Chapitre 7

MACHINES A COURANT CONTINU
FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE

La génératrice à courant continu permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur l'action d'une induction magnétique, produite par un enroulement inducteur immobile, sur un enroulement dit induit, en mouvement de rotation. (Voir chapitre 7)

1. Force électromotrice élémentaire engendrée dans un conducteur de l'induit

Si l'on considère un conducteur (1) placé sur l'induit qui tourne (voir figure 1), ce conducteur coupe les lignes de camp, il est alors le siège d'une force électromotrice e_1 donnée par la relation suivante :

e_1=B.L.v	L : Longueur du conducteur en m. v : Vitesse linéaire en (m/s), v=2πRn/60 B : Intensité du champ magnétique en Tesla.

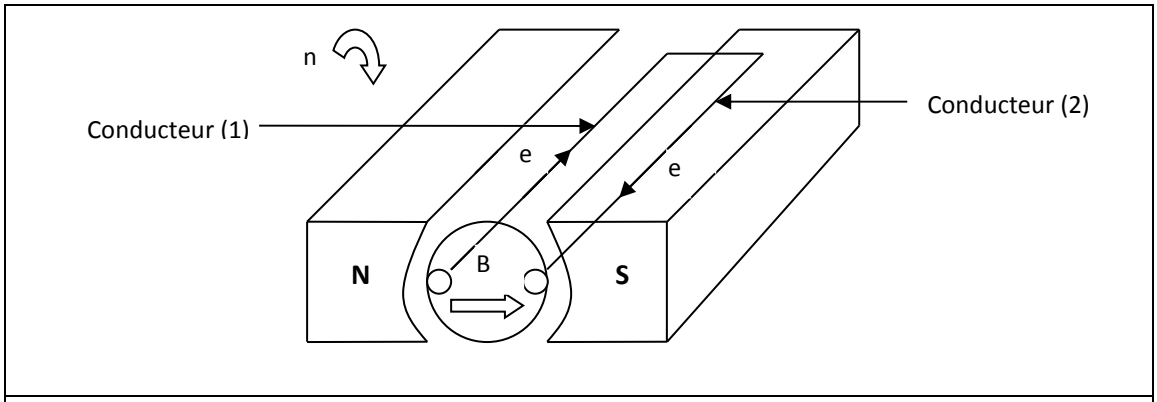


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'une génératrice bipolaire

Le conducteur (2) situé sur le pôle opposé est le siège d'une f.e.m e_2 de même sens que celui de e_1. Les deux f.e.m s'ajoutent, on peut fermer donc le circuit et on réalise ainsi un générateur de courant.

2. Allure de la f.e.m

Soit une spire de l'induit repérée par l'angle θ qu'elle fait avec l'axe du pôle sud.

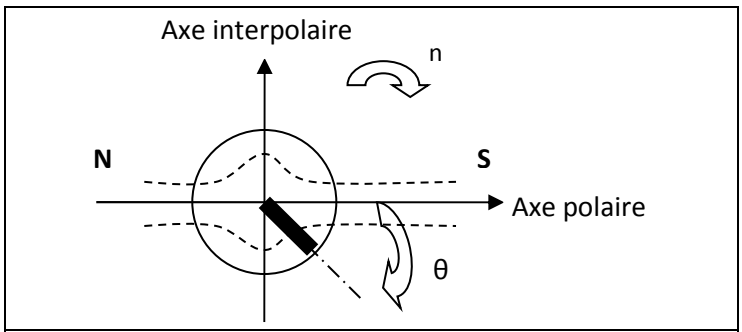


Figure 1 : Spire et flux

La portion φ du flux Φ qui traverse cette spire est nulle pour θ=0. Elle croit d'abord avec θ atteignant Φ/2 quand θ=π/2. Puis elle diminue, valant 0 pour θ=π, -Φ/2 pour θ=3π/2. Ensuite elle croit à nouveau pour retrouver la valeur 0 lorsque θ=2π.

De ϕ, on passe à e induite dans cette spire par : e = -dϕ/dt = (-dϕ/dθ).(dθ/dt) = -Ωdϕ/dθ.

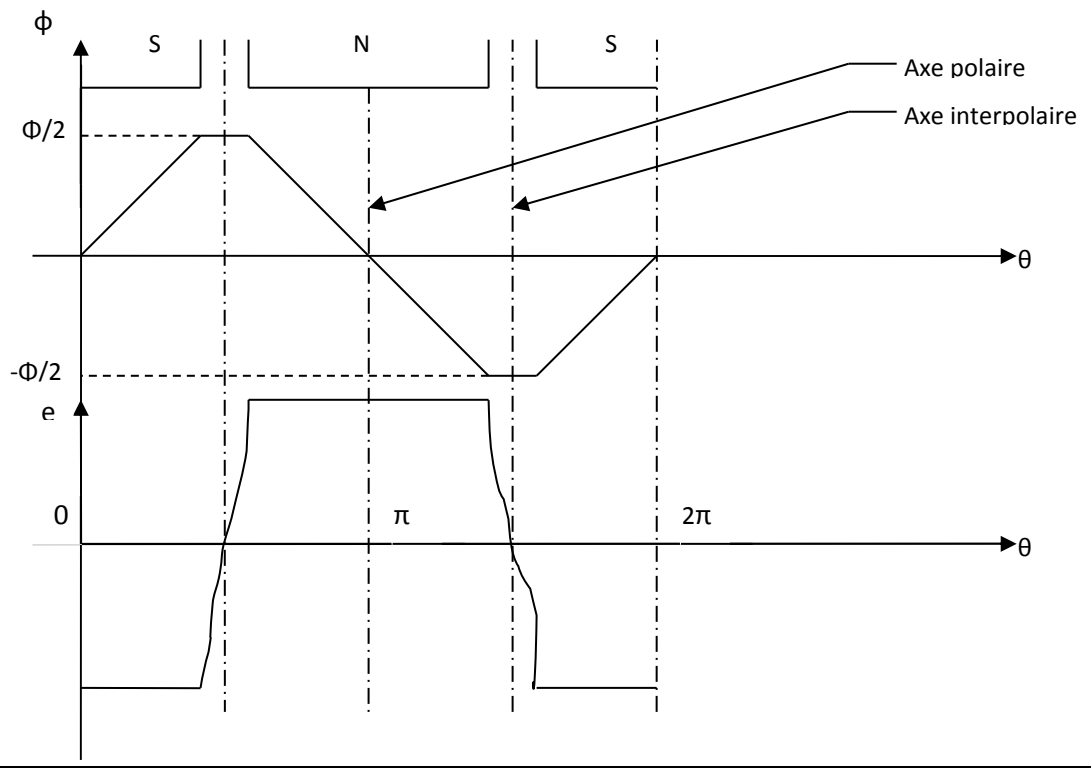


Figure 3 : Allure de la f.e.m

On remarque que la f.e.m induite dans une spire est alternative ; si elle est positive quand la spire est sous le pôle nord, elle est négative quand elle est sous le pôle sud.

3. Le redressement par le collecteur

Toutes les spires situées sous un même pôle étant le siège de f.e.m de même signe, les balais placés dans l'axe interpolaire (ligne neutre) permettent de les additionner.

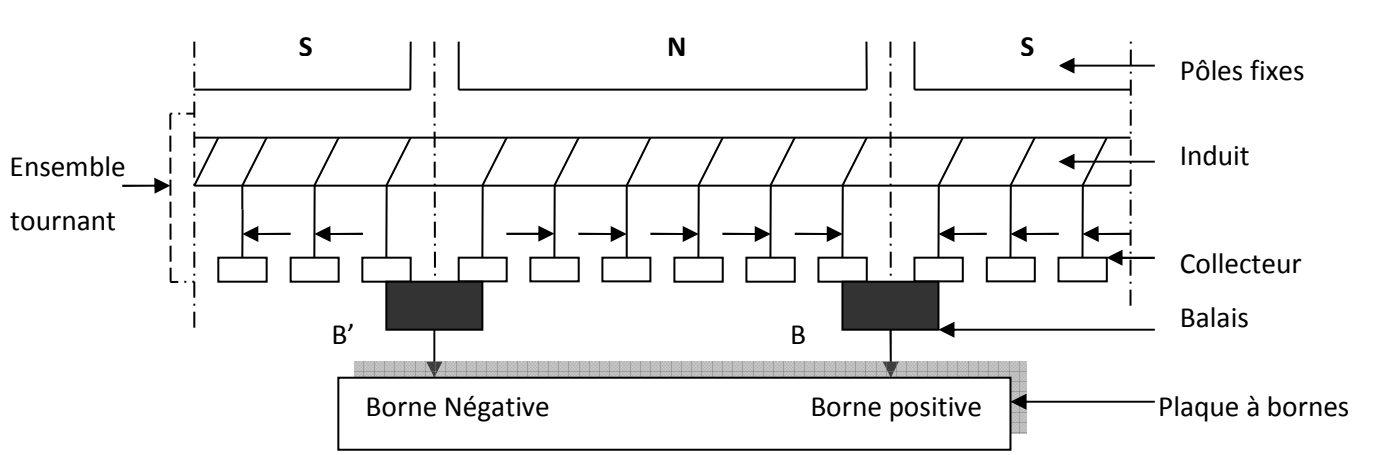


Figure 3 : Principe du collecteur

L'ensemble collecteur-balais joue le rôle d'un redresseur mécanique. Les spires situées sous un pôle changent car l'induit tourne, mais à chaque instant en allant de B' à B on trouve toutes les f.e.m engendrées sous le même pôle.
La f.e.m totale entre les deux balais, pour une génératrice bipolaire, est la somme des f.e.m élémentaires.

$$\boxed{E = N.n.\Phi}$$

4. La réaction magnétique d'induit

4.1. Réaction transversale d'induit :

Lorsqu'on fait débiter une génératrice sur un circuit extérieur, un courant parcourt les enroulements, ce courant crée un champ magnétique dit de **réaction d'induit**.

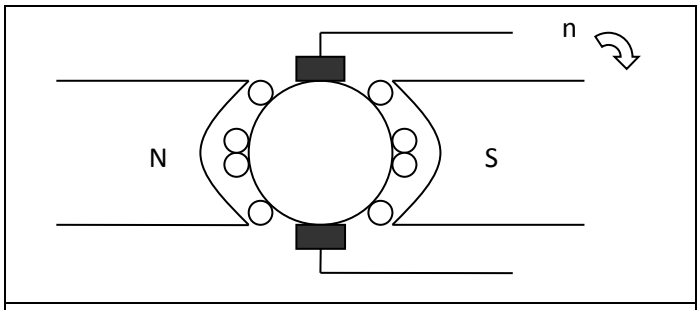


Figure 4 : RMI

Si I est le courant débité par la génératrice, le courant I_1 parcourant chaque conducteur de l'induit est $I_1=I/2$.

Si on considère une ligne d'induction situé à ± θ, le nombre de conducteurs entourés par cette ligne est $n_1= n.(2\theta/2\pi)$.

Par application du théorème d'Ampère à cette ligne d'induction et en négligeant les pertes dans le fer on aura :

$n_1.I_1 = H_l.(2e)$ ⇨ $n.(2\theta/2\pi).(I/2) = 2\ H_l.e = \xi_l\ (\theta)$. Appelé force magnétomotrice d'induit.

Or : $\mu_0 H_l = B_l$ ⇨ $B_l = (nI/4\pi e)\ \mu_0\theta$.

L'induction résultante est donc la combinaison du champ inducteur et du champ de la réaction d'induit.

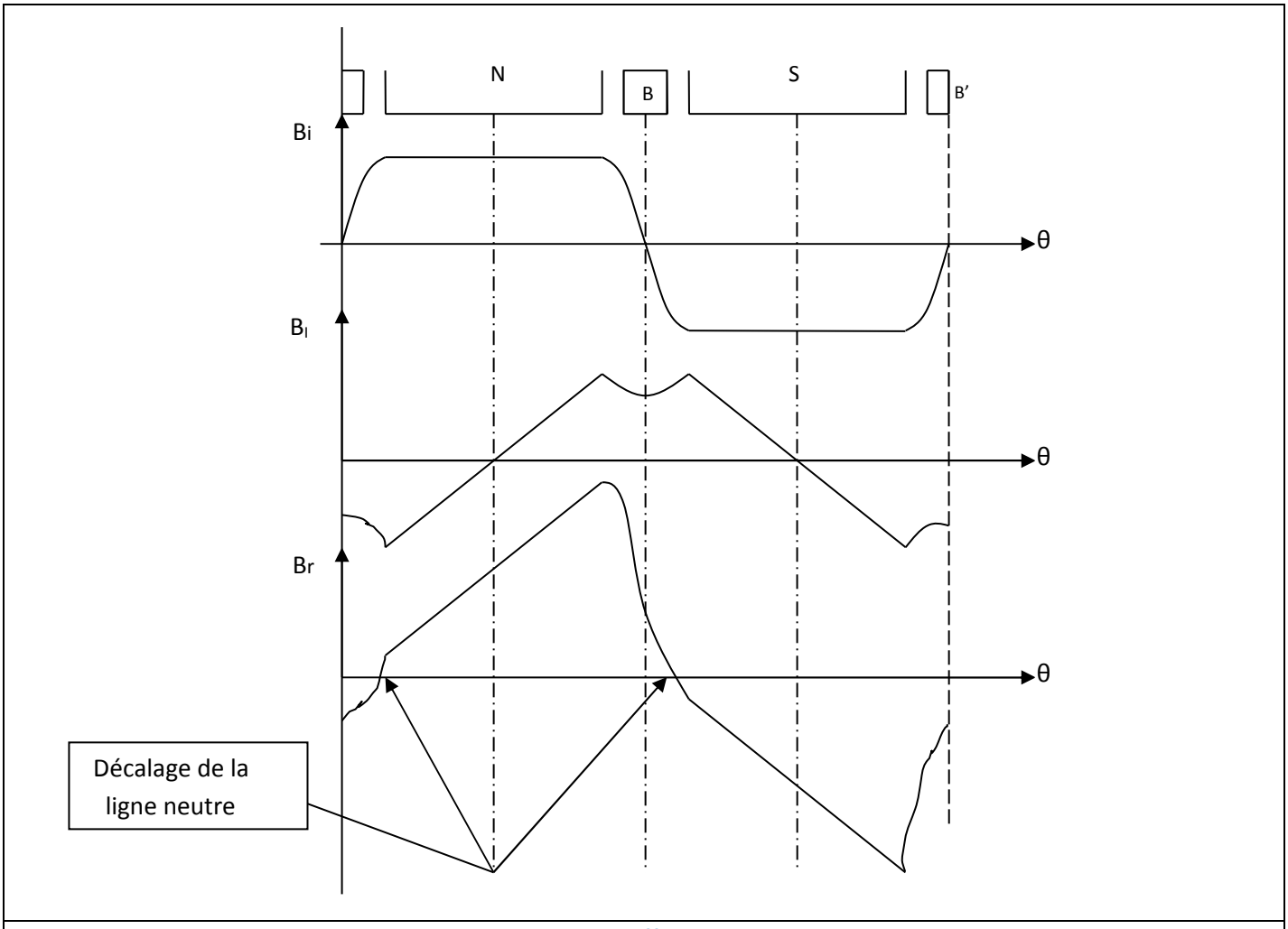


Figure 5 : Effet de RMI

Conclusion

La réaction d'induit a donc pour effet :

- De diminuer le flux traversant l'induit et par suite la f.e.m.
- De décaler la ligne neutre dans le sens de rotation de la machine. La f.e.m est encore plus diminuée, en allant d'un balais à l'autre on ne collecte plus certaines des f.e.m induites dans les conducteurs présentant le même signe, au contraire on met en série avec les sections sièges de f.e.m positives des sections sièges de f.e.m négatives.
- Rendre difficile la commutation car la f.e.m induite dans les sections mises en court-circuit sous les balais n'est pas nulle.

4.2. Réaction longitudinale

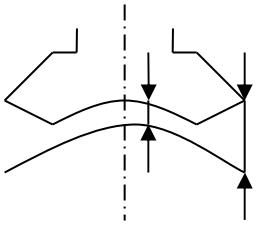
La f.m.m de la réaction longitudinale se soustrait directement des ampères tours crées par l'inducteur. Elle diminue fortement le flux Φ. Si on veut maintenir Φ constant il faut augmenter le courant d'excitation.

4.3. Compensation de la réaction magnétique d'induit :

On compense la réaction d'induit par un enroulement spécial logé dans des encoches pratiquées dans les pièces polaires et parcouru par le courant d'induit. Il crée une f.m.m égale et opposée à celle due aux A.T de l'induit.

Les A.T compensateurs et les A.T à compenser étant proportionnels à I (courant de charge), la compensation est bonne quelle que soit la charge.

Sur les machines sans enroulements de compensation, on réduit les effets de la réaction d'induit en en augmentant l'entrefer sur les cornes polaires.



Dans les petites machines tournant toujours dans le même sens et travaillant toujours en génératrice ou en moteur, on peut décaler les balais d'un angle α :

- Dans le sens de rotation s'il s'agit d'une génératrice.
- Dans le sens inverse de rotation s'il s'agit d'un moteur.

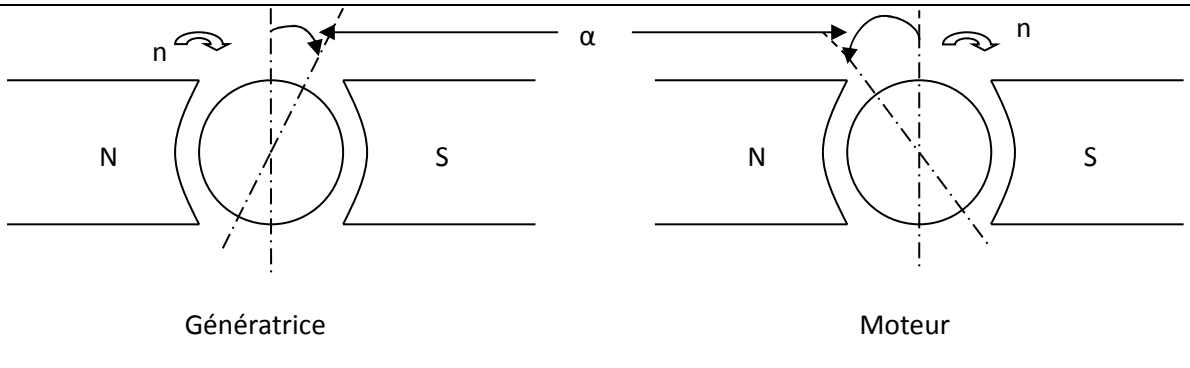


Figure 6 : Décalage de la ligne neutre pour les petites MCC tournant toujours dans le même sens

5. Etude de la commutation

5.1. Commutation simple

La commutation d'une section est son passage d'une voie de l'induit dans la suivante quand les lames du collecteur entre lesquelles elle est montée passent face à une ligne de balais. Quand les deux lames étant au contact du même balai, la section est mise en court-circuit. Durant ce court-circuit, le courant dans la section doit s'inverser puisqu'elle passe d'une voie à l'autre.

La commutation, est simple si la largeur des balais est égale à celle d'une lame de collecteur. Le balai ne met en court-circuit qu'une section à la fois.

- **Phénomène**

Considérons la section MNP actuellement en commutation :

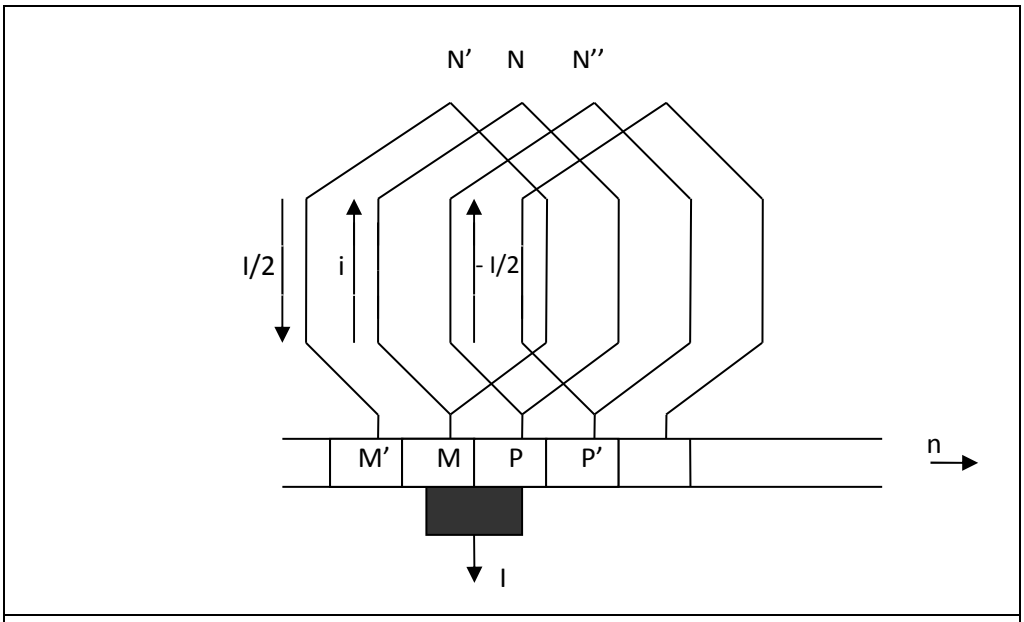


Figure 7 : Phénomène de commutation

Le courant qui parcourt la section vaut i. Un peu avant le courant y était I/2. Un peu après le courant sera –I/2 suivant les étapes suivantes :

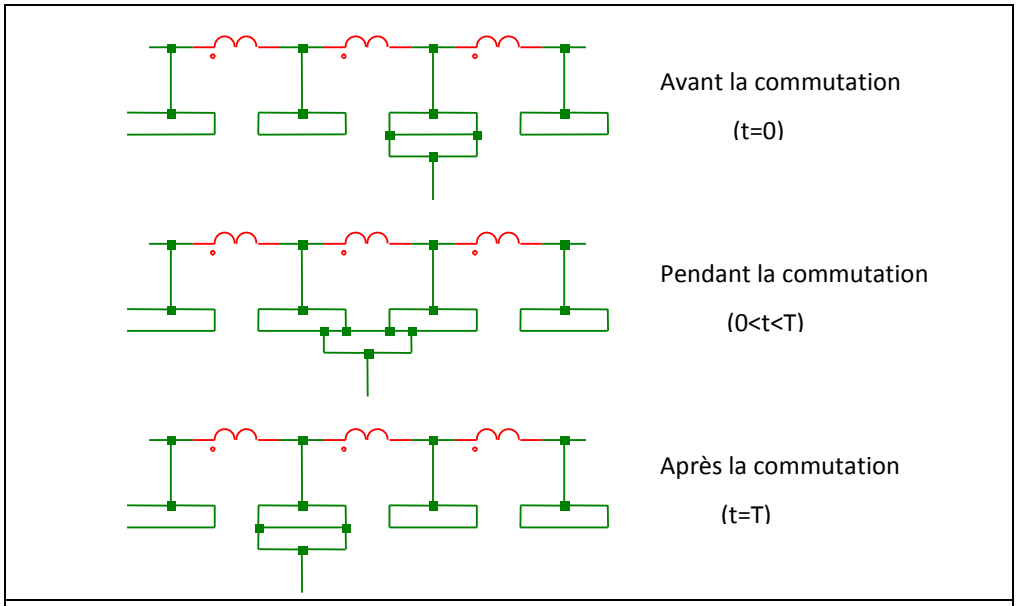


Figure 8 : Etapes de la commutation

☞ La courbe i=f(t)

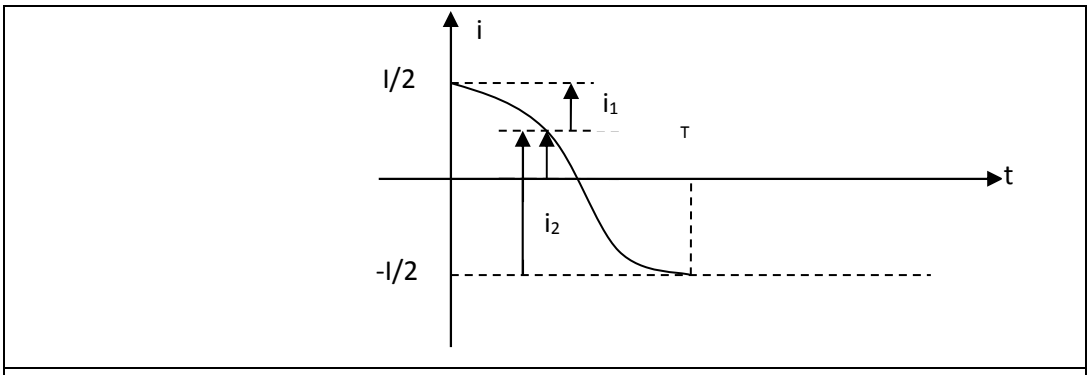


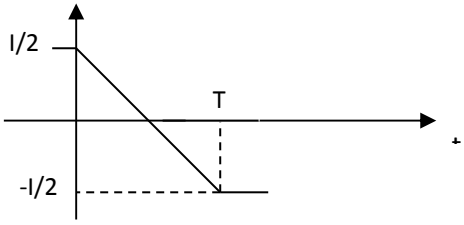
Figure 9 : Courbe i=f(t)

Remarque

La commutation idéale serait une commutation linéaire. Mais l'inductance l de la section qui s'opposant aux variations du courant i rend difficile la commutation.

Tension de réactance et tension de commutation

☛ La tension de réactance E_r est la f.e.m qu'une section produirait en elle-même si le courant s'y inversait linéairement.



Soit i(t) = I/2 – I.(t/T)

Donc E_r = -L (di/dt) = L.(I/T)

Er est d'autant plus grande que :

- L est grande.
- La variation du courant I est plus importante.
- Le temps T disponible pour l'inversion est plus bref.

☛ La tension de commutation E_c est la valeur de la f.e.m crée par un flux autre que celui de la section elle-même, permettant d'obtenir une commutation linéaire.

$$E_c - L\frac{di}{dt} = ri \text{, or: } i(t) = \frac{I}{2} - I\frac{t}{T} \text{ et } -L\frac{di}{dt} = \frac{IL}{T} \Rightarrow E_c = -L\frac{I}{T} + r\left(\frac{I}{2} - I\frac{t}{T}\right) \Rightarrow E_c = -L\frac{I}{T}\left(1 - \frac{rT}{2l}\right) - rI\frac{t}{T}$$

E_c devrait être une f.e.m négative et décroissante avec le temps. r est pratiquement négligeable, donc :

$$\boxed{E_c = -L\frac{I}{T} = -E_r}$$

Conclusion : La tension de commutation doit compenser l'effet de l'inductance L.

Remarque : Pour une génératrice dont a est différent de 1, on doit remplacer I dans les formules précédentes par $2I_a$

Avec I_a : Courant traversant une voie d'enroulement (I_a = I/2a).

5.2. La commutation multiple

La commutation est dite multiple si les balais ont une largeur supérieure à celle d'une lame. Un balai met donc simultanément plusieurs sections en court-circuit.

5.3. Pôles auxiliaires de commutation

Les pôles auxiliaires ou de commutation sont placés dans l'axe interpolaire. Leur bobinage est parcouru par le courant I débité ou absorbé par l'induit. L'induction dans l'entrefer sous les pôles auxiliaires doit avoir une valeur telle qu'elle crée dans la section en commutation la tension de commutation E_c.

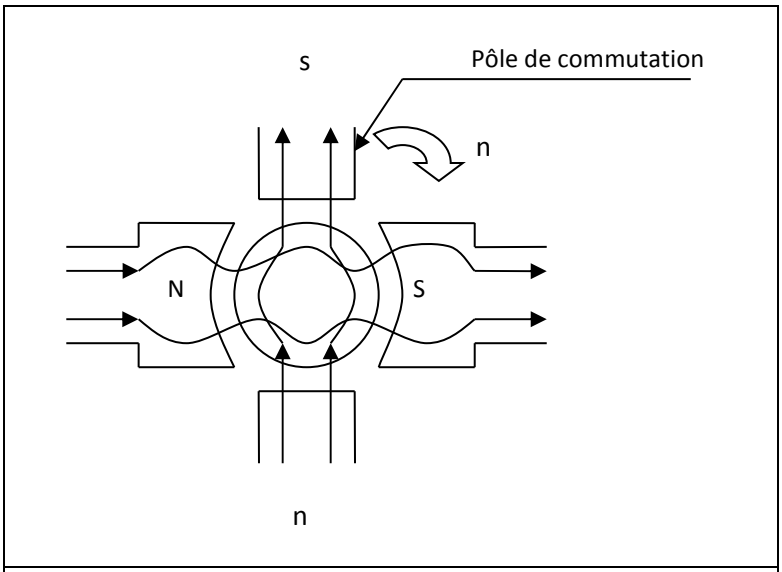


Figure 9 : Pôles de commutation

Le flux des pôles auxiliaires produit une très légère diminution du flux utile de l'inducteur.

6. Amorçage de la génératrice shunt

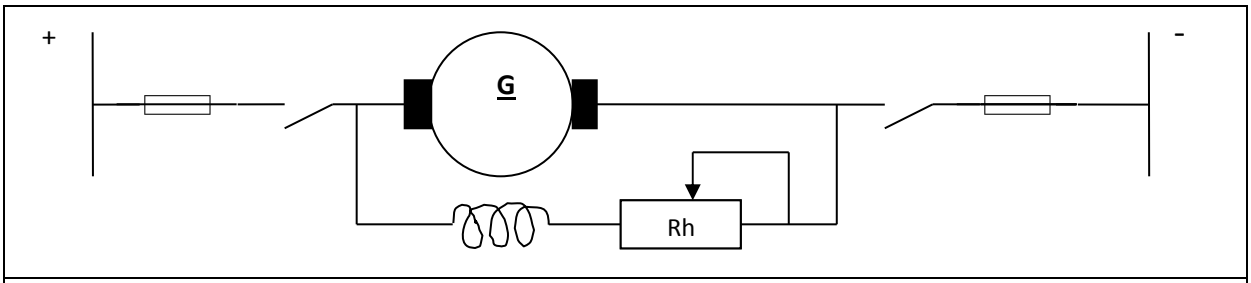


Figure 10 : Génératrice shunt

La génératrice shunt s'amorce si :

- Les connections entre inducteur et induit sont convenable ; le flux rémanent qui engendre aux bornes de l'induit une faible f.e.m provoque le passage dans les inducteur, d'un courant qui renforce la valeur de ce flux. Si la génératrice ne s'amorce pas pour le sens de rotation désiré, inverser les connexions entre les bornes de l'inducteur ou de l'induit.
- La résistance totale du circuit inducteur ne dépasse pas une certaine valeur appelée : **résistance critique d'amorçage.**

A vide, le rhéostat d'excitation doit être inséré dans le circuit inducteur pour abaisser E à la tension nominale.

7. Couplage des générateurs shunts

7.1. Couplage en parallèle

- **Rôle** : Proportionner la puissance demandée par le réseau d'utilisation sur chaque génératrice. Pour avoir un bon fonctionnement, les génératrices doivent avoir la même courbe de chute de tension.

- **Opération de couplage**

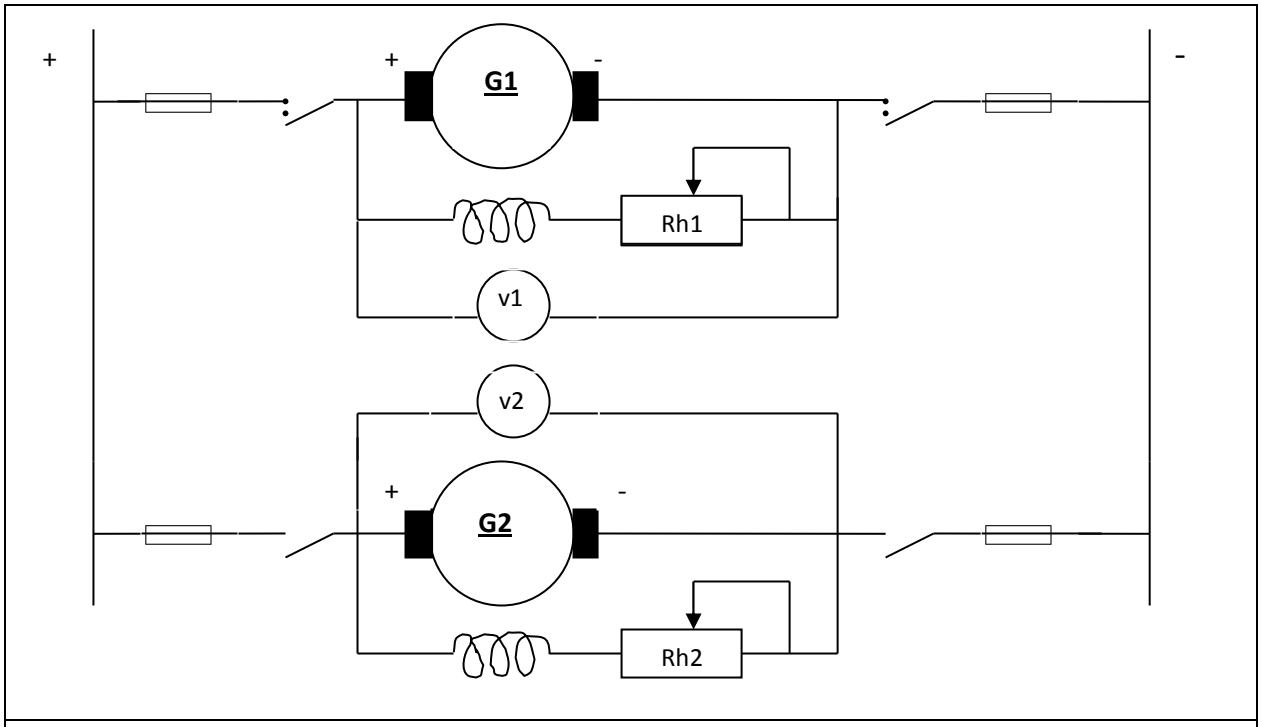


Figure 11 : Schéma de principe du couplage en parallèle de deux génératrices shunts

- La génératrice G1 débite sur le réseau son courant Ide pleine charge ; le rhéostat Rh1 est alors au minimum, le voltmètre V1 indique la tension nominale U_n.
- On entraîne G2 à sa vitesse nominale, le rhéostat de champ Rh2 est régler pour obtenir E_2, légèrement supérieure à la tension U_n indiquée par V1. Si les polarités des deux génératrices concordent, on ferme l'interrupteur de couplage de G2.

Remarque : Si un moteur d'entraînement ralenti, la tension aux bornes de la génératrice qui lui est accouplée diminue. Cette génératrice peut fonctionner en moteur en absorbant du courant. Pour remédier à ce problème, on utilise un disjoncteur complémentaire à maximum de courant et à protection contre le retour du courant.

7.2. Couplage sérié

- **Rôle** : Obtenir entre fils extrêmes une tension double soit : U=2V1, et entre chacun de ces fils et le fil intermédiaire une tension égale à V1.
- **Analyse de fonctionnement**

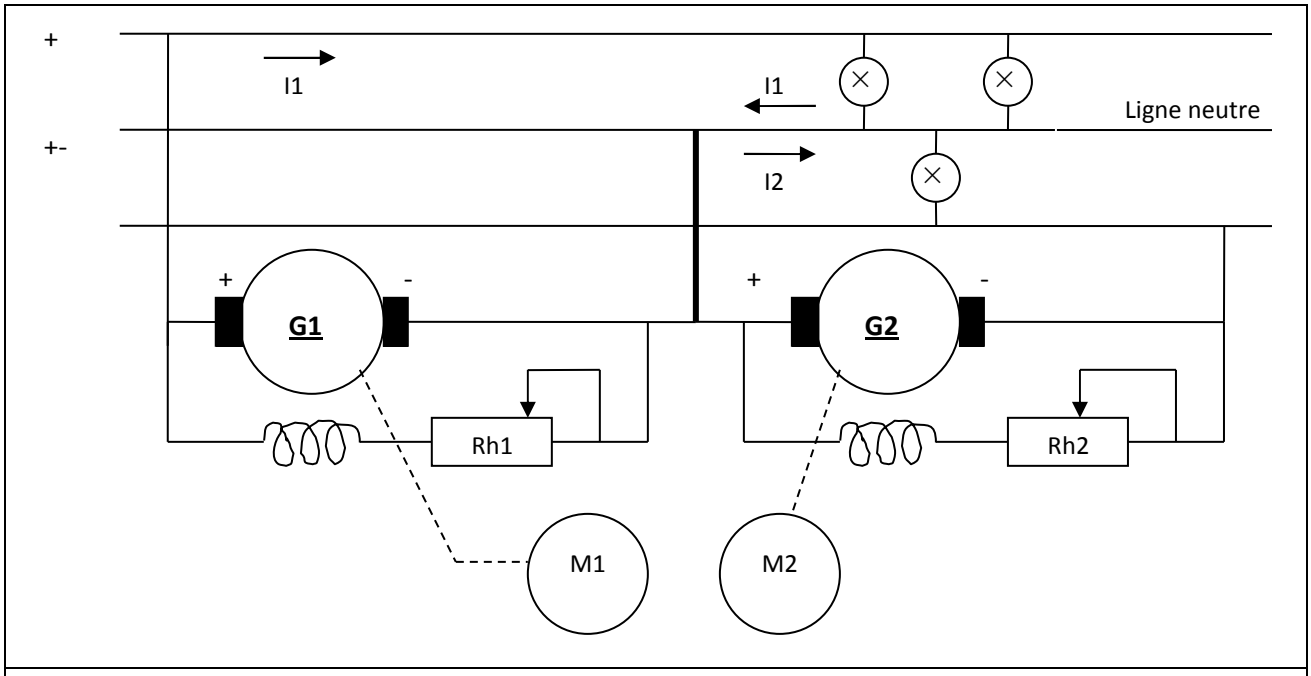


Figure 12 : Schéma de principe du couplage en série de deux génératrices shunts

Les deux génératrices G1 et G2 ont la même puissance et sont entraînée chacune par un moteur. On suppose que le pont (1) est plus chargé que le pont (2). G1 fournit donc un courant I1>I2. Les valeurs de tensions entre chaque pont V1 et V2 sont légèrement différentes car la chute de tension est plus importante dans la génératrice la plus chargée. De même si la f.e.m diminue par suite de la variation de vitesse ou si la régulation sur le rhéostat est insuffisante, une inversion de polarité est possible. On évite ce danger en raccordant en série les deux inducteurs.

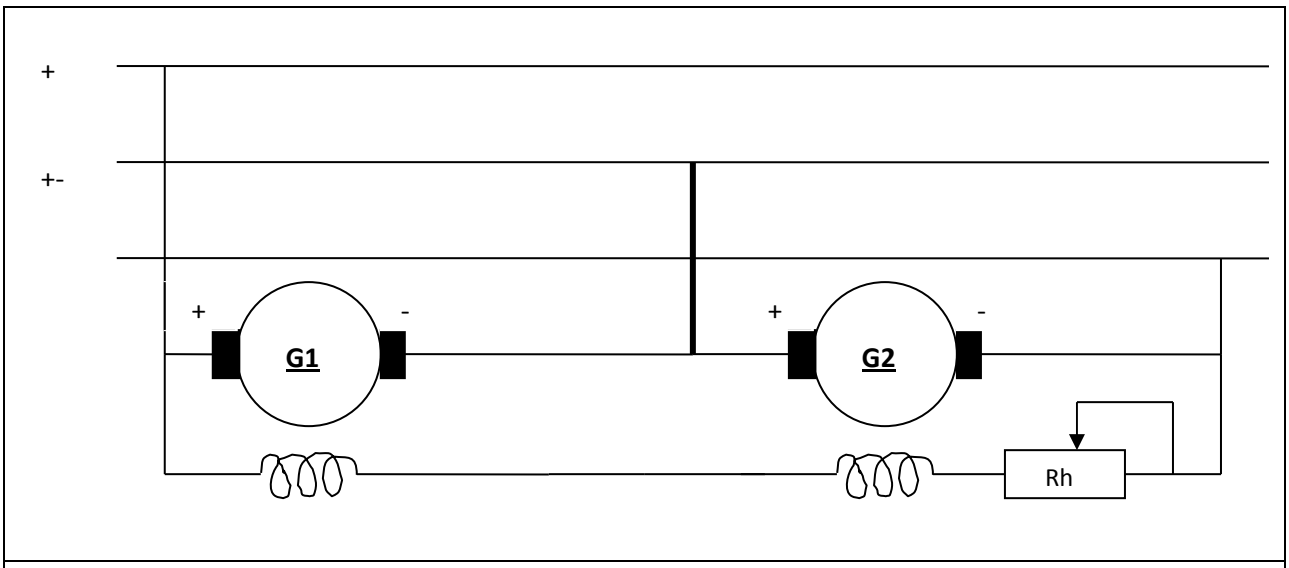


Figure 12 : Amélioration du couplage en série de deux génératrices shunts

8. Conditions d'amorçage et de fonctionnement de la génératrice compound

La génératrice à excitation composée ou compound comporte deux circuits inducteurs, un monté en série avec l'induit et l'autre en parallèle. D'ordinaire, à pleine charge, les A.T séries sont nettement inférieurs aux A.T shunts.

L'amorçage s'effectue comme pour la génératrice shunt. Il suffit d'ajouter les A.T séries proportionnels au courant débité qui ont pour but de compenser la chute de tension interne par une augmentation du flux.

Selon le signe du terme ajouté, on rencontre le compoundage additif ou soustractif.

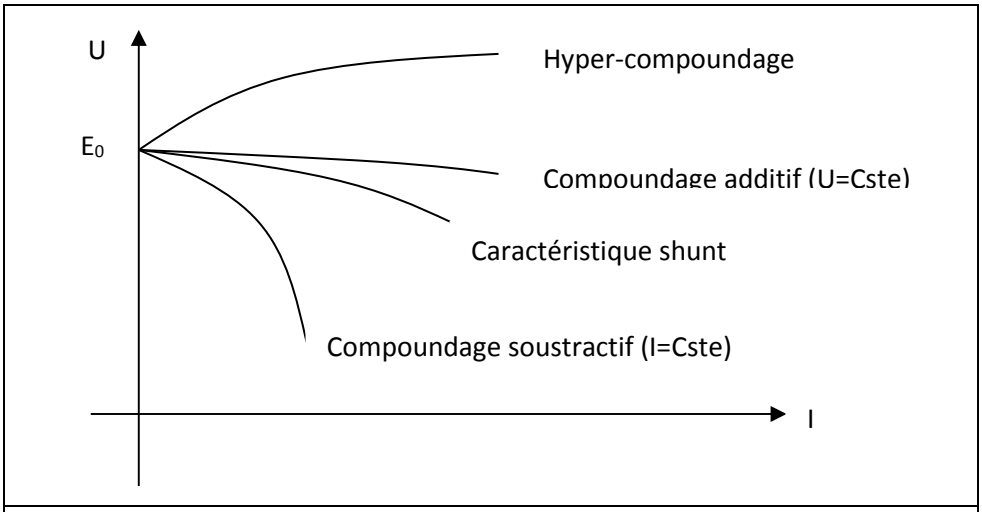
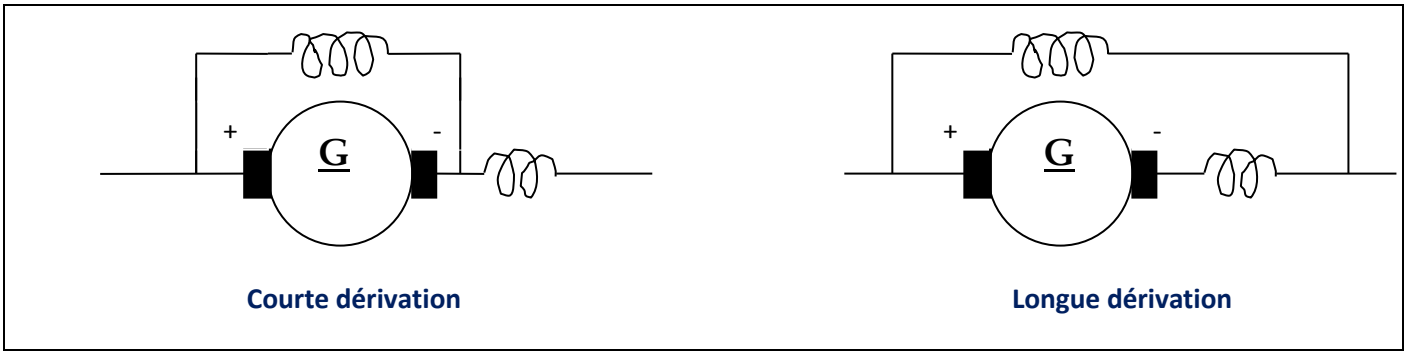
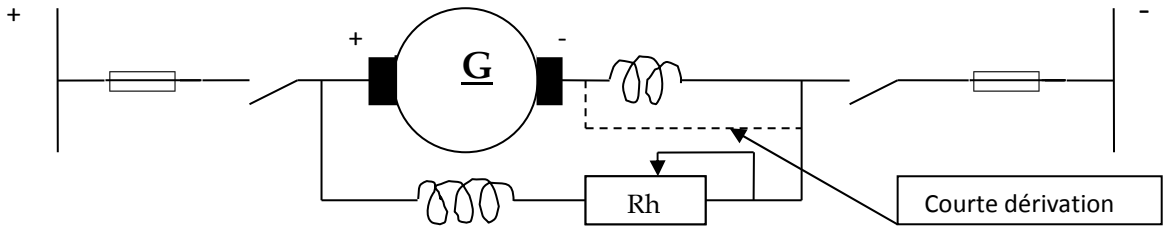


Figure 13 : U=f(I) pour une génératrice compound

Le circuit inducteur shunt peut être branché aux bornes de l'induit, c'est le montage en courte dérivation, ou aux bornes de la machine, c'est le montage en longue dérivation.





Remarque

On raccorde un voltmètre aux bornes du circuit d'utilisation puis on fait débiter la génératrice ; on court-circuite l'enroulement série. Si la tension diminue sur le voltmètre, l'enroulement série est bien branché en flux additif.

9. Etude des Caractéristiques de la génératrice à excitation séparée

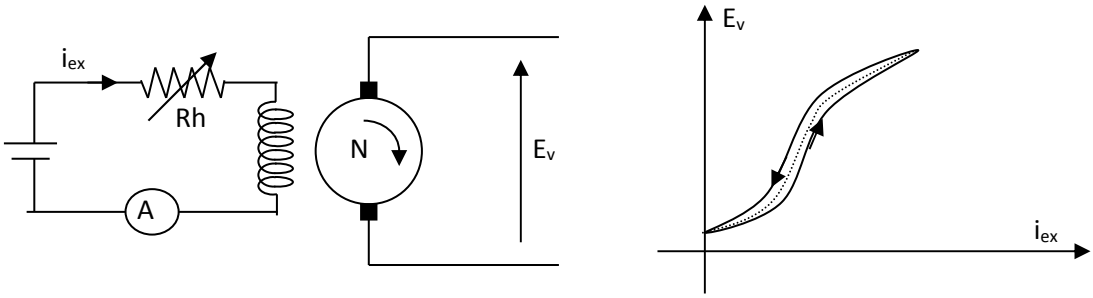
9.1. La caractéristique à vide

$U = E_v = f(i_{ex})$ paramétrée par n (à n = cste)

A vitesse donnée, on retrouve les propriétés d'un circuit magnétique (car E_v est proportionnelle à B et i_{ex} est proportionnel à H) à savoir :

- Présence d'un flux rémanent qui donne naissance à une tension rémanente E_r (c'est Er qui permet l'amorçage la génératrice shunt)
- Les valeurs de Er relevées à intensité croissante est légèrement inférieures à celles relevées à intensité décroissante (à cause de l'hystérésis).

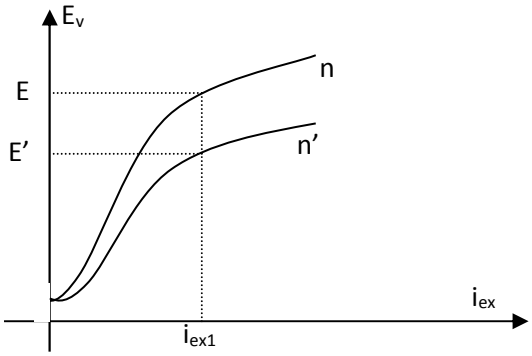
Dans la pratique, les deux courbes sont peu différentes, aussi peut-on assimiler la caractéristique à vide à la courbe intermédiaire.



A vitesse variable, les caractéristiques se déduisent par une affinité verticale (à courant d'excitation donné, la f.é.m est proportionnelle à la vitesse : Ev = k Ω Φ)

On obtient donc (pour chaque valeur de i_{ex}) :

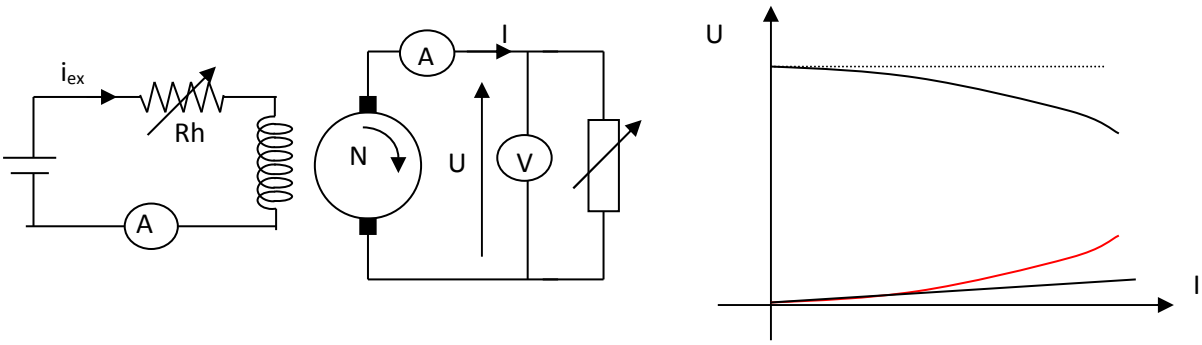
$$\frac{E}{E'} = \frac{n}{n'}$$



9.2. Caractéristique en charge

La caractéristique en charge est donnée par la fonction :

U = f (I) à n= cste et iex = cste



A vide (charge débranchée), on entraîne la génératrice à sa vitesse nominale et on règle son excitation à sa valeur nominale, on obtient ainsi un premier point qui correspond à $U = U_0 = E_v$ pour I = 0 (essai à vide).

La vitesse étant **maintenue constante,** on fait varier la charge afin de relever des points (U, I) pour différentes valeurs de la charge, on constate que la tension U diminue quand le courant de charge I augmente, cette diminution représente la chute totale d'induit qui est donc :

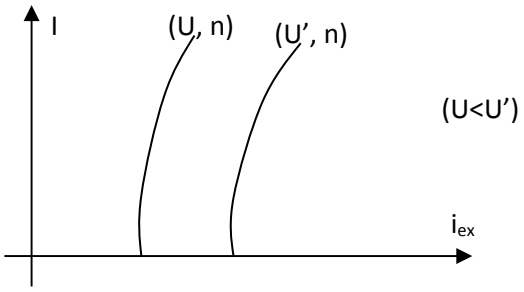
$$\Delta U(I) = h(I) = \varepsilon(I) + R\,I$$

Ainsi, il est facile, après avoir mesuré la résistance de l'induit, de déterminer la courbe de la **réaction magnétique d'induit** par : $\varepsilon(I) = \Delta U(I) - R.I$

9.3. Caractéristique de réglage

Pour n = cste, on étudie I = f (iex) à U = cste.

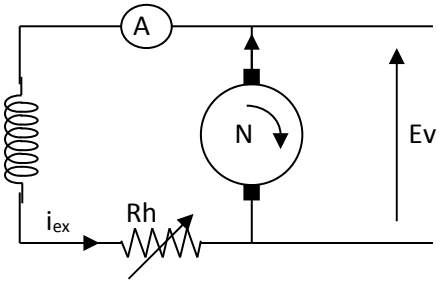
Cette caractéristique est intéressante dans le cas où le récepteur exige une tension constante pour un fonctionnement correct (charge d'une batterie par exemple).

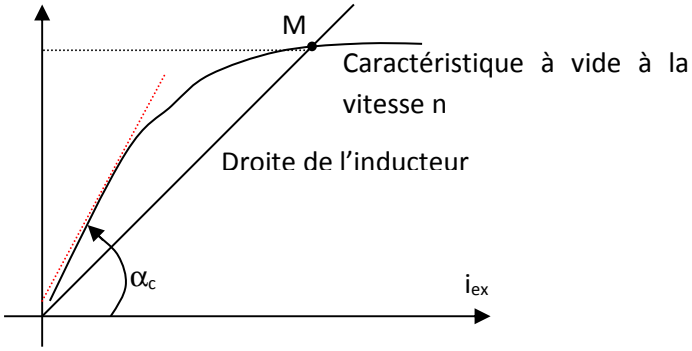


Allure des caractéristiques de réglage

10. Etude des caractéristiques de la génératrice à excitation shunt

10.1. Caractéristique à vide





La caractéristique à vide est déterminée habituellement par un montage à excitation séparée. Mais on peut également la relever en excitation shunt car $R.i_{ex}$ peut être négligée devant E. ($U_0 = E = E_v - Ri_{ex}$).

La génératrice shunt ne peut s'amorcer qu'en raison de l'aimantation rémanente et ne peut s'amorcer que dans un seul sens.

Le point de fonctionnement de la machine est défini par les relations :

E =f (iex) (caractéristique à vide)

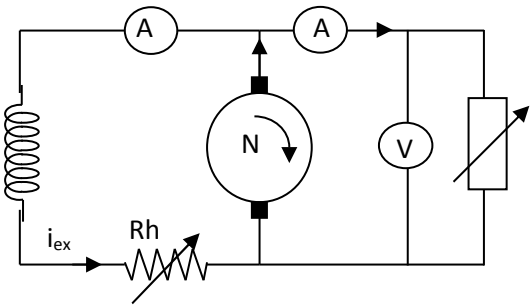
$E = (r + R_h)\, i_{ex}$ (droite de l'inducteur)

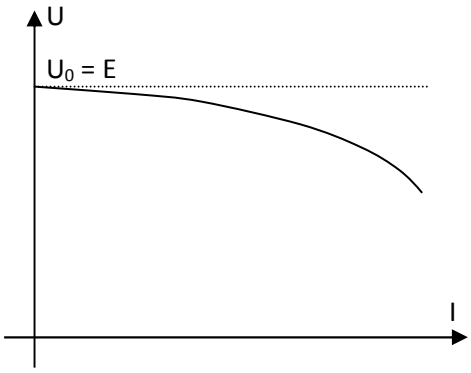
Si on représente sur un même graphe ces deux relations, le point de fonctionnement est l'intersection de ces 2 courbes, et la condition d'amorçage s'écrit donc :

$$r + R_h < Rc = tg\alpha_c$$

Où α_c : angle critique = pente de la partie linéaire de E (iex)

10.2. Fonctionnement en charge





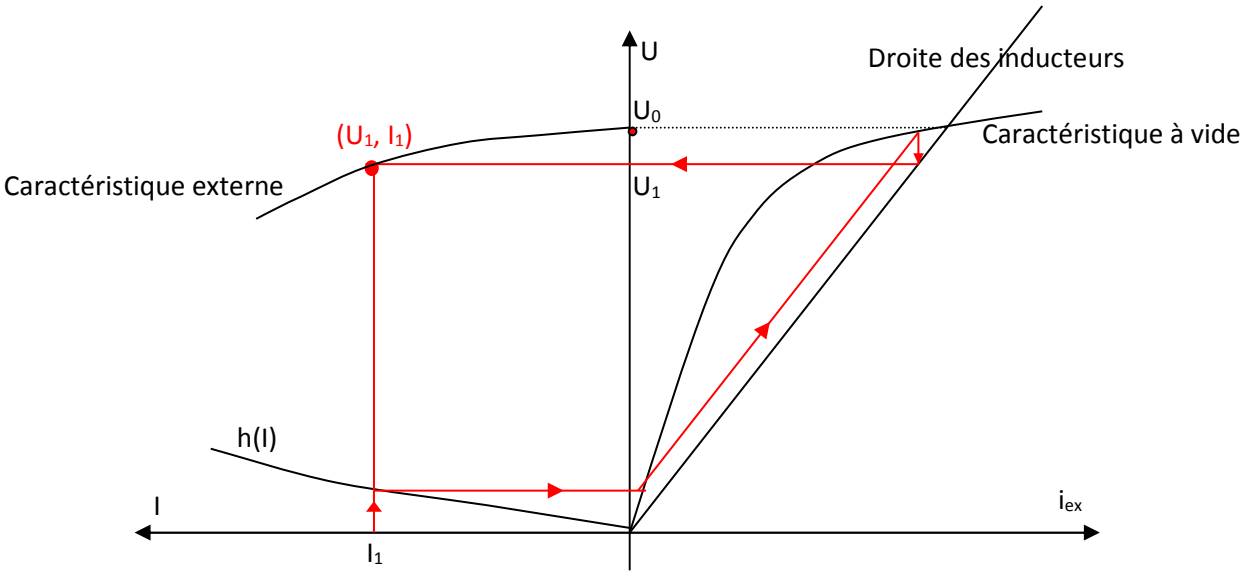
Pour une génératrice à excitation shunt on a : $U = r\, i_{ex}$

$$i_{ex} = U / r$$

Ainsi, l'équation de la machine se ramène à : U = f(I) à n = cste

Pour déterminer ce graphe, il y a 2 méthodes :

- Méthode expérimentale : cette méthode consiste à relever des points pour différentes valeurs de la résistance de charge à n=cste.
- Méthode de Pecou : c'est la méthode la plus pratique, elle consiste à déterminer en excitation séparée la caractéristique à vide et la courbe de la chute de tension, puis les représenter respectivement dans les quadrants de gauche et de droite d'un même repère, puis construire graphiquement U = f (I).

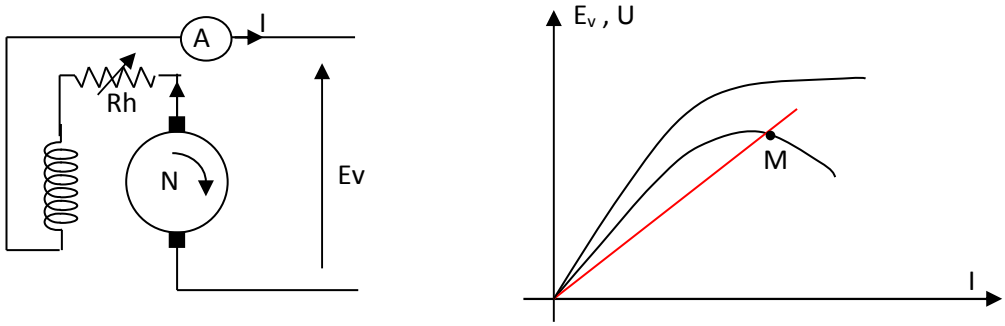


11. Génératrice à excitation série

Dans la génératrice a excitation série, le circuit inducteur est en gros fil puisque il est parcouru pour le courant d'induit. L'amorçage se produit grâce au magnétisme rémanent.

La caractéristique à vide de la machine est relevée à excitation séparée (attention : l'inducteur à une faible résistance).

La courbe en charge se déduit à partir de la courbe à vide, en retranchent les chutes de tentions de l'induit.



La tension aux bornes d'une génératrice à excitation série varie considérablement avec la charge. (Caractéristique tombante).

Le point de fonctionnement se situe à l'intersection de la caractéristique externe et la caractéristique qui représente le fonctionnement du circuit extérieur (la charge).