitation de la puissance de la machine.

3) L'induit crée un flux et a donc une inductance ($\Psi = Li$). Cette inductance est gênante si l'on veut faire varier très rapidement le cou-

rant dans l'induit et donc le couple.

compensation: les conséquences citées ci-dessus sont nuisibles au bon fonctionnement de la machine. Pour les combattre, il faut créer un flux opposé à celui produit par l'induit.

Un enroulement compensateur est placé dans les encoches des pôles principaux de l'inducteur. Il produit un flux qui annule celui de l'induit et évite la déformation du flux produit par les pôles; pour cela il est traversé par le même courant I que l'induit.

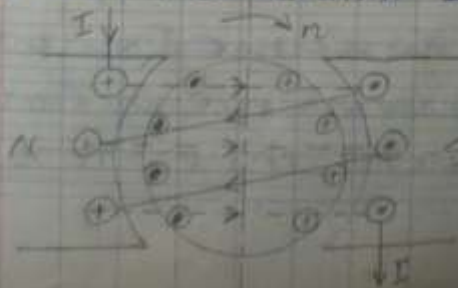


fig. 3 Enroulement compensateur

I-4:

Commutation: la commutation, en électricité, désigne toute opération de changement de sens de courant ou de tension.



fig 10 commutation.

sur la fig 10, la section en rouge est reliée aux lames consécutives I et II du collecteur. Entre les instants où la lame I est sous le balai (fig 10. a) et où la lame II ~~est~~ y sera (fig 10-c) le ^(on suppose 2 voies d'armature) courant $I/2$ devra changer de sens dans la section, donc varier de $\Delta I = I/2 - (-I/2) = I$ en un temps très court. le circuit étant inductif, une f.e.m. d'auto-induction de commutation prend naissance dans la section et tend à maintenir l'ancien courant (fig 10-b) jusqu'au moment où la lame I quitte le balai. cette séparation de la lame I du collecteur et du balai est équivalente à l'ouverture d'un circuit inductif et un arc s'amorce

entre le balai et la lame I. Si au moment où la lame II quitte à son tour le balai, cet arc n'est pas éteint, il va se propager d'une lame à l'autre, encercler le collecteur et créer un court-circuit entre toutes les lames. Pour combattre éliminer ces effets néfastes de la commutation, on a recours à deux solutions.

1^{ère} solution : Décalage des balais.

On décale les balais de façon empirique, dans le sens de la rotation (fonctionnement en génératrice) ou dans le sens contraire de la rotation (fonctionnement en moteur) de façon à les amener sur les lames de collecteur correspondant à la ligne neutre réelle $N_n' - S_n'$ (fig 8). Ce décalage se fait empiriquement en recherchant la position pour laquelle on obtient le minimum d'étincelles.

Ce procédé n'est utilisé que sur les machines de faible puissance, pour lesquelles on adopte un décalage moyen invariable.

2^e solution : Pôles auxiliaires ~~annulant~~

ds les machines modernes, la suppression des étincelles est obtenue par les pôles auxiliaires. Ils portent des bobines en série avec l'induit et donc ^{qui} sont parcourues par le ~~le~~ courant débité par l'induit. Les pôles produisent un flux opposé au flux produit par l'induit. Ces pôles auxiliaires permettent un fonctionnement sans étincelles en maintenant les balais sur la ligne neutre théorique.

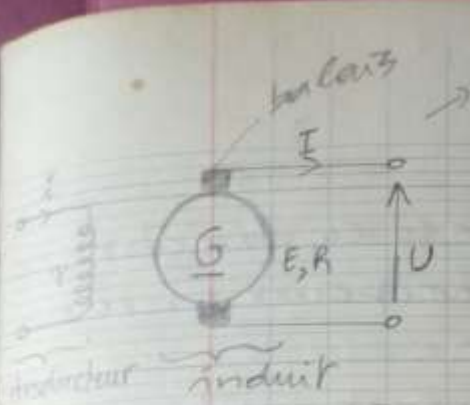


Polarité des pôles auxiliaires

En suivant le sens de la rotation, on passe d'un pôle principal à un pôle auxiliaire (resp. de m nom) de nom contraire ^{si la machine à c-c est une génératrice (resp. un moteur)}.

fig. M Pôles auxiliaires d'une machine à c-c fonctionnant en génératrice.

I-5 Représentation normalisée et identification de la machine utilisée



on peut aussi avoir.

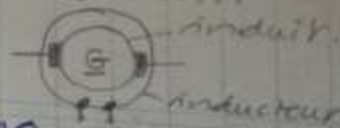


fig. 12. repres. normalisée d'une mach. à c-c. L'indication G désigne le fonctionnement en génératrice ou dynamo et le trait horizontal sous la lettre G indique la tension continue.

Si la machine à c-c fonctionnerait en moteur, on aurait plutôt à l'intérieur du cercle d'induit l'indication M et le sens du courant I de l'induit changerait. L'inducteur est représentée par une bobine parcourue par le courant inducteur ou courant d'excitation i . L'induit a une f.e.m E et une résistance R et fournit un courant I au circuit extérieur sous une tension U . Les grandeurs électriques de l'induit sont couramment écrites en majuscules.

La plaque signalétique d'une machine électrique indique le type de la machine : [continue ou alternative.] Génératrice ou Moteur.

La plaque signalétique d'une machine électrique indique le type de la machine : [continue ou alternative.] Génératrice ou Moteur.

Le type de la machine : [continue ou alternative.] Génératrice ou Moteur.

Le type de la machine : [continue ou alternative.] Génératrice ou Moteur.

Le type de la machine : [continue ou alternative.] Génératrice ou Moteur.

tionnement déterminé.

- le constructeur
- les valeurs nominales (= en fonctionnement normal) des principaux paramètres de fonctionnement.

Pour une machine à courant continu, le constructeur indique:

- la tension nominale : U_N
- l'intensité nominale : I_N
- la puissance nominale : P_N ou Puissance utile. Pour une génératrice $P_N = U_N I_N$. Pour un moteur c'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre et on aura tjrs $P_N < U_N I_N$ à cause des pertes.
- la vitesse de rotation nominale : n_N en tr/min.

EX:

CONSTRUCTEUR

Type: Génératrice

N°:

Volts: 120

Ampères: 12

KW: 1,4

Tr/min: 1400



La machine à c-c présente une plaque à bornes comportant 4 bornes (quelquefois 6 ou 8 pôles auxiliaires et pôles de compensation) groupées par paires de dimension et/ou de couleurs différentes. Deux de ces bornes sont reliées ^{souvent les + grosses} aux balais: on y prélève la f.e.m. induite. Deux autres sont connectées aux extrémités de l'axe inducteur et permettent son alimentation.

I-6 Courbes caractéristiques:

L'état de fonctionnement d'une machine à c-c est fixée par la valeur de quatre paramètres ou variables. (on ne considère pas la température en la supposant constante et la machine en régime permanent établi): la vitesse de rotation n , le courant inducteur i , la tension d'induit U et le courant d'induit I , soit (n, i, U, I) . Chaque fois que ces paramètres reprendront les mêmes valeurs (n_0, i_0, U_0, I_0) p.ex. la machine se retrouvera dans le même état représenté par le point de fonctionnement A_0 .

Sur ces 4 variables, trois sont indépendantes & l'autre en peuvent être fixées, alors la 4^e prendra une valeur fonction des 3 autres. on peut écrire $n = f(\tilde{i}, U, I)$; $\tilde{i} = g(n, U, I)$; $U = h(n, \tilde{i}, I)$; $I = l(n, \tilde{i}, U)$

Une caractéristique est la courbe associée à la relation obtenue entre deux variables quelconques quand on a donné à chacune des deux autres une valeur constante.

Cette relation ne peut que très rarement être écrite sous une forme mathématique simple, c'est pourquoi les caractéristiques seront obtenues par des relevés expérimentaux encore appelés essais de machines. les principales caractéristiques sont:

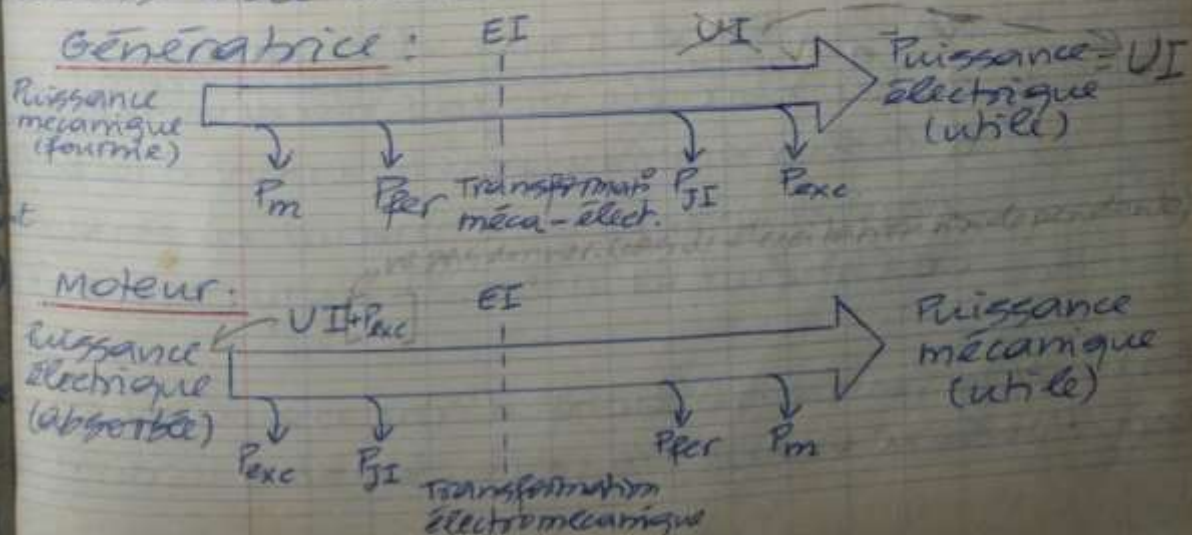
Paramètres constants	Paramètres variables	Courbes	Noms usuels des caractéristiques
$n, I (G)$	\tilde{i}, U	$U(\tilde{i})$	caractéristique à courant constant
$n, \tilde{i} (G)$	I, U	$U(I)$	caractéristique externe (d'imp)
$n, U (G)$	\tilde{i}, I	$\tilde{i}(I)$	caractéristique de réglage
$I, U (M)$	n, \tilde{i}	$n(\tilde{i})$	caract. de réglage de la vitesse
$\tilde{i}, U (M)$	n, I	$n(I)$	caract. de vitesse en charge
$\tilde{i}, I (G/M)$	n, U	$n(U)$	caract. de vitesse sous tension variable

G, M \in En G, ces caract. sont tracées lors d'un fonctionnement en générateur (G) ou en moteur (M).

Régul: la caract. à vide d'une génératrice à c-c est la courbe à courant constant $(I_a = 0)$ par $U = E - R I_a$, à vide un voltmètre (à haute résistance) est branché aux bornes de l'induit, donc $I_a = 0 \Rightarrow U_{oc} = f(I_a)$ à vide ($I_a = 0$).

I-7 Pertes et Rendements: les diverses pertes d'une machine à c-c sont:

- les pertes par excitation P_{exc} (si la machine n'est pas à aimants permanents). c'est la puissance fournie au circuit d'excitation. $U_{exc} I_{exc}$
 - les pertes joule ds le circuit de l'induit $P_{JI} = R_{induit} I_a^2$ (on néglige la chute de tension aux contacts balais-collecteur e_b et par conséquent les pertes correspondantes $e_b I_a$ par effet joule)
 - les pertes dans le fer de l'induit P_{fer}
 - les pertes mécaniques P_m
- On a l'écoulement de puissance suivant dans une machine à c-c:



le rendement est très égal au quotient de la puissance utile par la puissance absorbée ou fournie mécaniquement (à l'induit) ^{si on prend en compte la ch. de l'induit}

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_{\text{absorbée}} - \sum P_{\text{pertes}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{(VI + P_{\text{exc}}) - R I^2 (-e_g I) - P_{\text{fer}} - P_m - P_{\text{ind}}}{VI + P_{\text{exc}}}$$

pour le moteur serie $P_{\text{absorbée}} = VI$

$$\eta_{\text{générateur}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{utile}} + \sum P_{\text{pertes}}} = \frac{VI}{VI + P_{\text{exc}} + P_{\text{fer}} + P_m + P_{\text{ind}}}$$

$(R I^2 + e_g I)$
On remarque que $e_g I = P_{\text{exc}}$

I-8 F.E.M. dans une machine à courant continu

on pose: N le nbre total de brins actifs
 n la vitesse de rotation en tr/s

$2a$ le nbre de voies d'enroulement
 a = nbre de paires de voies d'enroulement
 $2p$ le nbre de pôles p = nbre de paires de pôles
 Φ le flux sous un pôle (= sortant d'un pôle Nord et entrant ds l'induit ou sortant de l'induit et entrant ds un pôle Sud)



En un tour, un brin actif d'une machine à multipolaire ayant les caractéristiques ci-dessus

coupe $2p$ fois le flux ϕ . la variation du flux est donc: $\Delta\phi = 2p\phi$.

la vitesse de rotation étant n tr/s, la durée d'un tour est: $\Delta t = \frac{1}{n}$ sec

or la f.e.m. induite est: $e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$. soit pour le brin actif $e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{2p\phi}{1/n} = 2np\phi$

car la machine possède $2a$ voies d'enroulement, chacune de ces voies possède $\frac{N}{2a}$ brins actifs, et ces voies sont en parallèle.



la f.e.m. totale produite est: $E = \frac{N}{2a} e = \frac{N}{2a} \cdot 2np\phi$

soit $E = \frac{p}{a} N n \phi$

E en volts, n en tr/s, ϕ en Weber (Wb)

chacune des voies d'enroulement (et donc de l'un des brins actifs) est parcourue par un courant $I' + q$. $I' = \frac{I}{2a}$

Donner le texte "Autre formulation de la f.e.m. d'une machine" sur les feuilles A4

AUTRE FORMULATION DE LA FEM D'UNE MCC.

①

Pour un enroulement imbriqué (lap-winding en anglais), les deux terminaisons ^{d'une section} de l'induit forment $q_a - d$ l'entrée et la sortie d'une section, sont soudées à deux lames consécutives du collecteur, alors que pour l'enroulement ondulé, les deux terminaisons d'une section sont soudées à deux lames non consécutives du collecteur, $c - a - d$, situées à une "certaine" distance l'une de l'autre.

Un enroulement imbriqué possède autant de voies d'enroulement que de pôles (du stator). Par exemple, pour une machine à courant continu à 8 pôles et un enroulement ^{imbriqué} d'induit, les conducteurs d'induit forment 8 voies d'enroulement.

Un enroulement ondulé, par contre, ne possède que deux voies d'enroulement, quel que soit le nombre de pôles de la machine à courant continu.

Par conséquent, si une machine possède p paires de pôles, alors, le nombre de voies d'enroulement est :

- $2p$, pour un enroulement imbriqué ($q_a = 2p$)
- 2 , pour un enroulement ondulé ($q_a = 2$)

Pour une section donnée des conducteurs de l'induit et une densité de courant donnée dans les conducteurs, il s'ensuit que le courant total ^{produit par} l'enroulement imbriqué est p fois celui ^{produit par} l'enroulement ondulé. De l'autre côté, pour un nombre donné de conducteurs (actifs) de l'induit,

le nombre de conducteurs ^{en sens} d'une voie d'enroulement d'un enroulement ondule est p fois celui de l'enroulement imbriqué. En conséquence, pour une fem donnée générée par conducteur, la tension ^(fem) aux bornes de l'induit, ~~est~~ avec un enroulement ondulé est p fois celle avec un enroulement imbriqué. C'est pourquoi, en général, l'enroulement imbriqué est utilisé sur les machines pour basses tensions ^(pour circuits de basses tensions) et forts courants. ^{alors que l'enroulement ondulé est utilisé pour les circuits de haute tension et faibles courants.}

Exemple: une m.c.c. à 8 pôles possède 480 conducteurs. le flux magnétique et la vitesse (de rotation) sont t.q. la f.e.m. moyenne générée par conducteur actif est 2,2 V et chaque conducteur est capable de supporter la fourniture le passage d'un courant de 100 A lorsque la machine est en pleine charge. Calculer la fem à vide, le courant du circuit extérieur, à pleine charge et la puissance totale générée (produite) lorsque ^{l'enroulement d'} l'induit est : a) imbriqué ; b) ondulé.

Rep: a) Enroulement imbriqué: $2a = 2p = 8$ voies d'enroulement; $\text{nbre de conducteurs/voie} = \frac{N}{8} = \frac{480}{8} = 60$

f.e.m. à vide = nbre cond/voie \times f.e.m/cond. = $60 \times 2,2 \text{ V} = 132 \text{ V}$

courant fourni à pleine charge = courant à pleine charge/cond. \times nbre de voies d'enroulement = $100 \text{ A} \times 8 = 800 \text{ A}$

Puissance à pleine charge = courant total en pleine charge \times f.e.m. générée = $800 \text{ A} \times 132 \text{ V} = 105600 \text{ W} = 105,6 \text{ kW}$

b) enroulement ondulé. De la m. f.e.m. et de la t.q. on a: $2a = 2$ voies d'enroulement; $\text{nbre cond/voie} = \frac{N}{2} = \frac{480}{2} = 240$

f.e.m. à vide = $240 \times 2,2 = 528 \text{ V}$

courant total à pleine charge = $100 \text{ A} \times 2(\text{voies}) = 200 \text{ A}$

Puissance totale à pleine charge: $200 \text{ A} \times 528 \text{ V} = 105600 \text{ W} = 105,6 \text{ kW}$

la puissance générée par une m.c.c. est la même, quelle que soit l'enroulement d'induit soit imbriqué ou ondulé.

si on pose :

Φ = flux utile par pôle (Wb)

P = nbre de paires de pôles

N_t = vitesse de rotation (tr/mn) = $\frac{N_c}{60} \text{ tr/s} (= 12 \text{ tr/s})$

Z = nbre total de conducteurs actifs de l'induit

c = nbre de voies d'enroulement ($= 2a$)

E = fem totale produite entre balais (V)

on a : $E = 2 \frac{Z}{c} \frac{N_t}{60} P \Phi$ (Volts)

avec $\begin{cases} c = 2P \text{ pour l'enroulement imbriqué} \\ c = 2 \text{ pour l'enroulement endulé} \end{cases}$
tétrapolaire

Ex: 1) Une machine à cc possède un enroulement d'induit qui est endulé. L'induit possède 51 encoches possédant chacune 12 conducteurs, et tourne à 900 tr/mn. Si le flux utile par pôle est 25 mWb, calculer la fem produite.

Rep: Nbre total Z de conducteurs de l'induit.

$Z = 51 \times 12 = 612$; $c = 2$ (enroul^t endulé) ; $P = 2$

$N_t = 900 \text{ tr/mn}$; $\Phi = 25 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$

$$E = 2 \times \frac{612}{2} \times \frac{900}{60} \times 2 \times 25 \cdot 10^{-3} = 459 \text{ V}$$

2) Une mcc à 8 pôles possède un enroulement d'induit qui est imbriqué, et doit produire une fem (à vide) de 260V lorsqu'elle tourne à 350 tr/mn. Le flux utile par pôle est ~~de~~ 0,05 Wb. Si l'induit possède 120 encoches, déterminer un nombre convenable de conducteurs par encoche.

Rep: enroulem^t imbriqué et 8 pôles : $2P = 8 = c$

on doit avoir : $260 = 2 \cdot \frac{Z}{c} \cdot \frac{350}{60} \cdot 4 \cdot 0,05 \Rightarrow Z \sim 891$

Par encoche, on a : $\frac{Z}{120} = \frac{891}{120} \sim 7,425$ (ce nbre devant être entier, on l'arrondit à 8 qui est convenable. Cepen-

dont, le nbre total de conducteurs actifs deviendrait $8 \times 120 = 960$ conducteurs, or avec $\Phi = 0,05 \text{ Wb}$ et 891 conducteurs, on avait une fem de 260 V, alors avec 960 conducteurs, on aura une 260 V (la même fem que précédemment) avec un flux de :

$$0,05 \cdot \frac{891}{960} = 0,0464 \text{ Wb. par pôle.}$$

car $260 \approx 2 \cdot \frac{891}{8} \cdot \frac{350}{60} \cdot 4 \cdot 0,05 \quad (1) \quad (1) = (2) \Leftrightarrow \Phi \cdot 960 = 0,05 \cdot 891$
 $260 = 2 \cdot \frac{960}{8} \cdot \frac{350}{60} \cdot 4 \cdot \Phi' \quad (2) \quad \Leftrightarrow \Phi' = 0,05 \cdot \frac{891}{960} = 0,0464 \text{ Wb}$

Requ le nbre de conducteurs par encoche doit être pair car le nbre total de conducteurs actifs est pair, l'entrefer de l'induit étant constitué de spires (formant les xchons) et ayant chacune 2 conducteurs actifs.

PARTIE 2: MACHINES A COURANT CONTINU A EXCITATION SEPARÉE (= INDEPENDANTE)

Les machines à c-c se différencient par le mode d'alimentation de leur circuit inducteur. Si ce circuit est connecté à une source auxiliaire, la machine est dite à excitation indépendante ou séparée. S'il est alimenté par une partie de l'énergie produite, dans le fonctionnement en génératrice, par la machine elle-même, cette dernière est dite auto-excitatrice, de type dérivation ou shunt, série ou composée (compound) suivant le mode de connexions. La machine à c-c étant entièrement réversible, ^{donc,} ds le fonctionnement en moteur on a les moteurs de type dérivation ou shunt, série ou composée (compound) mais ~~elles~~ ces moteurs ne sont pas dits auto-excitatrices ^{elles} parce que dans les moteurs la source d'énergie électrique est externe.

Ce chapitre est consacré aux machines à c-c à excitation indépendante.

II - A GÉNÉRATRICE OU DYNAMO A EXCITATION INDEPENDANTE (Vitesse cste)

2.11-1-1 caractéristique à vide.

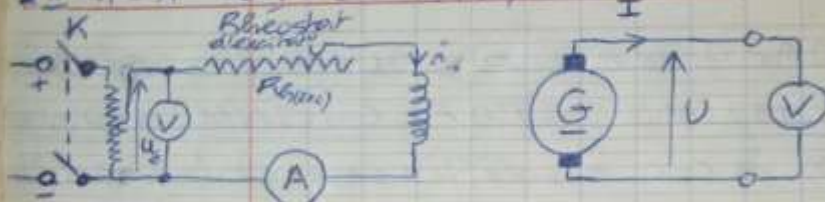
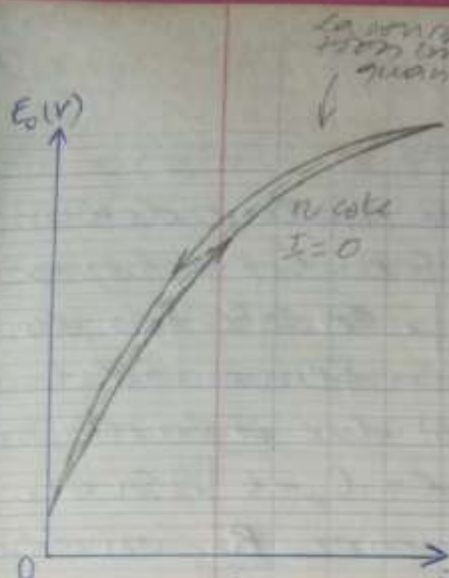


fig. 1 montage

L'excitation est séparée ou indépendante lorsqu'il y a un courant i_f de l'inducteur est fourni par une source autre que la génératrice elle-même (fig. 1). Le montage est anti-inductif parce qu'en cas d'ouverture de l'interrupteur K, l'inductance importante f.e.m. auto-induite due à la coupure d'un circuit inductif (loi de Lenz) se manifeste ds un circuit fermé et il n'y a pas production d'^{arc} ~~choc~~ ^{électrique} qui peut détériorer l'interrupteur et mettre en danger l'opérateur.]

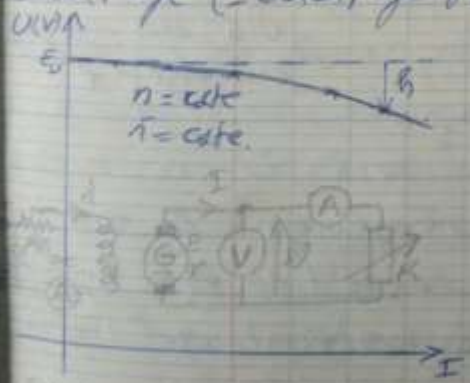
La caractéristique à vide $E_0(i_f)$ est la courbe relevée à vitesse n constante, d'ordinaire à la vitesse nominale n_N ^{et $I_a = 0$} . On branche un voltmètre aux bornes de l'induit. On fait varier la tension U par action sur le rhéostat d'excitation R_{exc} encore appelé rhéostat de champ.



On trace la courbe à courant d'excitation croissant puis décroissant. On obtient deux courbes distinctes. Ce doublement est dû à l'hystérésis. La courbe ne part pas de l'origine à cause du magnétisme ou la moyenne n rémanente. On utilise en général l'une de ces 2 courbes (ex. celle de n décroissant). A excitation est le E_0 à vide ($I=0$), on obtient E_{02} à n_2 à partir de E_{01} à n_1 par: $\frac{E_{02}}{E_{01}} = \frac{n_2}{n_1}$

II-1-2 : Caractéristiques en charge:

Caractéristique externe: ce sont les courbes $U(I)$ tracées à $n = \text{cste}$ et $\dot{n} = \text{cste}$. On fait débiter la génératrice dans un rhéostat de charge (= charge variable) à n est. on obtient l'écart entre E_0 et U en un pt de la courbe donne la réaction totale d'induit E_r . $R_{aui} I = E_0 - E$ et $E = U + E_r$. $E_r = E_0 - U$. E_0 est sur la courbe $E_0(I)$ à n est. U est donnée.



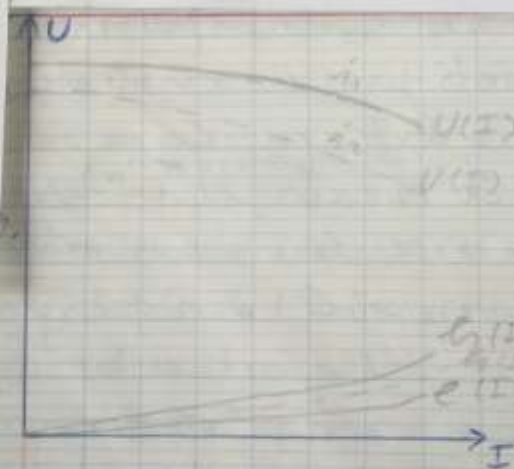
ex de valeurs

$I(A)$	0	5	10	15	20	25	30
$U(V)$	137	134,5	132	129	125	120	115

$E_{0(1500)} = U + I R_a$

$R_a = 0,78 \Omega$
 $R_{aui} = 0,5 \Omega$

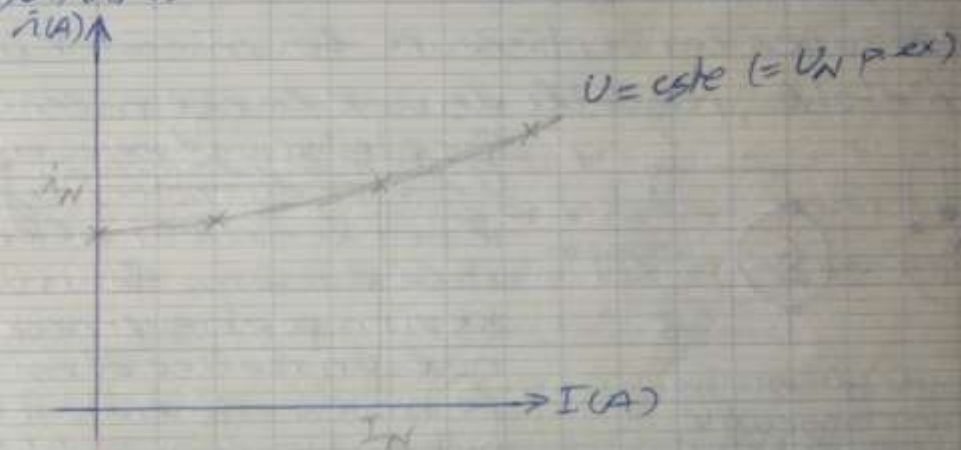
Pour $i = \text{cte}$, il y a réduction du flux utile par fct et donc, de la fem.
 on est conduit à distinguer pour une m. valeur de i :
 - le flux utile à vide Φ_0 (I ds l'induit nul) et la fem correspondante E_0
 - le flux utile en charge (I ds l'induit $\neq 0$) et la fem correspondante
 $E = \frac{1}{n} N \Phi = E_0 - \frac{1}{n} N \Delta \Phi = E_0 - e$; e est la réaction magn. d'induit.



Le pt de fonctionnement
 (I, U) est donné
 par l'intersection
 de la caractéristi-
 que $U(I)$ de la gé-
 nératrice avec la
 caractéristique
 $U(I)$ du récepte-
 alimenté.

II-1-3 caractéristique de réglage: ce sont
 les courbes $i = f(I)$ à $n = \text{cte}$ (en g^{le} n_n) et
 $U = \text{cte}$. Pour maintenir U constant qd I crâ

m.a : $\begin{cases} U = E - (RI + E_B) \\ E = E_0 - \frac{P}{\omega} n N \Delta \phi_0 \end{cases} \Rightarrow U = E_0 - (RI + E_B + \frac{P}{\omega} n N \Delta \phi_0) = E - (RI + E_B)$
 $= E_0 - \text{ch. de ch. réaction totale p. produit.}$
 soit $E_B = E_0 - U = RI + E_B + \frac{P}{\omega} n N \Delta \phi_0$ ces termes sont négligés
 $E_B \equiv$ chute de tension aux balais.
 on augmente E en augmentant i (p.ex. si la tension d'excitation est cste, en réduisant la résistance du rhéostat d'excitation). L'accroissement de i est d'autant + fort que U est plus grand car le circuit magnétique est plus saturé.



II-1-4 : Intérêt et Usages : L'étude que nous venons de faire est générale : les autres génératrices (shunt, série, etc...) seront des cas particuliers de la génératrice à excitation indépendante et toutes les formules leur seront applicables. L'inconvénient de la dynamo à excitation indépendante réside dans la nécessité

té d'une source auxiliaire (= 2^e source) de courant continu mais elle a l'avantage de permettre un réglage étendu, facile et précis de la tension aux bornes de l'induit. On l'utilise donc qd les qualités de réglage sont primordiales

Ex: 1) groupes convertisseurs fournissant une tension stable, réglable ds une large mesure.



Exemple de groupe convertisseur (le circuit inducteur n'est pas représenté)

Pour entraîner une dynamo, on peut utiliser un moteur asynchrone. Ici, le stator du moteur est alimenté par le secteur alternatif et la dynamo fournit une tension pratiquement continue. On réalise ainsi un groupe moteur-générateur qui permet d'obtenir un débit de courant ~~alternatif~~ continu à partir

du courant alternatif appelé groupe convertisseur.

2) groupes convertisseurs fournissant des tensions très précises pour l'électrolyse (nickelage, chromage)

3) groupes convertisseurs alimentant des moteurs à gdes variations de vitesse (machines outils, impr...

aller en fin de chapitre.
 tantes, ascenseurs rapides } Donner les formules
 en fin du chapitre

II-2 Moteur à excitation indépendante alimenté sous tension constante

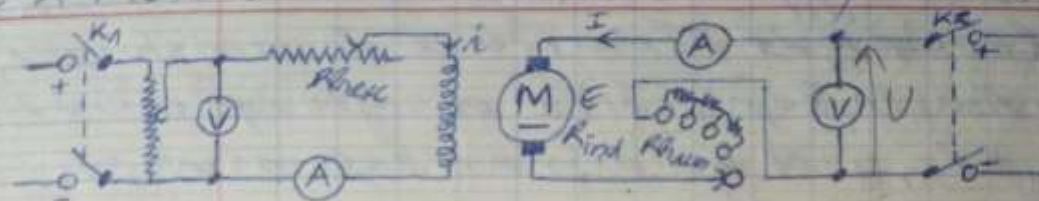


Fig 2 : Montage.

II-2-1 Nécessité d'un rhéostat de démarrage
 la loi d'Ohm relative aux récepteurs donne

$$U = E + R_{ind} I \Leftrightarrow I = \frac{U - E}{R_{ind}} = \frac{U - \frac{N}{N_0} \Phi}{R_{ind}}$$

Si $n=0$, $\Rightarrow E=0$ et I est maximal ($= \frac{U}{R_{ind}}$).
 au démarrage $n=0$ et I_d le courant de démarrage I_d est : $I_d = \frac{U}{R_{ind}}$

Ex: $R_{ind} = 0,3 \Omega$ et $r(\text{inducteur}) = 160 \Omega$, $U_N = 110V$
 $I_N = 30A$, $n_N = 1200 \text{ tr/min}$
 $I_d = \frac{110}{0,3} = 366A$ valeur inacceptable tant pour
 le réseau électrique que pour la machine
 prévue pour un courant de $30A$.

il y a donc lieu de réduire cette intensité de pointe au démarrage et pour cela, on place en série avec l'induit de résistance R_{ind} un rhéostat^{dit} de démarrage de résistance R_d . La résistance équivalente au groupement est $R = R_d + R_{ind}$ et au démarrage en a :

$$U = R I_d \Rightarrow R = \frac{U}{I_d}$$

Ex: soit à calculer pour le moteur précédent un rhéostat de démarrage t.q. le courant de pointe ne dépasse pas $1,5 I_n$

$$I_d = 1,5 I_n = 1,5 \cdot 30 = 45 \text{ A} \quad R = R_d + R_{ind} = \frac{U}{I_d} = \frac{110}{45} = 2,45 \Omega \Rightarrow R_d = 2,45 - R_{ind} = 2,45 \Omega - 0,3 = 2,15 \Omega$$

Un rhéostat de démarrage est un rhéostat à plots placé en série avec l'induit pendant le démarrage afin de limiter l'intensité absorbée par le moteur.

II-2-2 Couple :

$U = R_{ind} I + E \Leftrightarrow UI = R_{ind} I^2 + EI$; $R_{ind} I^2$ est perdu par effet joule dans l'induit et le reste d'énergie EI est transformée en énergie mécanique

une courbe $\Gamma(n)$ est appelée caractéristique mécanique [ou $n(\Gamma)$ ou $n(\Gamma_u)$] de $\Gamma_u(I)$ (Γ_u = couple utile) et $n(I)$ on peut déduire $n(\Gamma_u)$

Si on note Γ le couple électromagnétique du moteur

on a : $P_{\text{électr}} = EI = \Gamma \omega \Leftrightarrow \frac{P}{a} N n \Phi I = \Gamma 2\pi n$

d'où : $\Gamma = \frac{P}{a} \frac{N \Phi I}{2\pi}$ Γ en $\frac{Nm}{s}$ Φ en Wb I en A

La courbe $\Gamma(I)$ appelée caractéristique électromécanique [de couple] est tracée par le fabricant du moteur. La réaction d'induit n'est pas

parfaitement compensée, on doit remplacer Φ de la formule ci-dessus par $(\Phi - \Delta\Phi)$ où $\Delta\Phi$ est la contribution de l'induit à la réduction du flux utile Φ .

D'après la formule du couple ci-dessus, on voit que pour avoir un bon couple de démarrage, on démarre à flux maximum, en donnant à la résistance du réostate d'excitation une valeur nulle (court-circuit).

En gél, on admet : $1,5 I_n \leq I_d \leq 3,5 I_n$

Si on tient compte des pertes mécaniques, le couple utile sur l'arbre du moteur sera légèrement plus petit (que Γ) et vaudra :

$\Gamma_u = \Gamma - \frac{(P_m + P_{\text{per}})}{2\pi n} \approx \Gamma - \frac{U I_v}{2\pi n} \approx \Gamma - \frac{E I_v}{2\pi n} = \frac{P N (\Phi - \Delta\Phi) (I - I_v)}{a 2\pi}$

II-2-3 Vitesse de rotation

$U = E + R_{\text{ind}} I = \frac{P}{a} N n \Phi + R_{\text{ind}} I \Leftrightarrow n = \frac{U - R_{\text{ind}} I}{\frac{P}{a} N \Phi}$

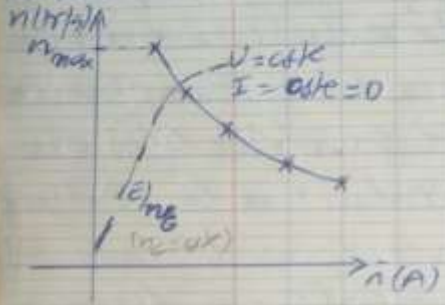
$n = \frac{E}{\frac{P}{a} N \Phi}$

n en tr/s
 Φ en Webers
 U en Volts
 I en Amperes
 R en Ohms

à vide $U - I_v = P_m + P_{\text{per}} + (R_{\text{ind}} + R_{\text{ex}}) I_v \approx P_m + P_{\text{per}}$ car I_v est faible

car on néglige les effets de ΣR dans $U_v = (E + R I_v + E_g)_v \approx E_v$

à vide : $n \propto \frac{U}{\Phi}$; si l'induit est alimenté sous tension \tilde{a} constante, alors qd i ds l'inducteur diminue, Φ diminue et n augmente et on a la caractéristique $n(i)$ suivante :



on pourra modifier (régler) n en faisant varier \tilde{a} . On peut déduire la caractéristique $n(i)$ à vide du moteur à partir de celle $E(i)$ de la m^{me} machine fonctionnant en génératrice à vitesse n_g cste. A i don. le $\tilde{a} = \frac{P}{a} N \Phi$ quel que soit n , il en :

- en génératrice : $E_{n_g} = \frac{P}{a} N \Phi n_g$
 - en moteur : $U = \frac{P}{a} N \Phi n_{\text{vide}}$

$n_{\text{vide}} = n_g \frac{U}{E_{n_g}}$

Remarques : 1) si Φ est petit (p. ex. avant le démarrage, $\Phi = \Phi_{\text{magnétique}}$ ou bien qd i est très petit), n devient très grand, on dit que le moteur s'emballe et il y a là un danger (compte-tenu de la tenue mécanique du rotor) et on doit prévoir une sécurité contre la rupture possible du circuit inducteur ($i=0 \Rightarrow \Phi_r$). Ex réostarte de démarrage d'un moteur shunt



le courant d'excitation i_f se ds l'électroaimant et en fin de démarrage, on tient la manette du réostarte sur le dernier plot après l'action du ressort. Si U baisse trop, i_f est trop faible, l'axe du ressort de rappel se soulève et le plot mort coupe le courant d'excitation.

2) la 1^{ère} remarque implique que pour mettre en marche le moteur de la fig 2, il faut tjrs fermer l'interrupteur K_1 ^(circuit inducteur) avant de fermer l'interrupteur K_2 (circuit de l'induit)

3) l'élimination des résistances du rhéostat de démarrage doit se faire lentement (risque d'arc électrique dangereux pour celui qui fait la manœuvre).

En charge: Au fur et à mesure que le couple demandé par la charge entraînée augmente le courant I croît et avec lui la réaction magnétique d'induit. ^{chut balais-collecteur}

$$U = \cancel{R_{ind}} E + R_{ind} I + e_B = \frac{P}{a} n N (\Phi - \Delta\Phi) + R_{ind} I + e_B$$

$$\Rightarrow n = \frac{U - (R_{ind} I + e_B)}{\frac{P}{a} N (\Phi - \Delta\Phi)} = \frac{U (1 - \frac{(R_{ind} I + e_B)}{U})}{\frac{P}{a} N \Phi (1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi})}$$

$$\Rightarrow n = \frac{U}{\frac{P}{a} N \Phi} \frac{(1 - \frac{(R_{ind} I + e_B)}{U})}{(1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi})}$$

$$\Rightarrow n = n_v \frac{(1 - \frac{(R_{ind} I + e_B)}{U})}{(1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi})}$$

^{si} ~~(Avec un rhéostat)~~ la réaction magnétique d'induit

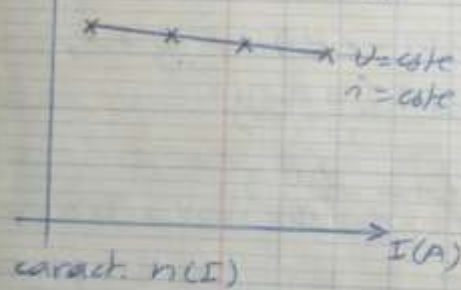
le rhéostat éliminé ($\Phi = \Phi_r$)

n n'est pas du tout compensée, qd I augmente, $1 - (k_{ind} I + e_B)$ diminue plus que $1 - \frac{\Delta \Phi}{\Phi}$. Az est né, quand I croît la vitesse de rotation diminue un peu.

si la machine est parfaitement compensée et on néglige e_B , alors $\Delta \Phi = 0$ et on a :

$$n = n_v \left(1 - \frac{k_{ind} I}{\Phi}\right) = n_v - \frac{R_{ind} I}{\frac{F}{a} N \Phi}$$

Pour une machine compensée ou non, la caractéristique $n(I)$ est une droite de faible pente négative $-\frac{R_{ind}}{\frac{F}{a} N \Phi}$



En g_l, le réglage de la vitesse de rotation n est limité par la vitesse d'emballement n_{max} ne pas dépasser par le moteur fixée le + souvent à 120% de la valeur nominale n_N (un peu plus pour les machines à courant continu).

II-3 Moteur à excitation indépendante alimenté sous tension variable.

Lorsque l'induit est alimenté sous tension constante, la plage de réglage de la vitesse de rotation par action sur le courant d'excitation est assez limitée : les valeurs extrêmes sont dans le rapport de deux environ. Cela est dû à la saturation magnétique du matériau de l'inducteur. Si on diminue le courant d'excitation pour augmenter la vitesse de rotation on diminue en même temps le flux et le couple moteur. Enfin un rhéostat de démarrage est nécessaire au moment de la mise en service.

Pour pouvoir à courant dans l'induit donné, développer le même couple, à toutes les vitesses et, ^{pour} pouvoir fonctionner en régime permanent (pas d'échauffement anormal des enroulements d'induit, pas de commutation défectueuse) aux basses vitesses, il faut, non plus agir sur le flux, mais sur la tension U aux bornes de l'induit. ^{sous tension variable, le courant d'excitation est maintenu constant.}

• Vitesse de rotation: ~~variable~~ $U = E + R I + e_b$ \Leftrightarrow

chute de tension aux contacts / balais-collecteur

$U = \frac{P}{a} N n (\Phi - \Delta\Phi) + R_a I + e_B$; on peut négliger $\Delta\Phi$ et $R_a I + e_B$ car le courant I à vide est faible, d'où

• à vide: $n_0 \propto \frac{U}{\frac{P}{a} N \Phi}$ la vitesse est proportionnelle à la tension

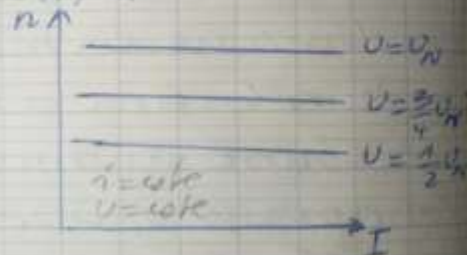
c'est une droite passant par l'origine

• en charge: en négligeant $\Delta\Phi$ et e_B on a:

$$n = \frac{U - R_a I}{\frac{P}{a} N \Phi}$$

A U donnée n décroît peu quand I croît. les courbes $n(I)$ tracées

pour diverses valeurs de U se déduisent les unes des autres par translation. $n(U)$ est une droite.



• couples: le couple électromagnétique Γ est donné par: $\Gamma = \frac{P N \Phi}{a \cdot 2 \cdot \pi} I$ Il n'est fonction que de I et lui est proportionnel.

le couple utile se déduit de Γ par

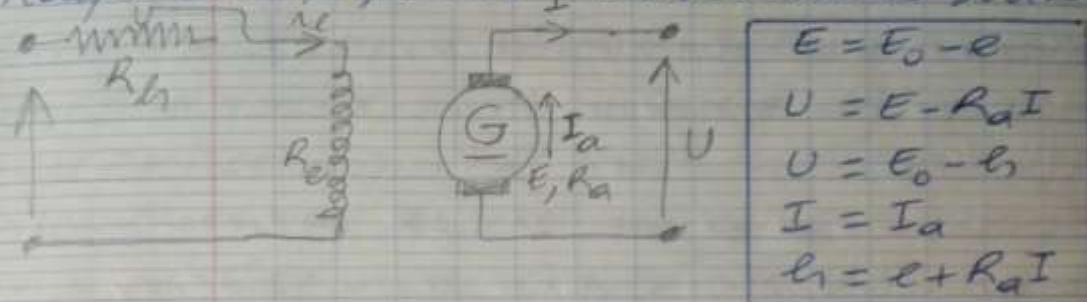
$$\Gamma_u = \Gamma - \frac{P_m + P_{fer}}{2 \pi n} \approx \Gamma - \frac{U I_v}{2 \pi n}$$

$\Gamma(I)$ est une droite

[car P_m dépend de n et P_{fer} de Φ et n , or Φ est constant et n est presque constant, donc à U donnée $P_m + P_{fer}$ est constant. et à vide $a \cdot U I_v = (R_a I_v + e_B) I_v + P_m + P_{fer} \approx P_m + P_{fer}$ car I_v est faible]

EXOS 4.02 P. 53 (machines élect.); 5.05; 5.06; 5.07
5.08; 5.09; 5.10; 5.11

En résumé, pour la génératrice à excitation indépendante, on a les relations suivantes



où e = Réaction magnétique d'induit
 l_i = Réaction totale d'induit
 R_a = Résistance de l'induit
 R_f = Résistance de l'inducteur
 E_0 = f.e.m. à vide de la génératrice
 E = f.e.m. en charge.

rentrer à II-2 Moteur à exc. indep. alimenté sous tension cste.

Partie 3: MACHINES A COURANT CONTINU A EXCITATION PARALLELE OU SHUNT

III-1 GENERATRICE OU DYNAMO A EXCITA- TION PARALLELE (= GENERATRICE OU DYNAMO

- SHUNT^{OU DERIVATION}): la génératrice à excitation séparée nécessite, pour l'établissement du courant inducteur, une source auxiliaire de courant continu. Il était intéressant d'éviter l'usage de cette source. C'est ce que l'on a réalisé avec les génératrices auto-excitées. Une génératrice est auto-excitée lorsqu'une partie de la puissance électrique produite par l'induit est utilisée à l'excitation de son propre inducteur. La génératrice-shunt est le 1^{er} type de génératrice auto-excitée.

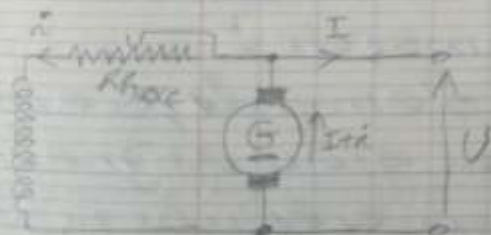


fig 1: montage.

On a les relations suivantes:

$$\begin{aligned} I_{\text{induit}} &= I + i ; U = E - R I_{\text{induit}} \\ e &= E_0 - E ; R = r + R I_{\text{induit}} \\ h &= E_0 - U \end{aligned}$$

III-1-1 AMORÇAGE - CARACTERISTIQUE A VIDE:

La dynamo utilisée pour l'expérience a les caractéristiques suivantes: $n = 2000 \text{ tr/min}$, 110 V

13 A , $R(\text{inducteur}) = 150 \Omega$

A vide,
• le circuit inducteur étant ouvert, on place aux bornes de l'induit un voltmètre et on fait tourner l'induit à sa vitesse nominale de 2000 tr/min .

• le voltmètre dévie très peu et indique 137 V .
A cause du magnétisme rémanent et en l'absence de tout courant d'excitation, une faible f.e.m. apparaît ds l'induit.

• Toujours à vide, fermons le circuit inducteur en le mettant en parallèle avec l'induit (fig 1). Le rotor étant entraîné à 2000 tr/min l'aiguille du voltmètre dévie progressivement et s'arrête à 137 V . On dit que la dynamo-shunt est amorcée.

La génératrice ne peut s'amorcer, c-à-d monter en tension, que grâce au magnétisme rémanent. Celui-ci crée une petite f.e.m. qui fait circuler un petit courant.

dans l'inducteur. ce courant renforce (c-à-d accroit) le flux rémanent, donc la f.e.m., donc i (le courant inducteur). la montée en tension est régie par la relation

$$E_o = r_{tot} i + l_{tot} \frac{di}{dt} \quad \text{ou}$$

r_{tot} = résistance totale du circuit du courant i

l_{tot} = inductance

$$(r_{tot} = r_{inducteur} + r_{résistat exc}, l_{tot} = l_{inducteur})$$

E_o = tension à vide aux bornes de l'induit

la montée de E_o et de i s'arrête à l'inter

section de $E_o(i)$ caractéristique à vide et

de la droite d'équation $E_o = r_{tot} i$ (fig 2)

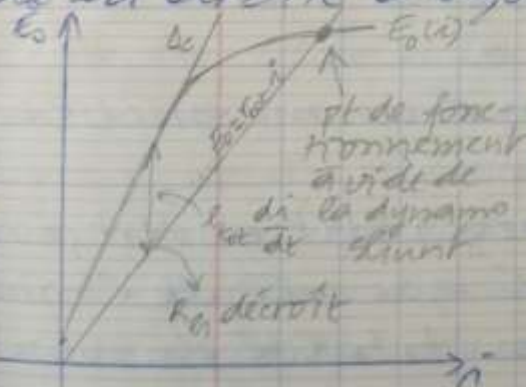


fig 2.

Note: si on intervertit les bornes du circuit inducteur, le voltmètre indique moins de mv. le courant qui s'établit ds le circuit inducteur a une action démagnétisante qui diminue le magnétisme ré-

manent et la dynamo shunt ne s'amorce pas.

2) la caractéristique à vide peut être relevée en excitation séparée.

on fait varier la tension par le rhéostat d'excitation en série ds le circuit inducteur. A chaque position de R_h (résistance du rhéostat) correspond une droite des inducteurs d'équation $V = (r_{\text{inducteur}} + R_h)i$. Pour une certaine valeur de R_h , la droite $V = (r_{\text{inducteur}} + R_h)i$ devient tangente à la courbe $E_0 = f(i)$ (Dc sur la fig 2), correspondant à une valeur limite de la résistance du circuit inducteur, $r + R_h$, appelée résistance critique, au delà de laquelle la dynamo selfant ne s'amorce pas.

la dynamo-selfant s'amorce à vide à condition que:

- la carcasse ait conservé un magnétisme rémanent.
- le circuit extérieur (charge) soit ouvert, sinon sa résistance g_{ext} + faible que celle de l'inducteur dériverait la quasi-totalité du courant dû au rémanent.
- le rhéostat d'excitation soit en majeure partie éliminé pour réduire $(r_{\text{inducteur}} + R_h)$
- la vitesse de rotation n soit suffisante, puisque

E_0 est proportionnel à n .

On démarre (amorce) la dynamo-glucant à vide, puis ensuite on peut la charger.

III-1-2 caractéristiques en charge:

• caractéristique externe $U(I)$:

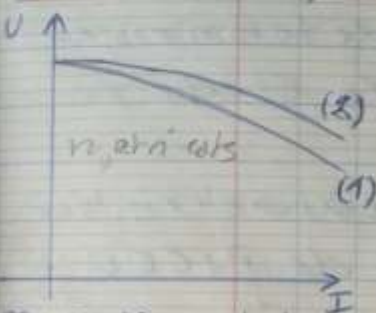


fig 3: (1) excitation sévante

(2) excitation séparée.

Quand le courant débité croît, la tension U diminue beaucoup plus vite que pour la m génératrice à excitation séparée car l'inducteur et l'induit sont en parallèle et la diminution de U entraîne celle de n , donc du flux utile et par conséquent la fem.

Remarque: cette baisse du courant inducteur peut être compensée par une réduction de la résistance du rhéostat du circuit inducteur, ce qui ferait augmenter la tension. Un réglage de la tension est donc possible.

• caractéristique de réglage $i(I)$

Pour la m machine, les caractéristiques de réglage $i(I)$ à n est et U est, sont pratiquement les m qu'en excitation séparée.

III-1-3 Usages: 1) Distribution de courant continu

3) montée avec un régulateur de tension, la dynamo-shunt est utilisée de l'équipement électrique des voitures.

III - 1 - 4 Annexe: Tracé de la caractéristique externe $V(I)$ par la méthode de PICOV

Fig 4: Méthode de Picou

Explication du procédé: On veut tracer la caractéristique en charge $V(I)$ d'une génératrice shunt. (\bar{n} et r_{tot} constants où r désigne la résistance totale du circuit inducteur, enroulement et réostat) lorsqu'on dispose des courbes $\Phi(I)$ (réaction totale d'induit) et $E_0(\bar{n})$, caract. à vide.

Pour la génératrice shunt, entre la caract. $E_0(\bar{n})$, \bar{n} est aussi lié à E_0 par: $\bar{n} = \frac{V}{r_{\text{tot}}} = \frac{E_0 - E_r}{r_{\text{tot}}}$ soit $E_0 = r_{\text{tot}} \bar{n} + E_r$. C'est une droite de pente $\frac{r_{\text{tot}}}{r_{\text{tot}}}$ et d'ordonnée E_r à l'origine, d'où la construction:

- On trace la droite $E_0 = r_{\text{tot}} \bar{n}$. Elle coupe $E_0(\bar{n})$ en M_0 qui donne le courant d'excitation \bar{n}_0 et la tension à vide U_0 (qd E_r est négligeable).
- Pour chaque I , on lit E_r , on le reporte en OD . Par D on mène la parallèle à OM_0 . Elle coupe $E_0(\bar{n})$ en M donnant E_0 en FM et \bar{n} en OF . On construit E_r de E_0 obtenant ainsi V égal à AF qu'on reporte en AH .

On remarque que pour chaque I , la droite $E_0 = r_{\text{tot}} \bar{n} + E_r$ coupe $E_0(\bar{n})$ en deux points M et M' .

donnant 2 valeurs de V , AH et AH' . la caractéristique $V(I)$ présente deux branches.
 la valeur de I pour laquelle les 2 sections sont confondues donne I_{max} . ce maximum correspond à la valeur de I pour laquelle la droite $E_0 = r_{ef} i + E_r$ est tangente à la courbe $E_0(i)$.
 En court-circuit ($V=0$), le courant I_{cc} est t.q. E_r égale la f.e.m. E_r duc au rémanes.
 donner les formules suivantes

III - 2 Moteur à excitation parallèle (ou Moteur shunt ou Moteur dérivation) alimenté sous tension constante :

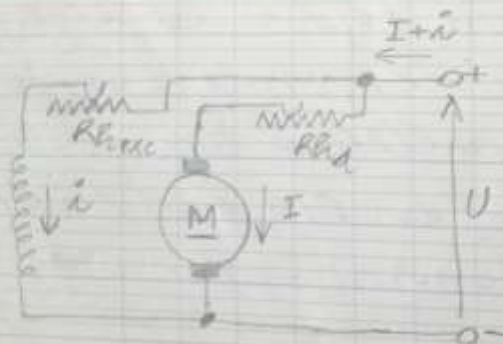


fig 5 Montage

Les propriétés du moteur-shunt sont identiques à celles d'un moteur à excitation séparée. (se reporter à la partie 2) Sa qualité essentielle est que sa vitesse de rotation n varie peu avec la charge.

EXOS 4.01 P.52; 4.04, 4.05 P.53; 6.01 P.74



$$E = E_0 - e$$

$$U = E - R_a I_a = E_0 - e - R_a I_a$$

$$I_a = I + I_e$$

$$E_0 = U + e + R_a I_a$$

PARTIE IV : MACHINES A COURANT CONTINU A EXCITATION SERIE

IV-1 GENERATRICE A EXCITATION SERIE

Une autre façon d'auto-exciter une génératrice à courant continu est de mettre l'inducteur en série avec l'induit (fig. 4.1)

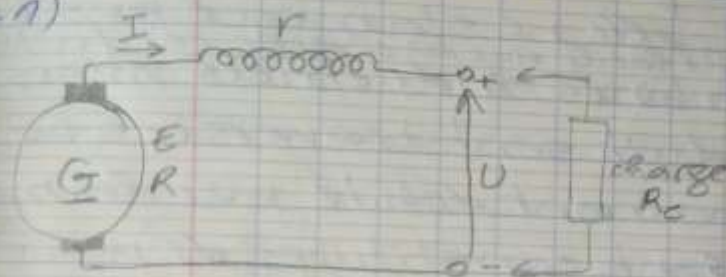


fig 4.1 Dynamo série

L'induit est entraîné à sa vitesse de régime au moyen d'un moteur.

IV-1-1 AMORÇAGE

Tant qu'aucune charge n'est branchée aux bornes de la dynamo série et que son induit tourne à sa vitesse de régime, on ne mesure ~~aucune~~ qu'une faible f.e.m. due au rémanent. La dynamo-série ne s'amorce pas à vide. Aucune étude à vide ne peut être envisagée. Pour obtenir la caract. à vide $E_o(n)$ d'une dynamo série, on déconnecte l'inducteur et l'alimente par une source séparée à très basse tension à cause de sa très faible résistance (on n'alimente pas en TBT les peres de la base seront l'inducteur à cause du fort courant qui le traverse).

E_{li}) a la m même allure qu'en excitation séparée.

Si une charge ^{R_c} est branchée aux bornes de la dynamo, la f.e.m. due au remanent produit un faible courant. Pour un sens de rotation convenable de l'induit, ce courant est tel qu'il renforce le magnétisme remanent, la dynamo s'amorce. Dans le cas contraire, elle ne s'amorce pas. Le démarrage est d'autant + facile que la charge est faible.

Remarque: les bobines d'induction mises en série avec l'induit sont traversées par la totalité du courant débité par la machine, elles sont constituées de peu de spires de grosse section.

Ex: supposons 2 machines identiques, nécessitant pour la production de l'induction magnétique désirée (p.ex. $B = 0,6 \text{ T}$) de l'entrefer une force magnétomotrice (fmm) $F = NI = 2000 \text{ AT}$ avec N = nbre de spires. on pourra avoir:

- excitation indépendante: 2000 spires avec $i = 1 \text{ A}$
- excitation série: 40 spires avec $I = 50 \text{ A}$
le courant étant + gd ici pour la m fmm, la m

lents résistent moins au passage du courant (faible résistance) qu'en excitation indépendante où on a $i = NA$ c'est une faible résistance implique une grosse section ($R = \rho \frac{l}{S}$), en excitation série on aura un fil de forte section et en excitation indépendante, un fil fin (petite section).

IV-1-2 CARACTERISTIQUES EN CHARGE:

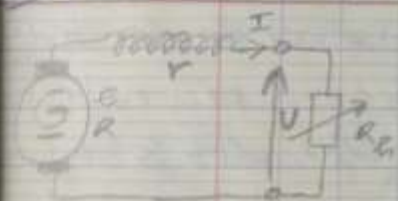


Fig. 4.2.

On a les relations suivantes

$$\begin{aligned} e &= E_0 - E \\ U &= E - (r + R_{ind}) I_{ind} \\ I_{ind} &= \hat{I}_{inducteur} \\ \phi &= e + R_{ind} I_{ind} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U &= E - (r + R) I = E_0 - \underbrace{e - RI}_{\phi} - rI = E_0 - \phi - rI \\ &= E_0 - (\phi + rI) \end{aligned}$$

La caractéristique $U(I)$ à n cste se déduit de cette dernière égalité. E_0 augmente avec I (la courbe $E_0(I)$ a m allure qu'en excitation séparée des conditions précisées en IV-1-1), donc U augmente avec I , du moins tant que la saturation

ne rend pas la croissance de E_0 inférieure à celle de $E_0 + rI$. On voit (fig 4.3) que la dynamo série ne saurait être considérée comme une source de tension à peu près constante.



fig 4.3 caract. en charge d'une dynamo-série.

• le relevé de $U(I)$ par débit sur un rhéostat de charge de résistance R_h est délicat. Les sections de la courbe $U(I)$ avec la droite $U = R_h I$ sont peu nettes à faibles débits (courbe

• Il y a un problème d'amorçage à partir du remanent, en charge. Ce n'est qu'au-dessous d'une certaine valeur de R_h que l'amorçage franc se réalise. (cf IV-1-1, Amorçage. (dernière phrase))

En charge, pour régler le débit de la génératrice série sur un récepteur donné, on doit shunter l'inducteur par un rhéostat. ($I = I$)
 diminue le courant d'excitation, donc du flux, par conséquent de la fem E et de la tension V (~~ou E~~)

Usages: la dynamo série n'est pratiquement pas utilisée sauf ds certains cas de freinage

IV-2 MOTEURS A EXCITATION SERIE

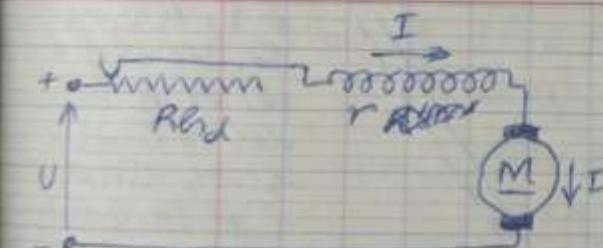


fig 4.4 montage

Dans un moteur série l'induit et l'inducteur sont parcourus par le même courant I (figure). L'inducteur est fait de peu de spires de grosse

section. C'est pour les autres moteurs à courant continu, un rhéostat est prévu pour limiter l'intensité au démarrage et l'inversion du sens de rotation est obtenue en inversant le sens du courant ds l'inducteur seul, ou dans l'induit seul (voir la remarque p.100 équilibre magnétique). Gérer qui semble contradictoire.

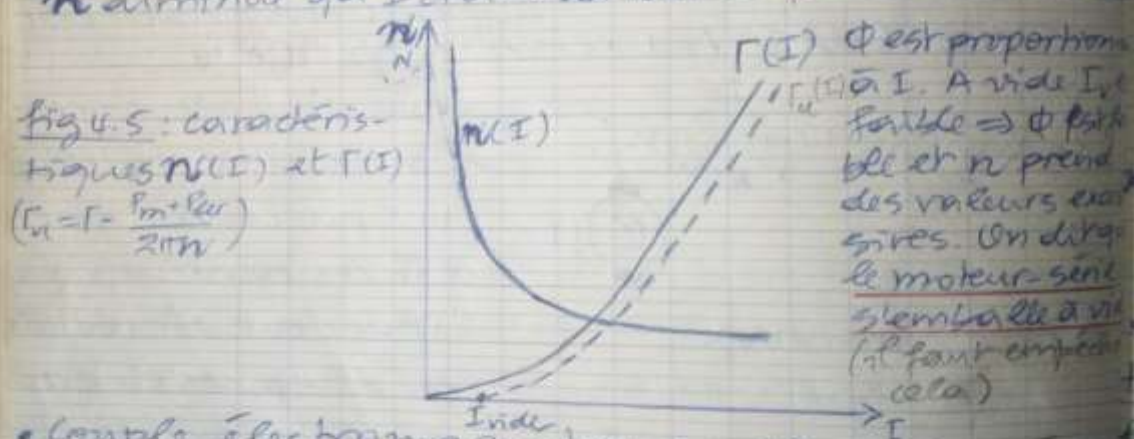
IV-2-1 caractéristiques en charge sans shuntage de l'inducteur:

• vitesse de rotation: Elle est donnée par:

$$n = \frac{\epsilon}{\frac{P}{a} N \Phi} = \frac{U - (R_{\text{ind}} I + e_B) - r_{\text{ind}} I}{\frac{P}{a} N \Phi}$$

U en Volts, R_{ind} en Ω , r_{ind} en Ω , I en A, Φ en Wb, n en tr/s

qd I croît ($U - (R_{\text{ind}} I + e_B) - r_{\text{ind}} I$) diminue un peu; $\frac{P}{a} N \Phi$ croît fortement car Φ est crée par I, donc n diminue qd I croît. Pour de faibles valeurs de



• couple électromagnétique: Il est donné par:

$$\Gamma = \frac{1}{2\pi} \frac{P}{a} N \Phi I$$

Φ en Wb
I en A Γ en mN

le couple utile se déduit de Γ par: $\Gamma_u = \Gamma - \frac{P_m + P_r}{2\pi n}$
 Pour les faibles valeurs de I si on négligeait ($r_{\text{ind}} I + e_B$), la réaction magnétique et la saturation

hyperbole parabol.

du courant magnétique, Φ serait proportionnel à I , n à $\frac{1}{I}$ et T à I^2 . Avec la saturation obtenue pour les grandes valeurs de I , Φ n'est plus proportionnel à I , il devient presque constant et T est proportionnel à I d'où l'allure de T (fig 4.5)
la puissance utile P_u est donnée par: $P_u = 2\pi n T_u$

$$P_u = 2\pi n T_u$$

T_u en mN, n en tr/s, P_u en W.

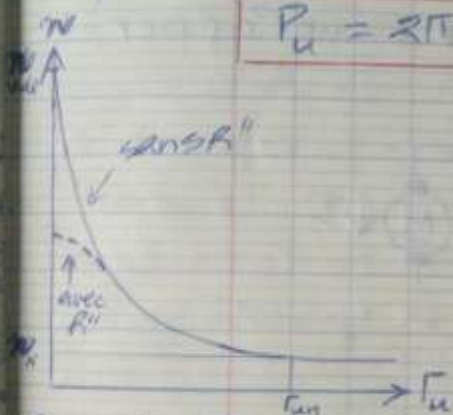


fig 4.6. $n(T_u)$

la caractéristique mécanique $n(T_u)$ se déduit de $n(I)$ et $T(I)$ (fig 4.5) et est très tombante, donc très stable. le moteur série ralentit fortement quand on le charge au lieu de "s'obstiner" à tourner à la même vitesse. c'est le 1er avantage du moteur série sur le moteur shunt (pour lequel les courbes $n(T_u)$ sont des droites de faible pente négative) il est dit auto-régulateur de puissance.

Remarque: c'est le moteur série qui est le plus dangereux à vide, ce n'est que si la marche à vide risque de se produire que l'en limite la vitesse de rotation à vide par addition d'une forte résistance R'' aux bornes de l'induit. On est sûr que le courant inducteur I et I'' ne peut descendre au dessous de $V/(R+R'')$ qui correspond à $I=0$. Le caract. $n(T_u)$ est modifiée ccc indiqué avec distribution.



fig. 4.7. U

IV-2-2 caractéristiques en charge avec shuntage de l'inducteur:

le shuntage de l'inducteur constitue la manière normale de régler la vitesse de rotation en charge du moteur série, mais l'augmentation de la vitesse se fait au détriment du couple que la machine peut développer.

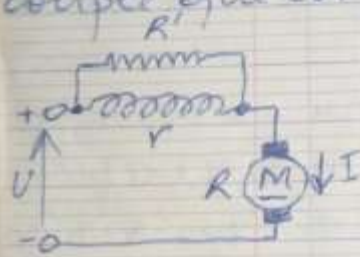
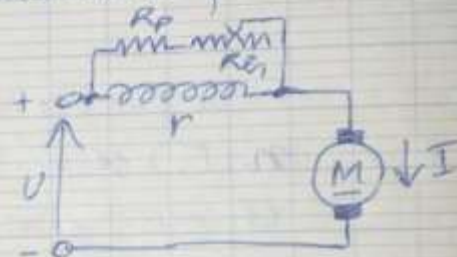


Fig. 4.8-a)



b)

Si on met en parallèle avec l'inducteur d'une résistance r une résistance R' (Fig. 4.8-a)), dans l'inducteur, il ne passe qu'un courant $i = \frac{R'}{R'+r} I$. La résistance R' peut être remplacée par une résistance R_p en série avec un rhéostat. La résistance R_p interdit la mise en court-circuit de l'inducteur (Fig. 4.8-b)).

A courant I donné, ϕ diminue puisqu'il est créé par $i < I$ (I passait ds l'inducteur avant).

$$i = \frac{R'}{R'+r} I$$

mise en parallèle de R' aux bornes de T)
 la vitesse de rotation
 on augmente puisqu'elle est inversement proportionnelle à Φ

le couple Γ diminue puisqu'il est proportionnel à ΦI

on passe des caractéristiques $W(I)$ et $\Gamma(I)$ sans shuntage aux caract. $W'(I)$ et $\Gamma'(I)$ avec shuntage de l'inducteur, si on néglige la réaction magnétique d'induit de la façon suivante: (fig. 4.9)

Pour une n vitesse n_n , il faut un courant I_n sans shuntage et, afin d'avoir le même flux, un courant $I_n \frac{(r+R')}{R'}$ avec shuntage. (c-à-d. $(\frac{r+R'}{R'}) I_n$)

Si le courant I_n donnait un couple Γ_n , le courant $I_n \frac{(r+R')}{R'}$ donnera un couple $\Gamma_n \frac{(r+R')}{R'}$ puisque le flux est le même mais le courant de l'induit est multiplié par $\frac{(r+R')}{R'}$ (et rest. propor. à ΦI)



IV-2-3: Démarrage:

Un rhéostat de démarrage R_{hd} limite le courant au démarrage, et on a:

$$(R_{hd} + r + R_{induct}) I_d + (e_B) I_d = U$$

le couple au démarrage est donné par:

$$\Gamma_d = \frac{1}{2\pi a} \frac{P}{a} N \Phi_d I_d$$

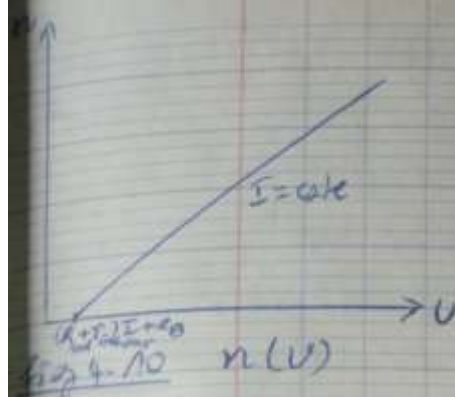
ce couple de démarrage est très fort puisque, augmentant I on augmente Φ , ce qui n'était pas le cas pour le moteur shunt, or I_d est très très nettement supérieur à I_n . ($1.5 I_n \leq I_d \leq 2 I_n$)
Le fort couple au démarrage constitue le 2^e avantage du moteur série et sur le moteur shunt et justifie son emploi notamment au démarrage le "décollage" d'un convoi nécessitant un couple très fort.

Avantages: réglage vitesse
(suppression rhéostat de démarrage)

IV-3 MOTEUR A EXCITATION SERIE ALIMENTÉ SOUS TENSION VARIABLE:

• Vitesse:

$$n = \frac{E}{\frac{P}{a} N \Phi} = \frac{U - (R_{induct} + R_a) I_a}{\frac{P}{a} N \Phi}$$

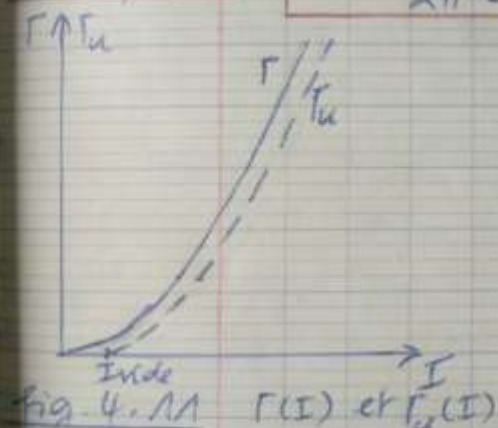


A courant I donné, Φ et $(R+R')I + e_B$ sont cste; n ~~serait~~ ^{est} proportionnellement à la tension U . Ce sont des droites de pente d'autant plus faible que I , et donc Φ sont plus grands leur abscisse initiale est égale à $(R+R')I + e_B$. (fig 4.10)

• Couple :

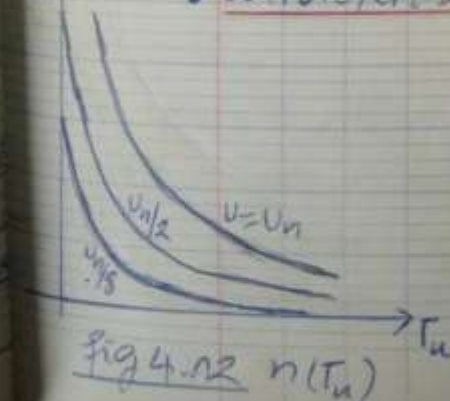
$$\Gamma = \frac{1}{2\pi} \frac{P}{\alpha} N \Phi I$$

$$\Gamma_u = \Gamma - \frac{(P_m + P_{fer})}{2\pi n}$$



Comme ds le cas sous tension cste, Γ ne dépend que de I et varie en fonction de I cste ds en alimentant sous tension cste.

• caractéristique mécanique $n(\Gamma_u)$:



Des courbes $n(I)$ et $\Gamma_u(I)$ tracées pour diverses valeurs de U , on passe à $n(\Gamma_u)$ pour ces diverses valeurs de U (fig 4.12)

PARTIE V: MACHINES A COURANT CONTINU A EXCITATION COMPOSEE.

Pour modifier les caractéristiques d'une machine à courant continu, on peut mettre sur les pôles inducteurs plusieurs enroulements alimentés différemment (excitation indépendante, shunt, série) dont les forces magnétomotrices s'ajoutent ou se soustraient. Plusieurs combinaisons sont possibles, nous n'étudierons que quelques-unes.

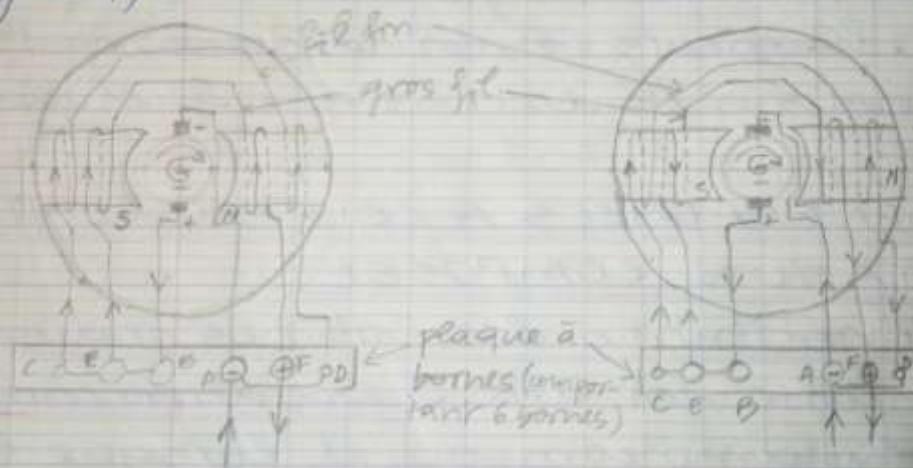
V-1 GENERATRICES A COURANT CONTINU A EXCITATION COMPOSEE:

V-1-1 Constitution des bobines inductrices

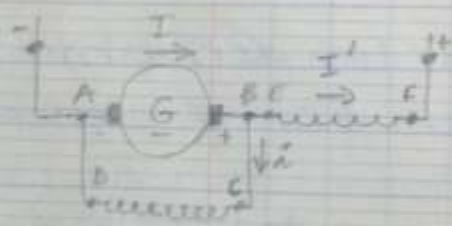
Une dynamo est dite à excitation composée ou dynamo compound lorsque l'inducteur est formé de deux enroulements distincts:

- un enroulement shunt (ou dérivation) en fil fin constitué d'un grand nombre de spires.
- un enroulement série en fil de grosse

section formée de peu de spires
 Chacun de ces enroulements produit un
 champ magnétisant. Si les deux enrou-
 lements produisent des champs de même
 sens, la dynamo est dite à flux additifs
 (fig 5.1). Si les champs sont de sens op-
 posé, la dynamo est dite à flux soustractive
 (fig. 5.2)

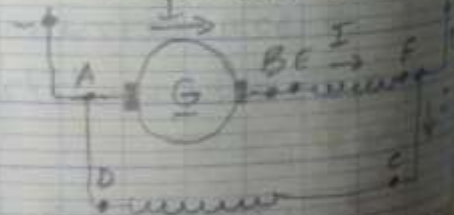


5.1. Dynamo composée
à flux additifs



5.3. Dynamo composée
à courte dérivation

5.2. Dynamo composée
à flux soustractive
(les pôles sont ceux des
enroulements sont)



5.4. Dynamo comp
à longue dérivation

suivant le mode de connexion de l'enroulement shunt, on distingue la dynamo à courte dérivation (fig 5.3) et la dynamo à longue dérivation (fig. 5.4). Toutefois cette distinction, importante pour la réalisation des schémas de montage ou les branchements des machines, n'apporte pas de différences sensibles dans le fonctionnement des deux sortes de dynamos.

1-1-2 Fonctionnement à vide: le fonctionnement à vide d'une dynamo composée à courte dérivation est identique à celui d'une dynamo shunt puisque aucun courant ne passe ds l'enroulement série (fig 5.3). Si la dynamo est à longue dérivation (fig. 5.4), l'inducteur série est traversé à vide par le m^{ême} courant que l'inducteur shunt et son influence est très faible sur la valeur de la fem. Donc, à vide, la génératrice composée s'amorce cœ une génératrice shunt grâce au magnétisme rémanent.

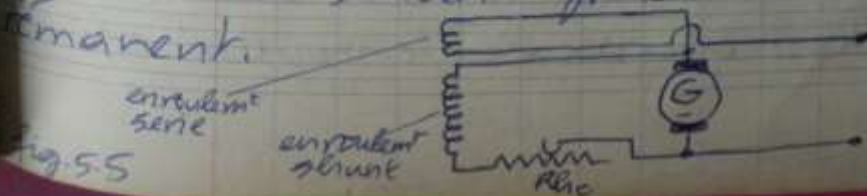


Fig. 5.5

la f.e.m. se règle grâce au réostat de charge
 placé en série avec l'enroulement shunt

V-1-3 fonctionnement en charge:

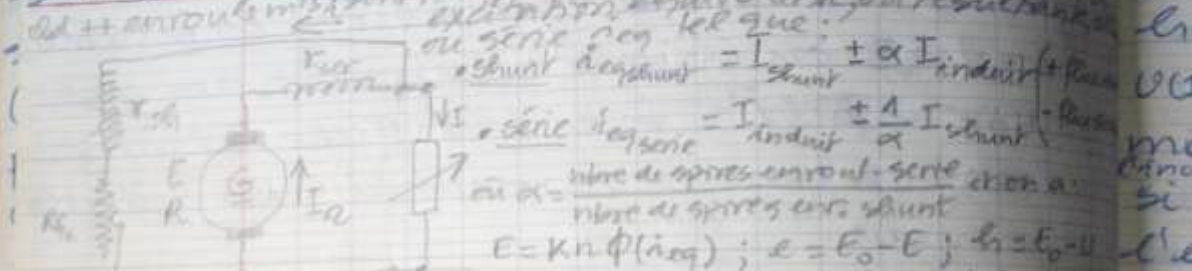


fig 5.6 schéma de montage

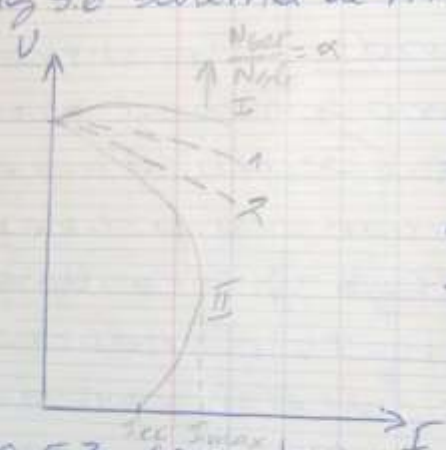


fig. 5.7 caractéristique en charge

la caractéristique en charge est composée à flux additifs de la dynamo et la courbe I. la dynamo alimentée en excitation séparée aurait donné la courbe 1, en excitation la courbe 2 et en excitation

tion composée à flux soustractifs la courbe 3

Pour la dynamo compound à flux additifs, en charge, les ampères-tours de l'enroulement série s'ajoutent à ceux de l'enroulement shunt

(et non du nombre de conj.)
 (appelé aussi coefficient de composition)
 $N_{\text{série}}$ des nombres de spires
 Plus le rapport $\frac{N_{\text{série}}}{N_{\text{shunt}}}$ est élevé moins les
 caractéristiques ~~avant~~ $V(I)$ (courbe I, fig 5.7)
 sont tombantes. La dynamo est alors dite
 hypercompound. Lorsque la caractéristique
 $V(I)$ est tombante (courbe II, fig 5.7) la dyna-
 mo est dite hypocompound. ^{Il est ainsi possible} de modifier à volonté
 l'inclinaison de la caract. en charge en modifiant le nombre de spires de l'enroulement série.
 Si l'on inverse les connexions aux bornes de
 l'enroulement série d'une dynamo compound
 à flux additifs, on obtient une dynamo compound
 à flux soustractifs (et vice versa) dont la caracté-
 éristique en charge est la courbe II (fig. 5.7). L'en-
 roulement série a alors un action démagné-
 tisante qui réduit la fem et par suite accroît
 la chute de tension.

V-1-4 Intérêt et Usages des dynamos composées

Puisqu'il est possible de modifier à volonté l'incli-
 nation des courbes $V(I)$, les dynamos composées
 pourront s'adapter à tous les usages.

1) Distribution à tension constante: la dynamo

composé à flux additifs convient parfaitement à cet usage. Même si le lieu d'utilisation est éloigné de la dynamo, on pourra utiliser une dynamo hypercompensée (caractéristique $U(I)$ ascendante (ou ayant une partie ascendante)) de façon à compenser la chute de tension dans la ligne.

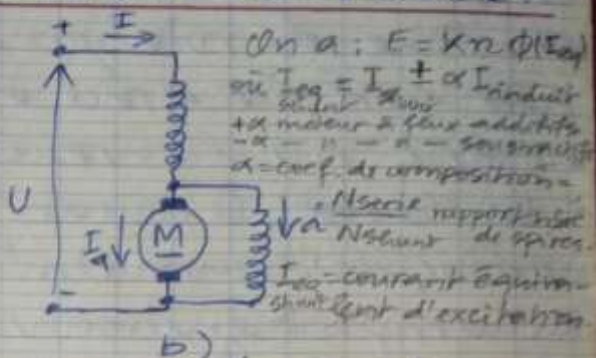
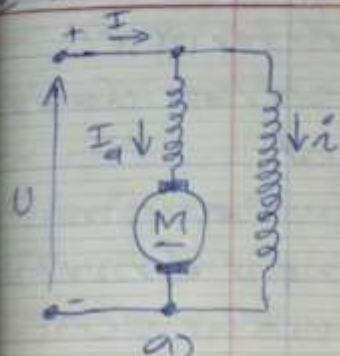
2) soudure à l'arc: la soudure à l'arc nécessite une source de courant capable de donner une tension de 30 à 60V au moment de l'allumage de l'arc, puis d'assurer en fonctionnement une tension de 20V environ, ou même de supporter un court-circuit franc, sans risque de détérioration pour les enroulements. La dynamo à flux soustractifs par sa chute de tension importante et par son intensité limitée en court-circuit (fig 5.7) convient parfaitement à cette application.

3) charge des accumulateurs: la dynamo à flux soustractifs est parfois utilisée, sans régulation, pour la charge des batteries d'accumulateurs sur les automobiles.



fig 5.

V-2 MOTEURS A EXCITATION COMPOSEE:



On a: $E = K n \Phi (I_a)$
 où $I_{eq} = I_a \pm \alpha I_{induit}$
 + α moteur à flux additifs
 $-\alpha -$ " " " soustractifs
 α - coef. de composition =
 $\frac{N_{serie}}{N_{shunt}}$ rapport des
 de spires.
 I_{eq} - courant équivalent
 d'excitation.

Fig 5.8 ~~schéma~~ schéma de principe d'un moteur à excitation composée. a) longue dérivation. b) courte dérivation. Ce dernier montage n'appose pas de ~~très~~ notables ds le fonctionnement des ^{moteurs} 3 types de démarrage d'un moteur à excitation composée nécessite un rhéostat de démarrage (longue dérivation) Pour un moteur à flux additifs, l'inversion du sens de rotation est obtenue en inversant le sens du courant ds l'induit seul ou en ~~inversant~~ ^{inversant simultanément} les sens des courants des enroulements shunt et serie (si l'on inverse le sens du courant ds un seul de ces enroulements, le moteur deviendrait à flux soustractifs). - A vide le courant ds l'induit ^{(et ds l'enroulement serie (longue dérivation))} est faible et le moteur se comporte cœ un moteur shunt.

En particulier, il ne s'emballe pas à vide, la vitesse de rotation est bien définie et peut se régler grâce à un rhéostat de champ en série sur l'enroulement shunt.

- En charge, le courant de l'induit augmente et donc de l'enroulement série (longue derivation) le champ magnétisant de l'inducteur série de augmente et s'ajoute à celui, constant, de l'enroulement shunt d'où le flux résultant Φ croît (flux additifs). C'est on a tjrs:

$$n = \frac{E}{\frac{P}{a} N \Phi} = \frac{E}{K \Phi(\omega)}$$

$$\Gamma = \frac{P}{2\pi a} N \Phi I_a = K \Phi \omega I_a$$

on constate que, pour le moteur compound qd I (la charge) augmente, Φ augmente n diminue et Γ augmente.

En conclusion, à vide, un moteur compound à flux additifs se comporte cœ un moteur shunt, alors qu'en charge il est comparable à un moteur série.

• Pour un moteur à flux soustractifs, le champ magnétisant de l'enroulement série se retranche de celui de l'enroulement shunt.

(c'est-à-dire le champ magnétisant) augmente avec la charge, le flux résultant diminue et la vitesse de rotation n augmente et le couple T baisse. Ce type de moteur est très peu utilisé car son fonctionnement est instable. En particulier si la charge est trop importante, le champ de l'enroulement série peut dépasser celui de l'enroulement shunt, le flux résultant change alors de sens et entraîne une brusque inversion du sens de rotation du moteur.

