La machine à courant continu

Contenu

1. Description générale
2. Equations générales et circuits équivalents
3. Courbes caractéristiques, démarrage et freinage
4. Machines particulières

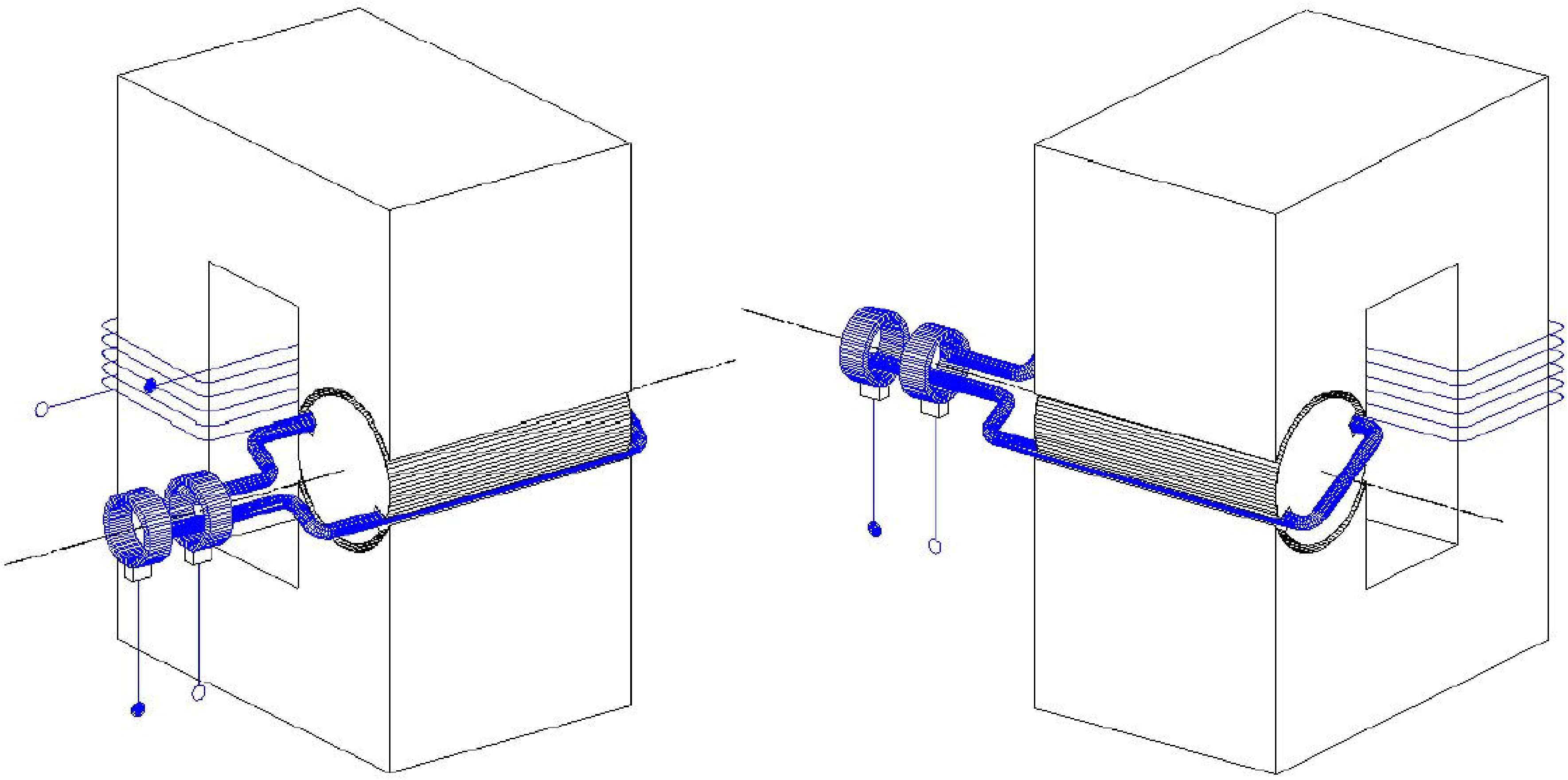
Contenu

1. Description générale
    1. Découverte du fonctionnement
    2. Constitution
2. Equations générales et circuits équivalents
3. Courbes caractéristiques, démarrage et freinage
4. Machines particulières

1.1 Découverte du fonctionnement

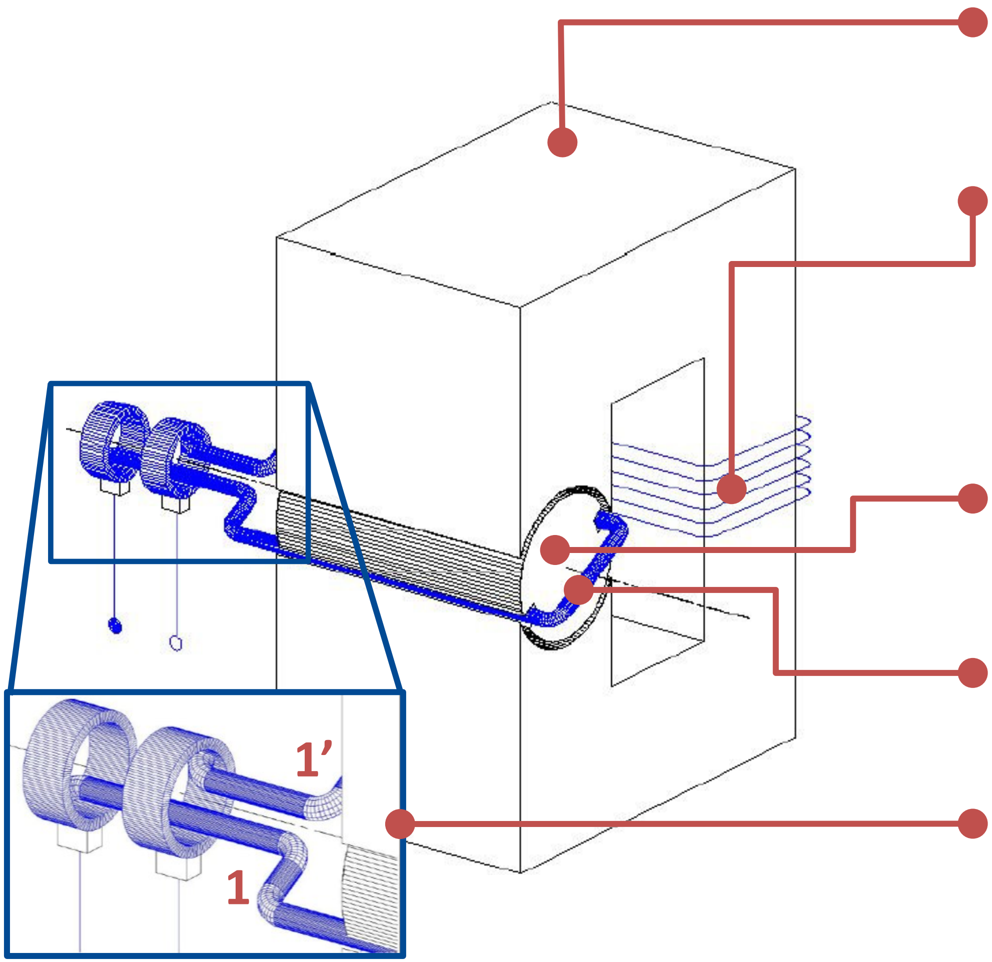
Machine hétéropolaire

Pour découvrir comment la MCC fonctionne, on va commencer par étudier le fonctionnement de la machine hétéropolaire



1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Constitution



- Stator ferromagnétique
- Inducteur au stator :
  Bobine de N_s spires parcourues par un courant continu
- Rotor lisse et **ferromagnétique**
- Induit au rotor :
  Conducteur 1 et 1', formant une spire
- Système collecteur sans commutateur sur les bornes 1 et 1'

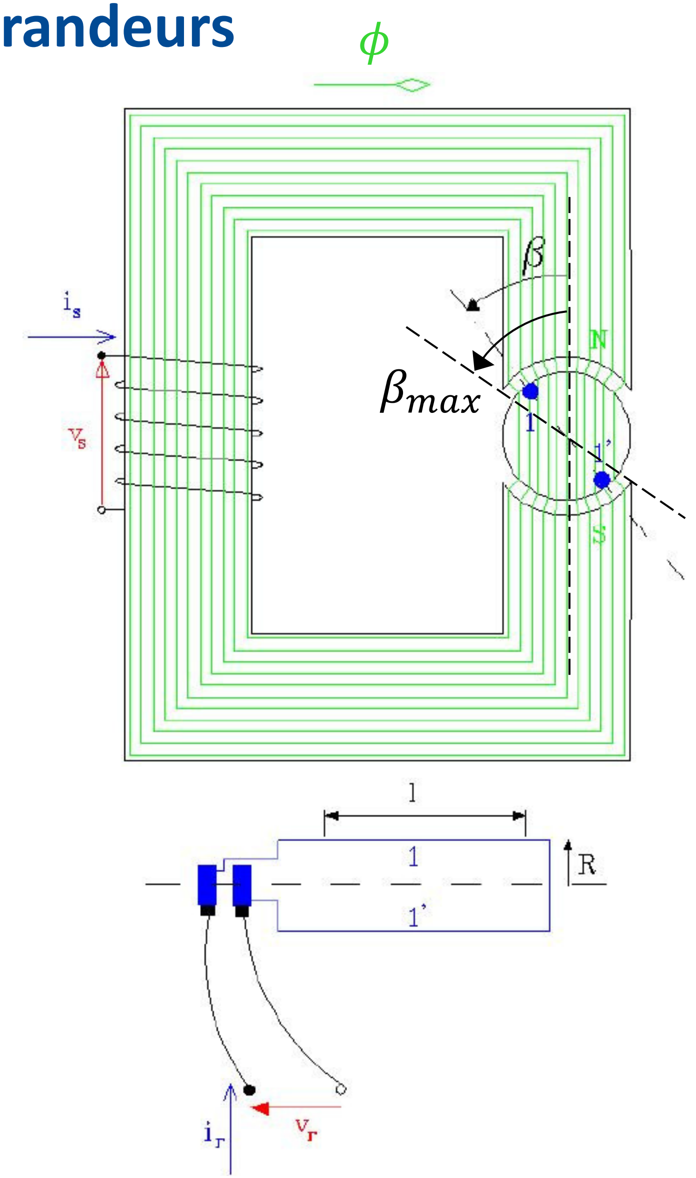
1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Grandeurs

- Courant continu i_s au stator, sous une tension v_s
- Flux ϕ dans le circuit ferromagnétique
- Courant i_r au rotor, sous une tension v_r
- Conducteur 1 et 1' de longueur utile l

Fer supposé parfait (perméabilité infinie)
→ Le passage des lignes de flux dans l'entrefer est minimal
→ Répartition du flux dans l'entrefer supposée radiale

Pour $\beta_{max} < \beta < \pi - \beta_{max}$, la périphérie du rotor n'est pas traversée par des lignes de flux



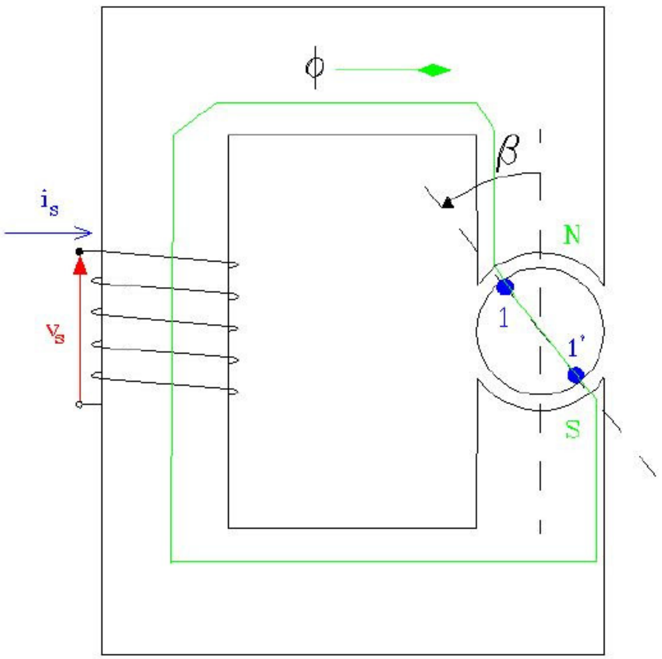
1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Fonctionnement à vide ($i_r = 0$)

Calcul de la composante radiale de B sur la périphérie du rotor

- Pour $0 \leq \beta < \beta_{max}$:
  loi de la f.m.m. appliquée à un contour fermé traversant radialement l'entrefer :
  $$N_s\, i_s = H \cdot 2\delta$$
  Où δ : largeur de l'entrefer (considérée constante)
  $$\rightarrow B_r = \mu_0 H = \mu_0 \frac{N_s\, i_s}{2\delta}$$

- Pour $\beta_{max} < \beta < \pi - \beta_{max}$:
  Périphérie du rotor pas traversée par le flux
  $$\rightarrow B_r = 0$$

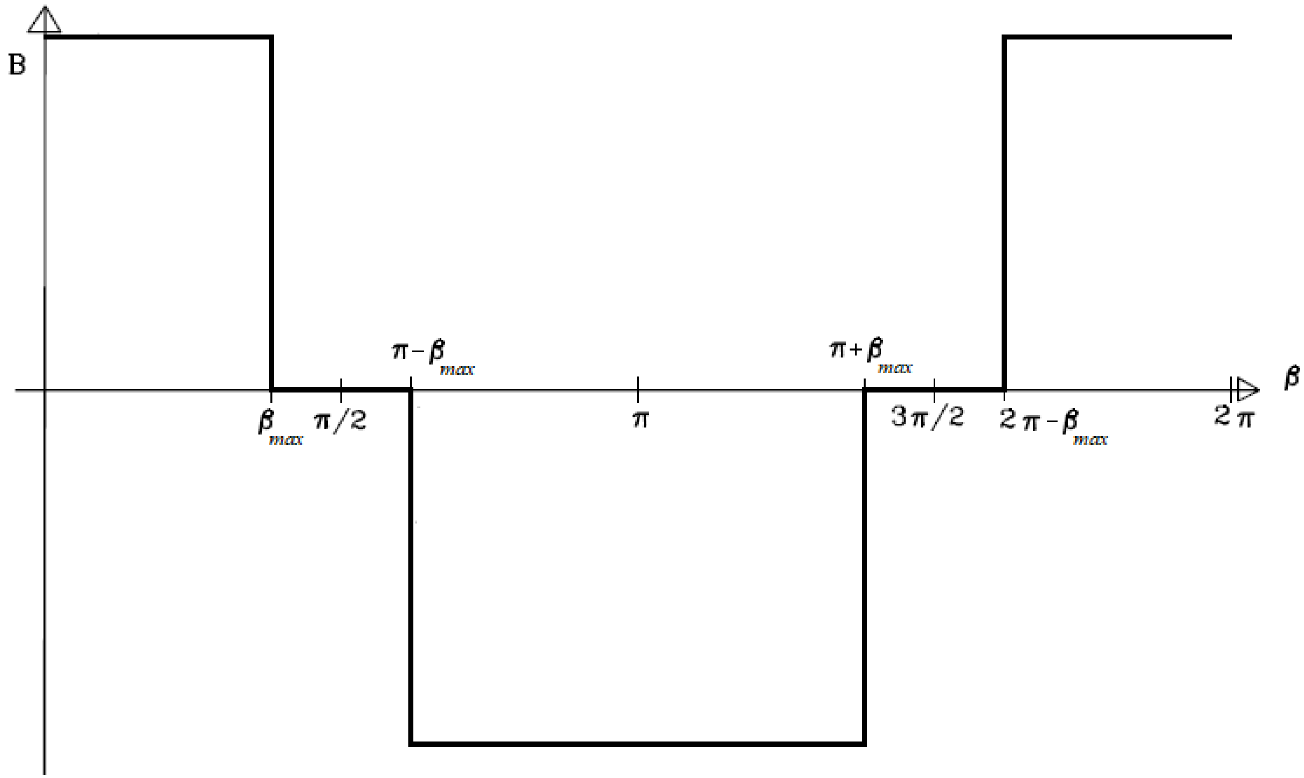


En étendant le même raisonnement sur $0 \leq \beta < 2\pi$, on trace le graphe de $B(\beta)$

1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Fonctionnement à vide ($i_r = 0$)

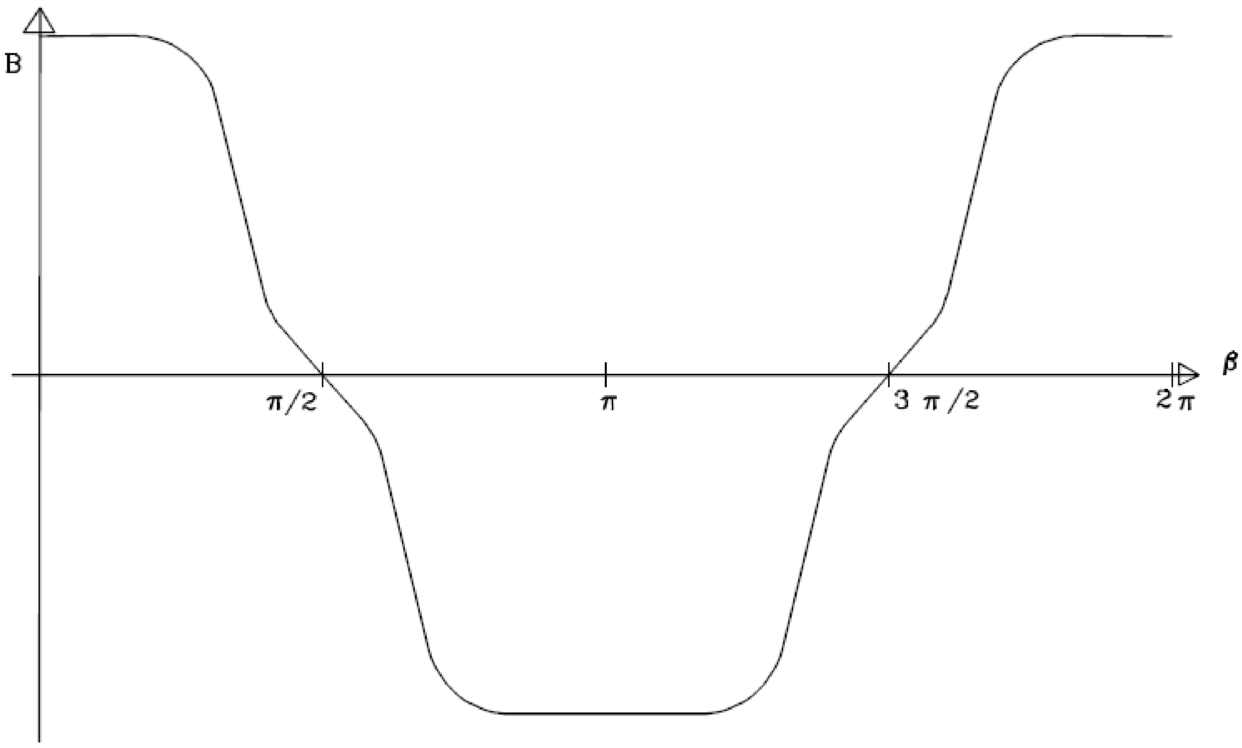
On a une répartition rectangulaire du champ d'induction radial dans l'entrefer



1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Fonctionnement à vide ($i_r = 0$)

En réalité, le fer n'a pas une perméabilité infinie et la largeur de l'entrefer n'est pas constante
→ le champ d'induction radial a une variation plus continue



1.1 Découverte du fonctionnement

Fonctionnement à vide ($i_r = 0$)

Calcul de la tension aux bornes de la spire 11’

- F.e.m. aux bornes du conducteur 1 :

$$e_1 = B_r l\, v = B_r(\beta)\, l\, R\, \Omega_r$$

 R : rayon du rotor
 Ω_r : vitesse de rotation (supposée constante)

- F.e.m. aux bornes du conducteur 1’ :

$$e_{1'} = -B_r l\, v = -B_r(\beta)\, l\, R\, \Omega_r$$

→ F.e.m. engendrée aux bornes des conducteurs proportionnelle au produit d’un flux et d’une vitesse angulaire

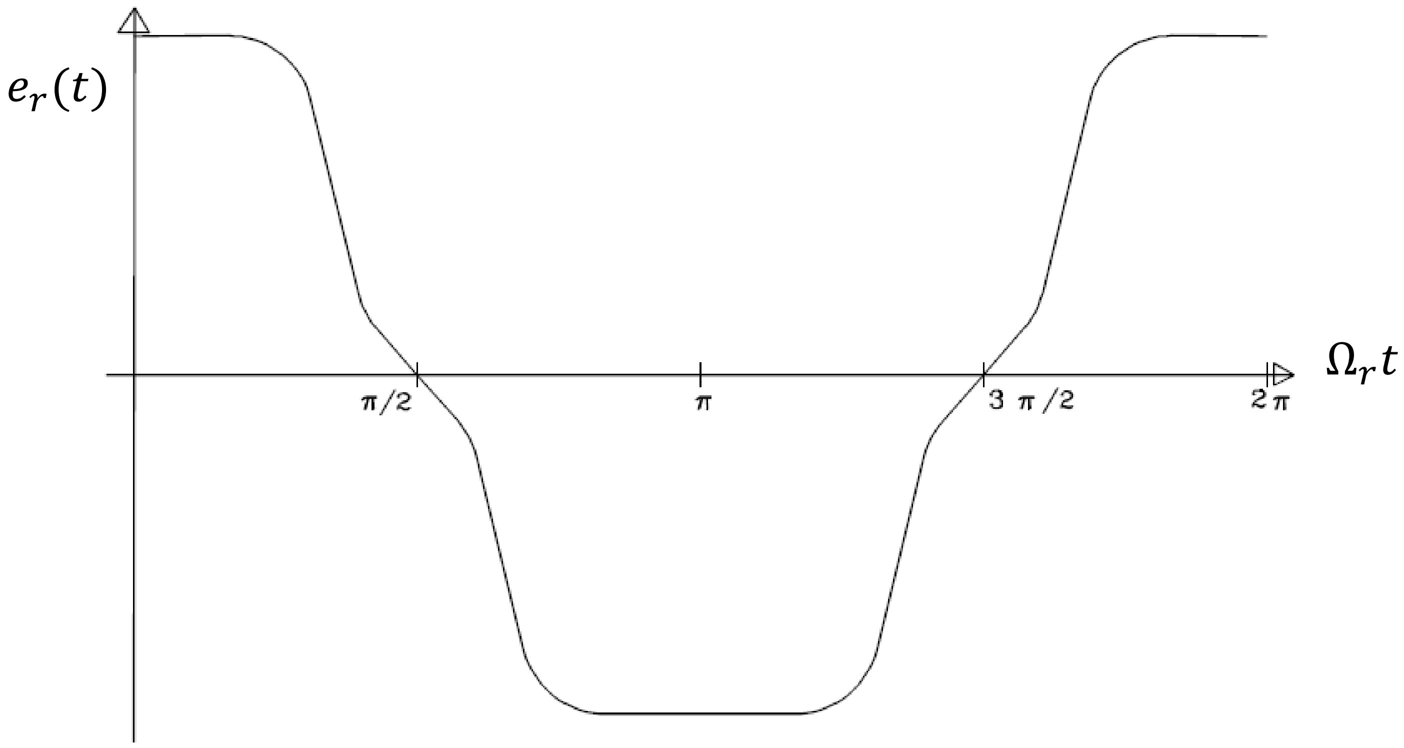
- F.e.m. aux bornes de la spire 11’ :

$$e_r = e_1 - e_{1'} = 2\, l\, R B_r(\beta)\, \Omega_r = c^{te} B_r(\Omega_r t)$$

Tension aux bornes de l’induit : fonction périodique du temps qui reproduit dans le temps la répartition spatiale de B_r

1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Fonctionnement à vide ($i_r = 0$)



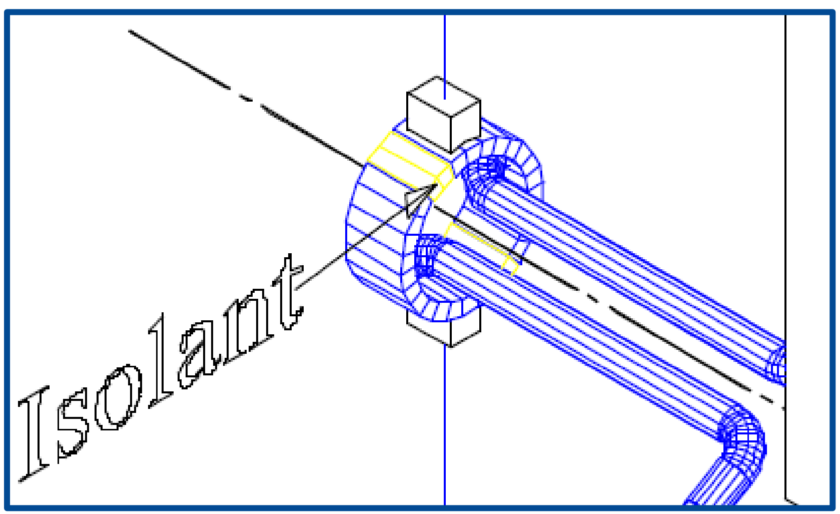
Tension aux bornes de l'induit alternative
→ utilisation d'un collecteur avec commutateurs pour redresser la tension

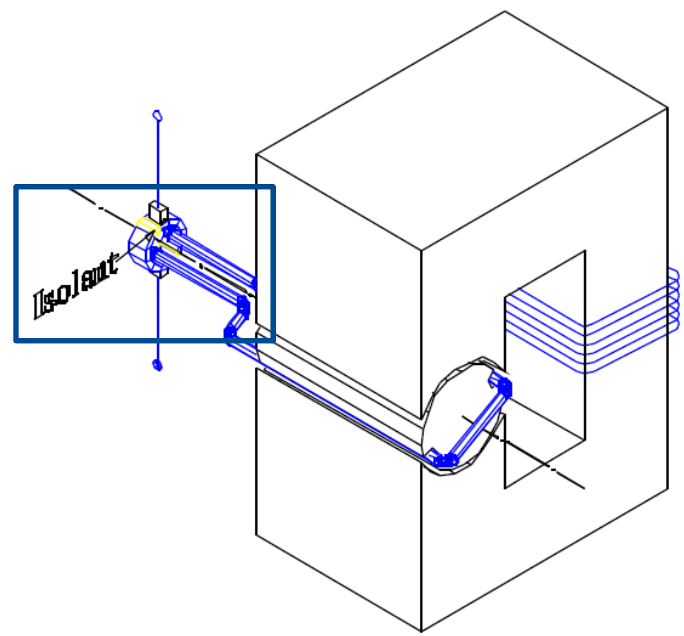
1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Collecteur avec commutateurs

Collecteur avec commutateurs élémentaire de la machine hétéropolaire :

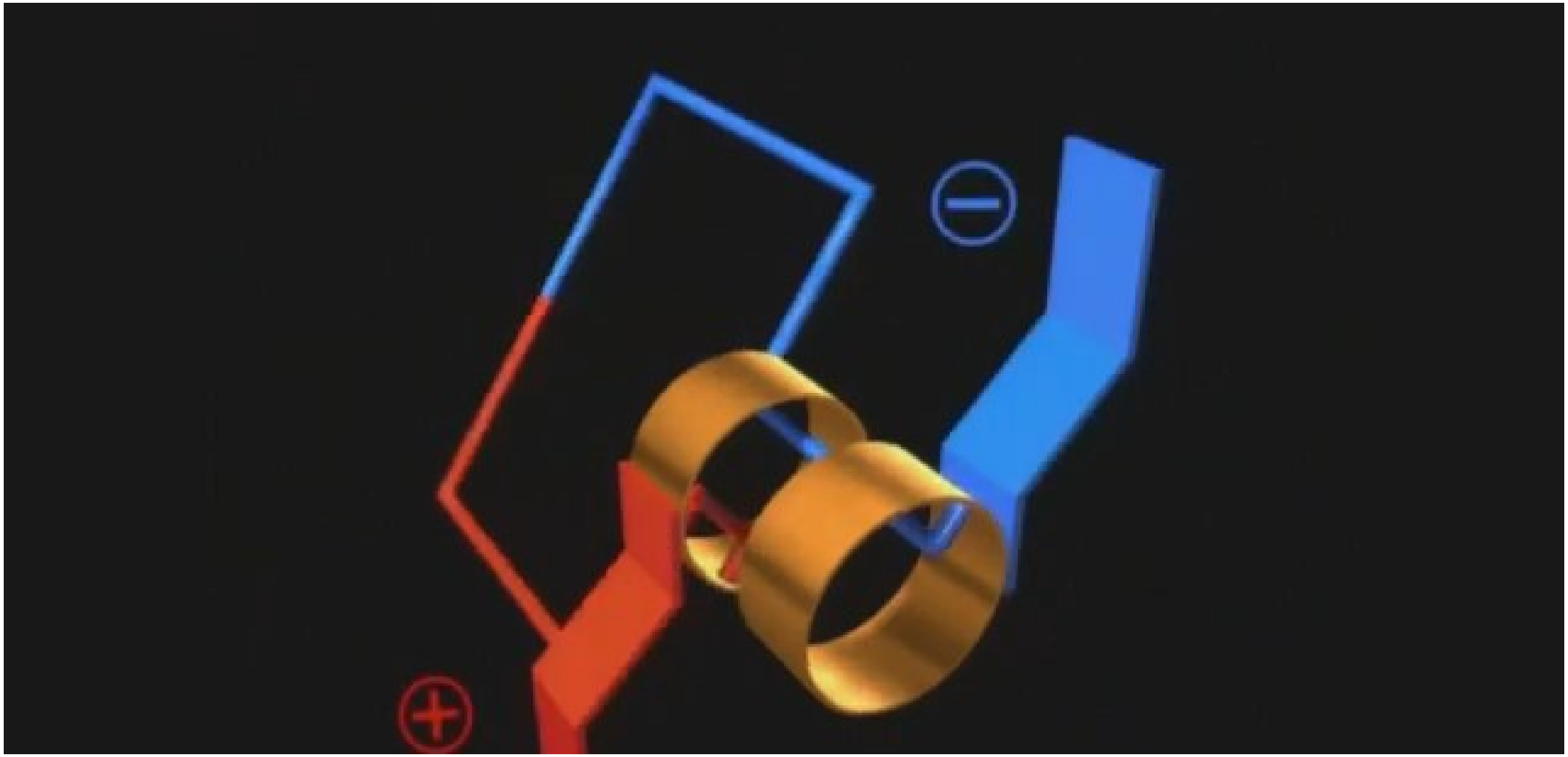
- Bague tournante coupée en deux lames isolées électriquement l'une de l'autre et raccordées chacune à une extrémité de la spire
- Deux balais fixes permettant de recueillir le courant





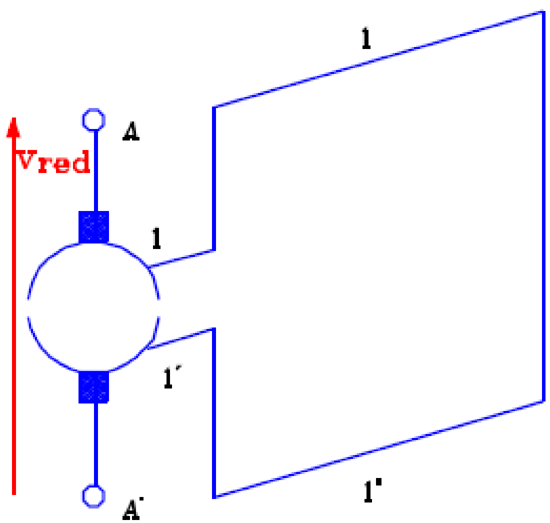
1.1 Découverte du fonctionnement

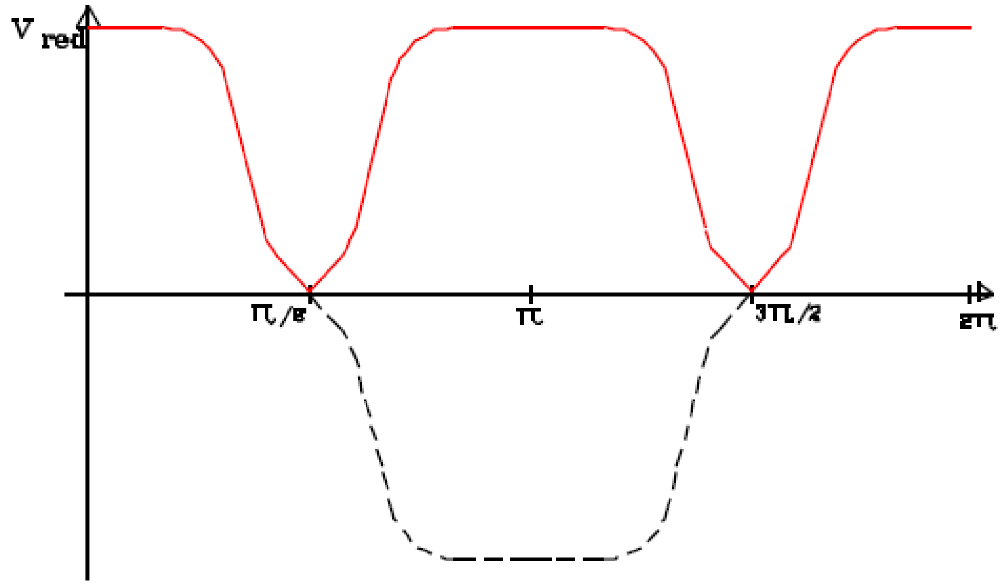
Machine hétéropolaire - Collecteur avec commutateurs



1.1 Découverte du fonctionnement

Machine hétéropolaire - Collecteur avec commutateurs





- F.e.m. aux balais de sortie : unidirectionnelle
- Courant résultant dans le circuit extérieur : unidirectionnel

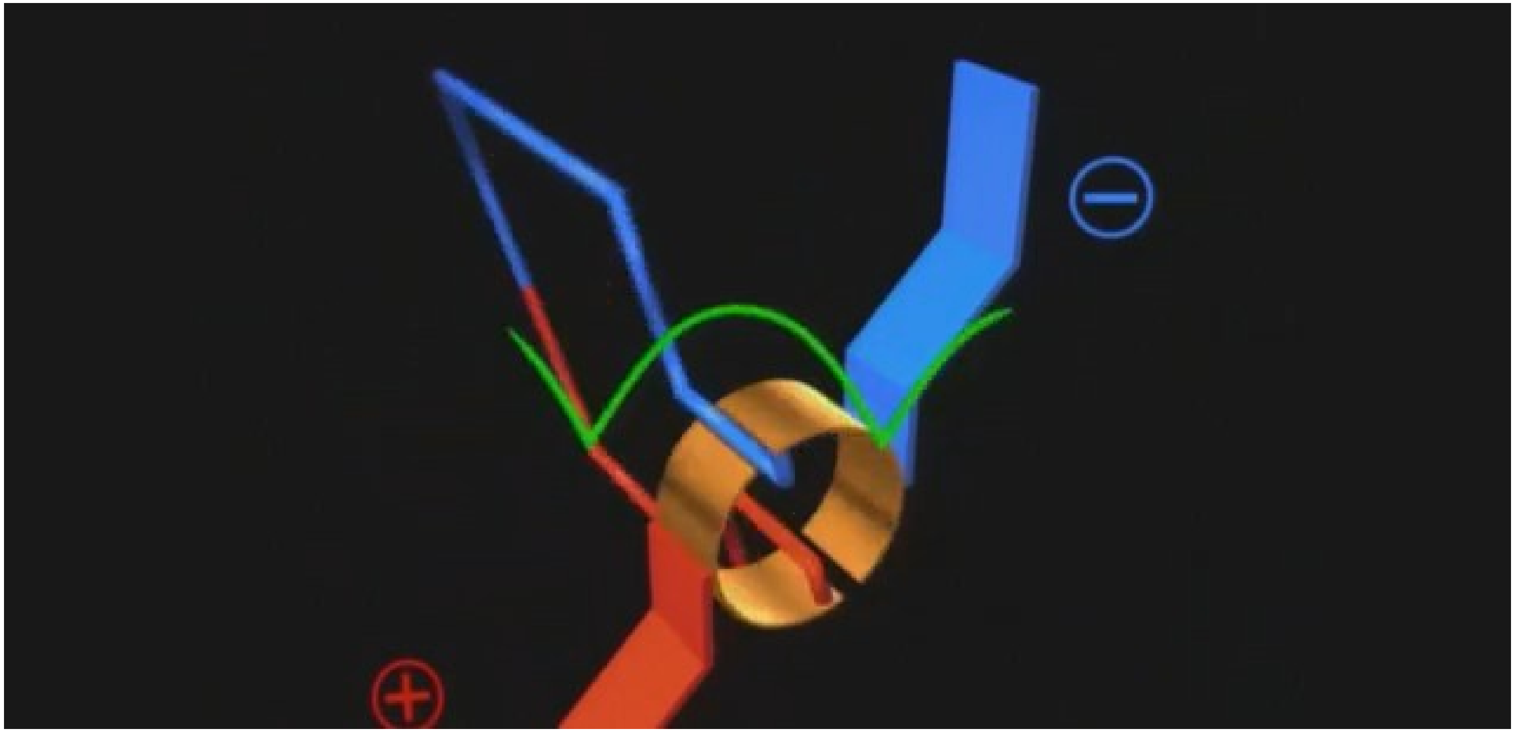
La machine hétéropolaire qu’on vient de construire ressemble fortement à la machine de Pixii

Quel est le principal problème de la f.e.m aux balais de sortie ?
Comment Gramme avait résolu ce problème dans sa dynamo ?

1.1 Découverte du fonctionnement

Collecteur avec commutateurs

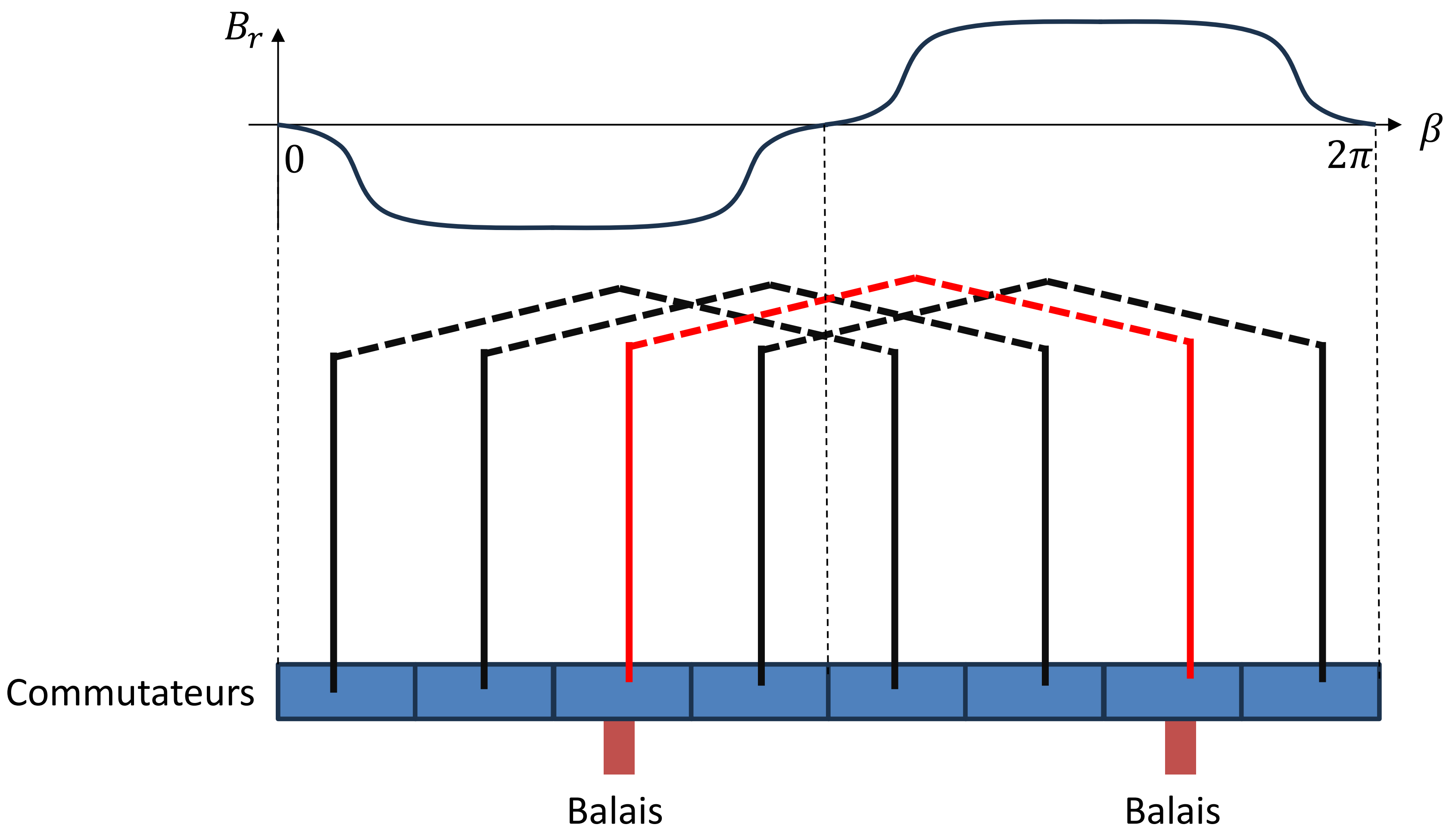
Pour rendre la f.e.m plus lisse, Gramme ajoute plusieurs spires et plusieurs commutateurs



Essayons de déplier le rotor en 2D pour y voir plus clair

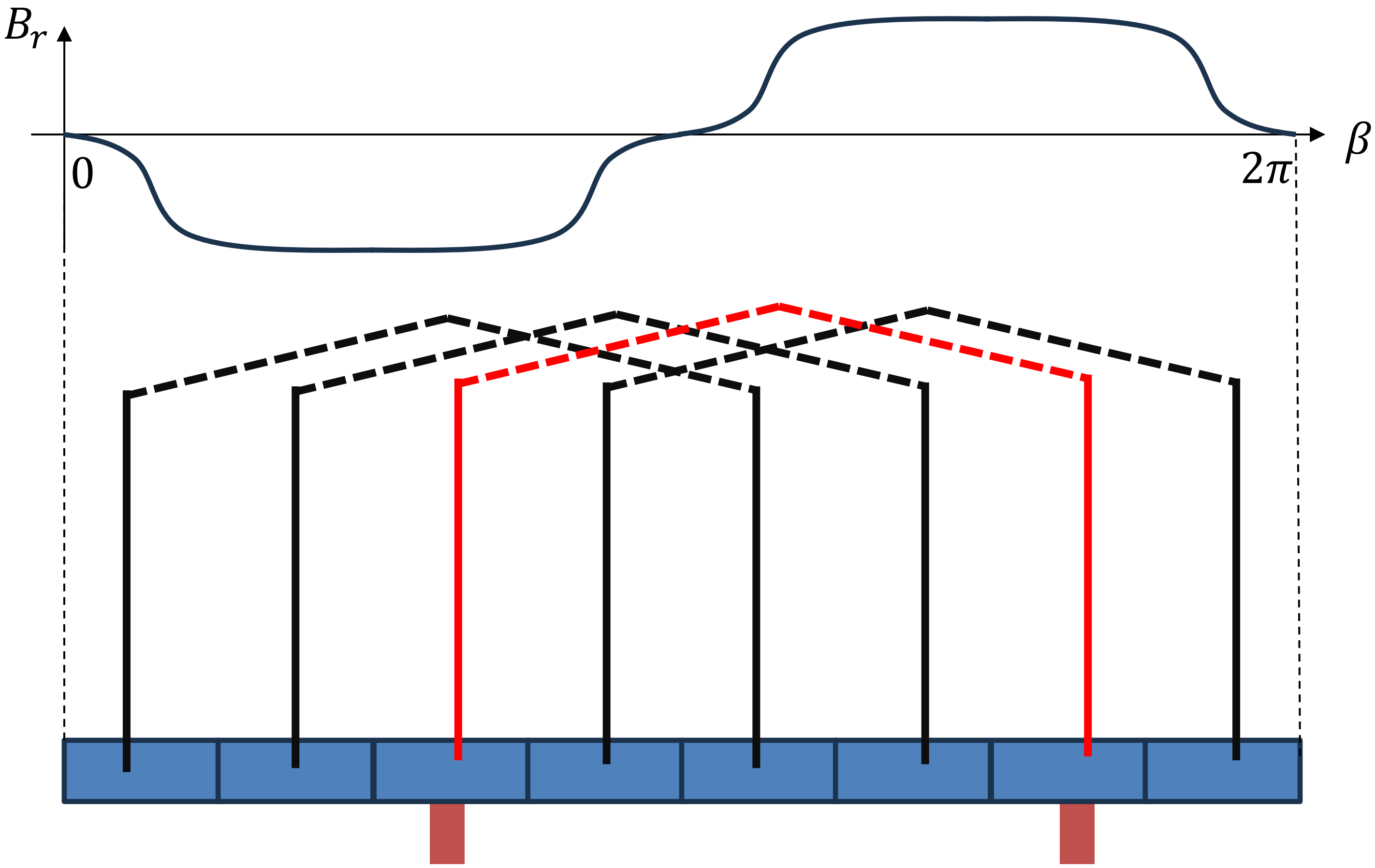
1.1 Découverte du fonctionnement

Rotor déplié en 2D



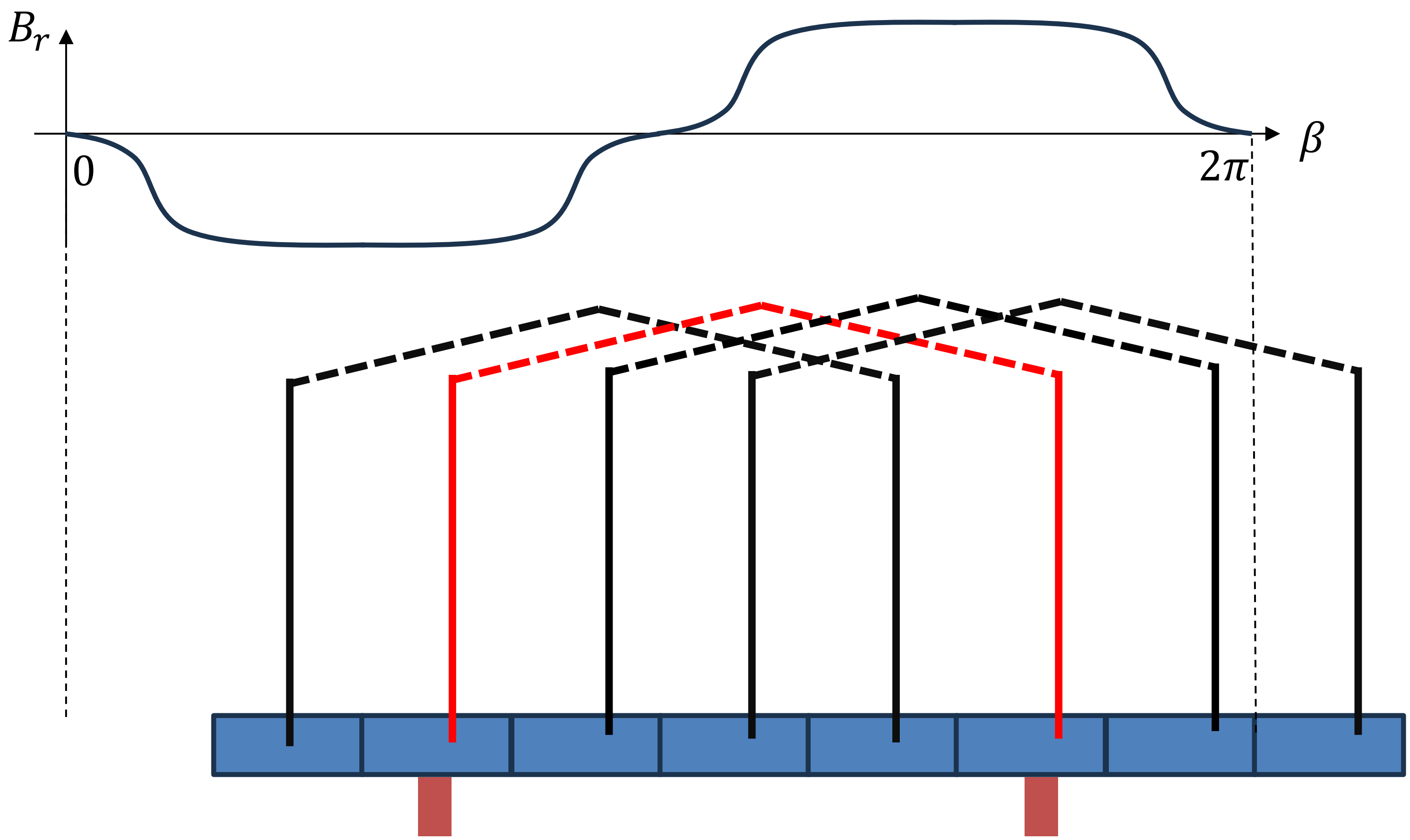
1.1 Découverte du fonctionnement

Rotor déplié en 2D



1.1 Découverte du fonctionnement

Rotor déplié en 2D

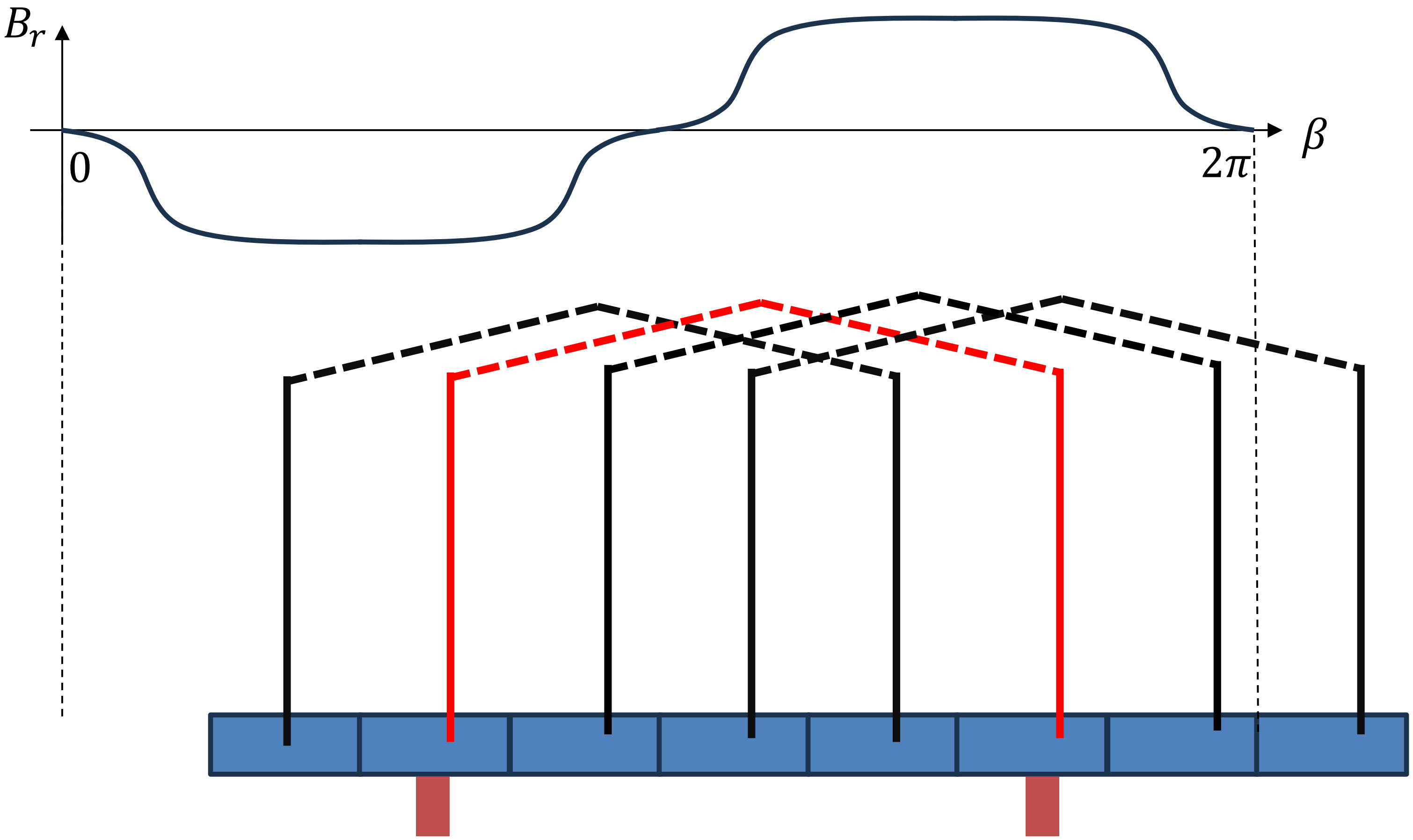


Après une rotation de $\frac{2\pi}{8}$, la spire connectée au balais a changé, grâce aux commutateurs

→ La spire connectée est toujours celle qui se trouve dans la zone de champ radial plus élevé

1.1 Découverte du fonctionnement

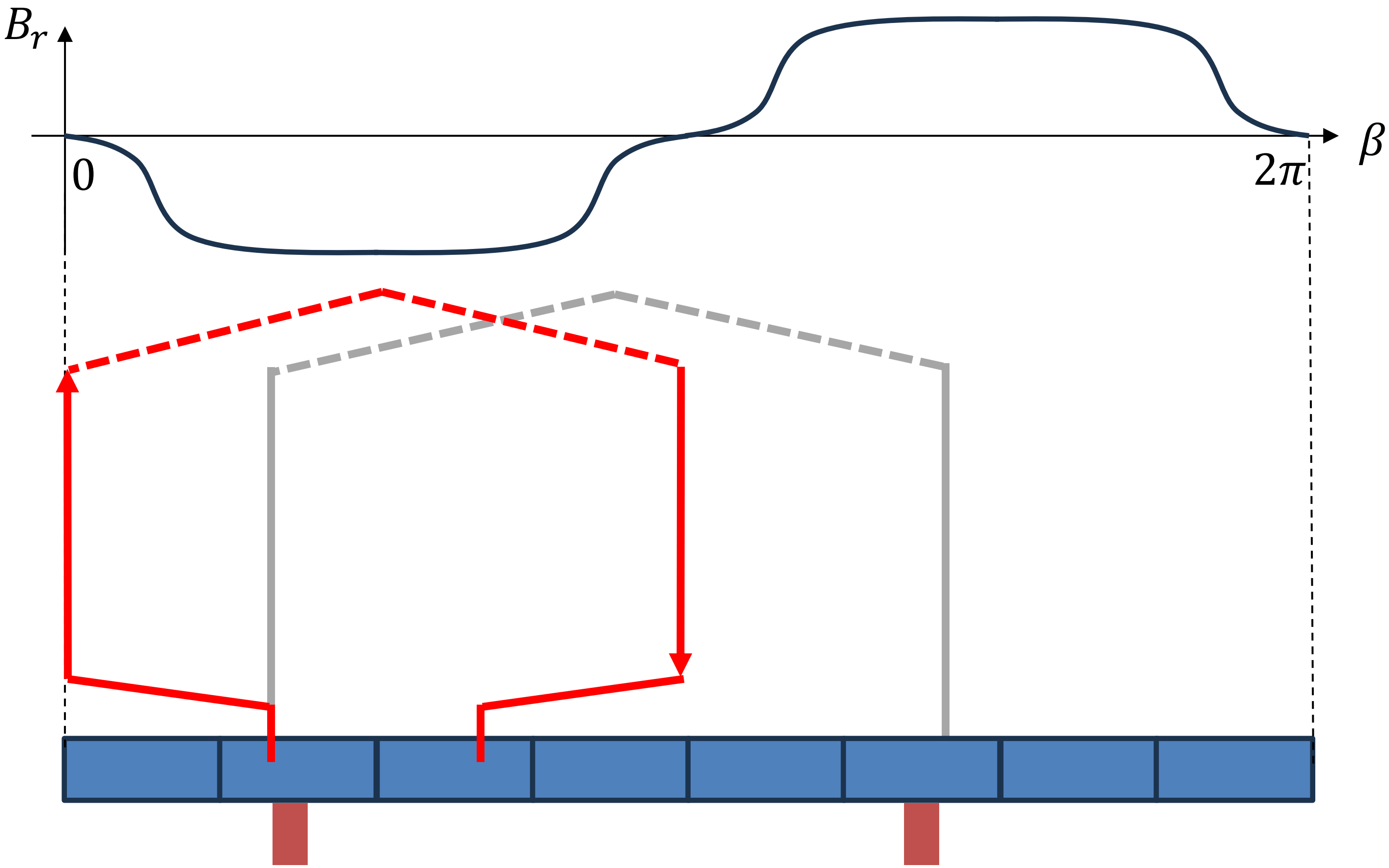
Rotor déplié en 2D



Sur combien de spires récolte-t-on la f.e.m en chaque instant ?
Comment pourrait-on utiliser toutes les spires à chaque instant ?

1.1 Découverte du fonctionnement

Rotor déplié en 2D

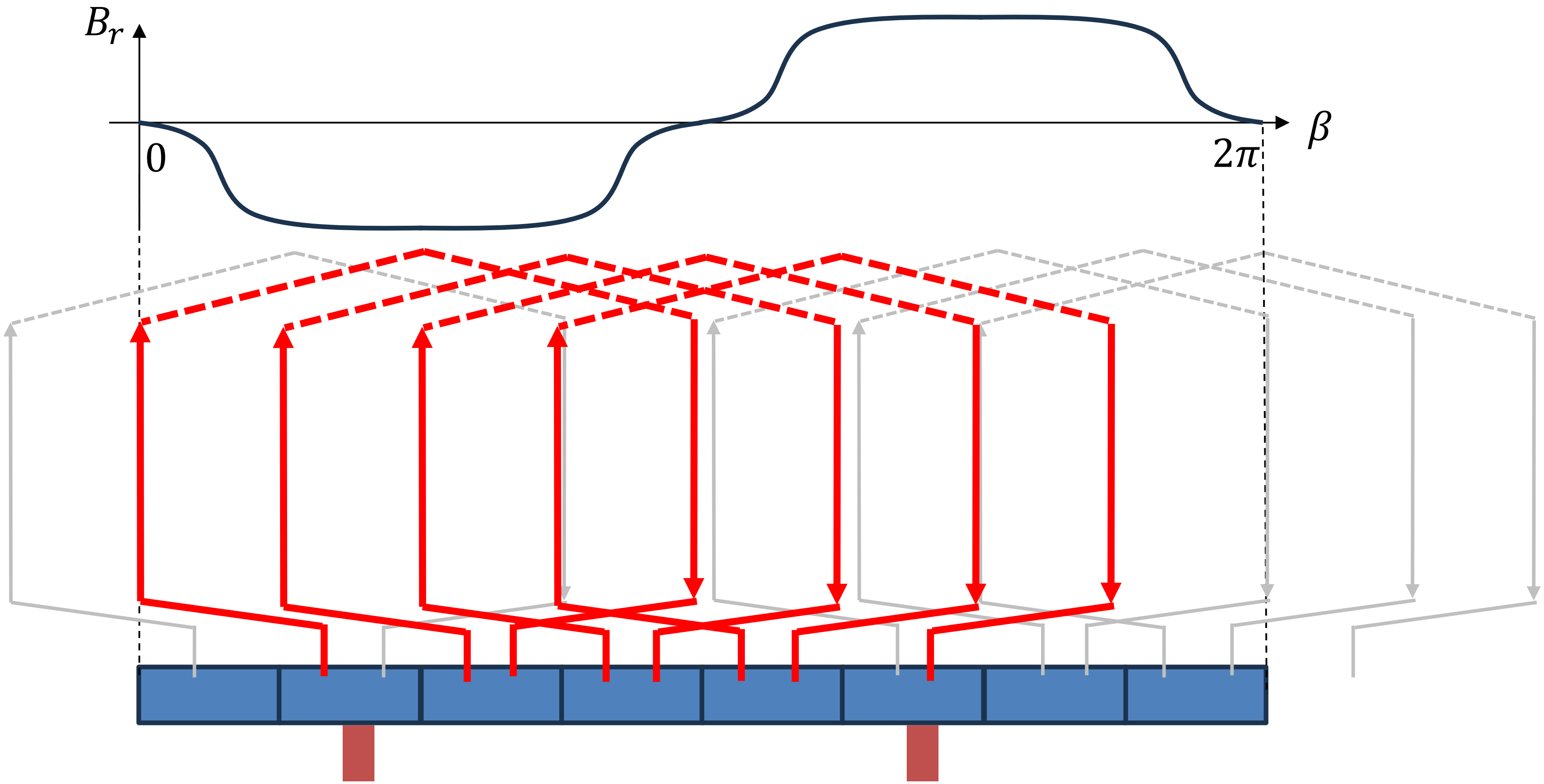


Au lieu de connecter les deux bornes de la spire aux commutateur opposés (en gris) on les connecte au commutateurs voisins (en rouge)

Que se passe-t-il si on place toutes les spires ainsi ?

1.1 Découverte du fonctionnement

Rotor déplié en 2D

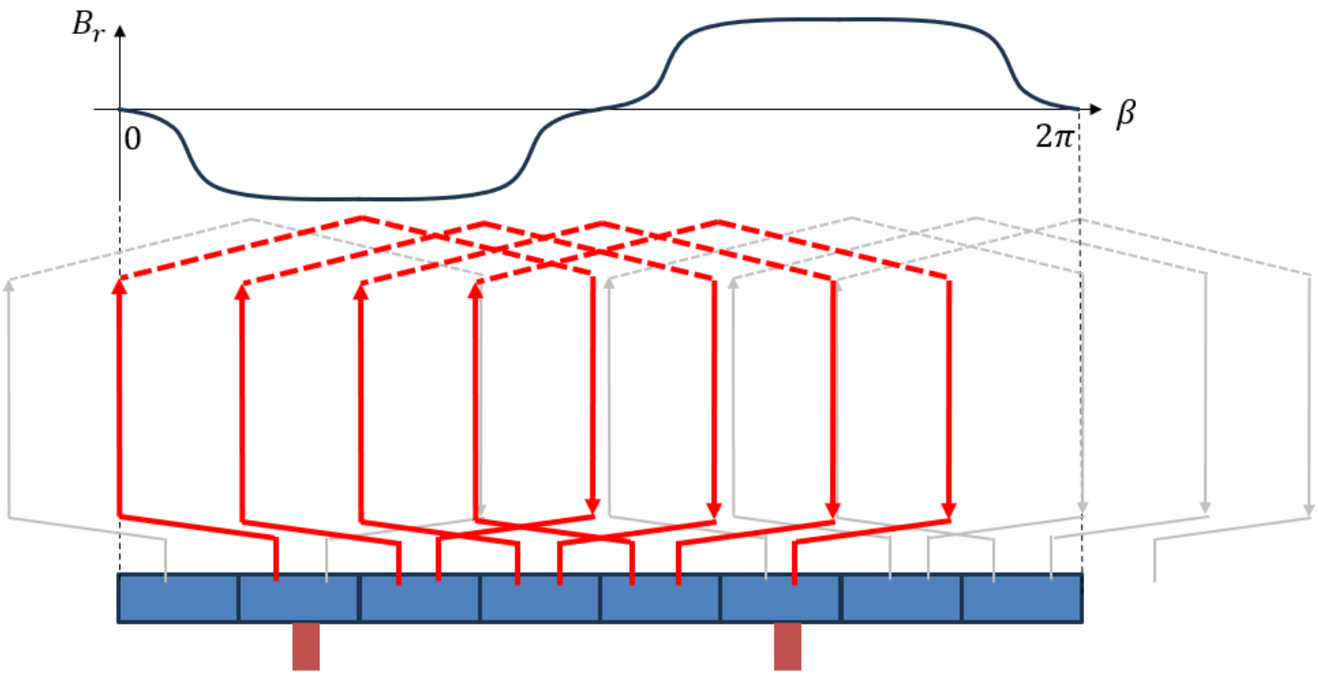


On a plusieurs spires en série entre les deux balais

→ Le f.e.m récoltée aux balais est plus élevée, unidirectionnelle et lisse, et toutes les spires sont utilisées en permanence

1.1 Découverte du fonctionnement

Rotor déplié en 2D

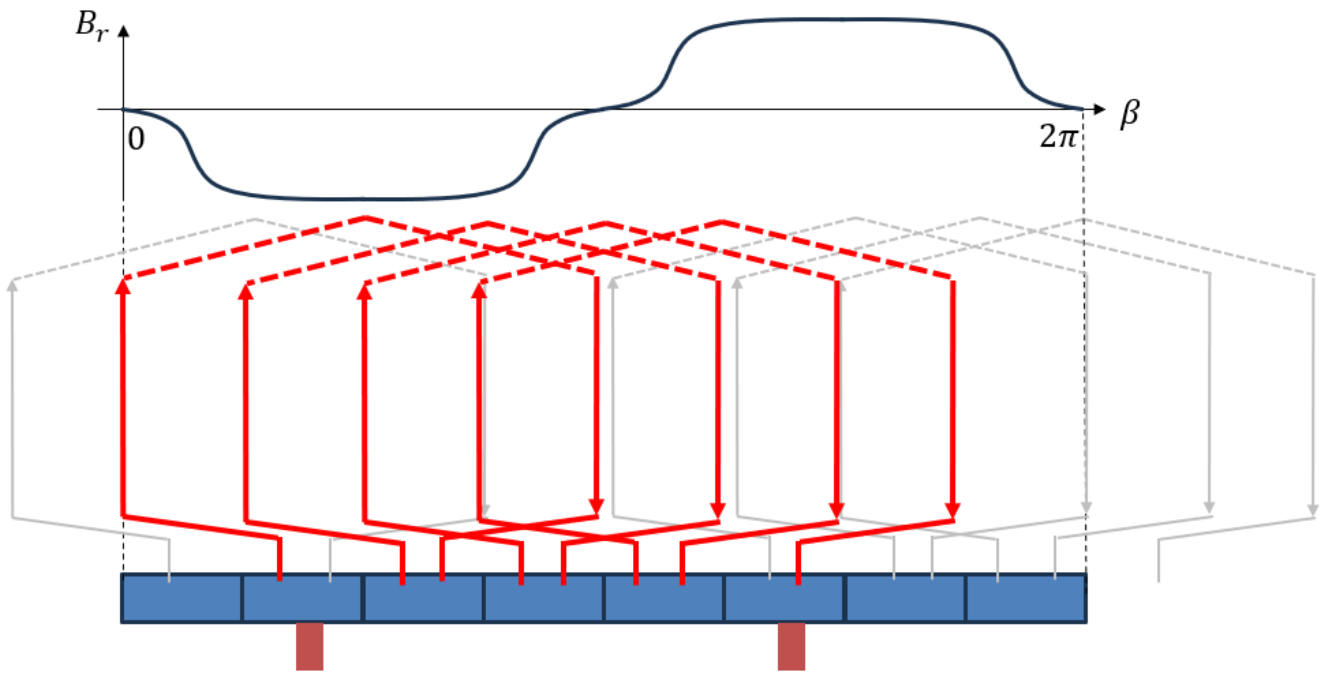


Chaque circuit de spires en série reliant deux balais est appelé **dérivation**
Sur ce rotor, on a donc deux dérivations (en rouge et en gris)

La tension entre deux balais est la somme des f.e.m de toutes les spires de la dérivation reliant ces deux balais

1.1 Découverte du fonctionnement

Rotor déplié en 2D



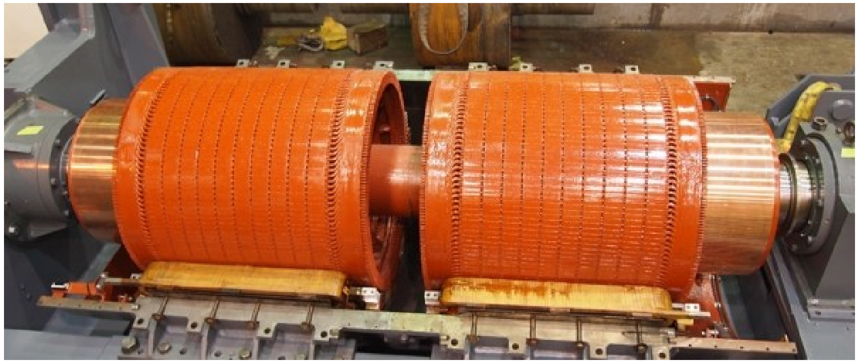
Maintenant qu'on a vu comment étaient réellement agencés les conducteurs du rotor de la MCC, on peut passer à une étude plus approfondie de la constitution

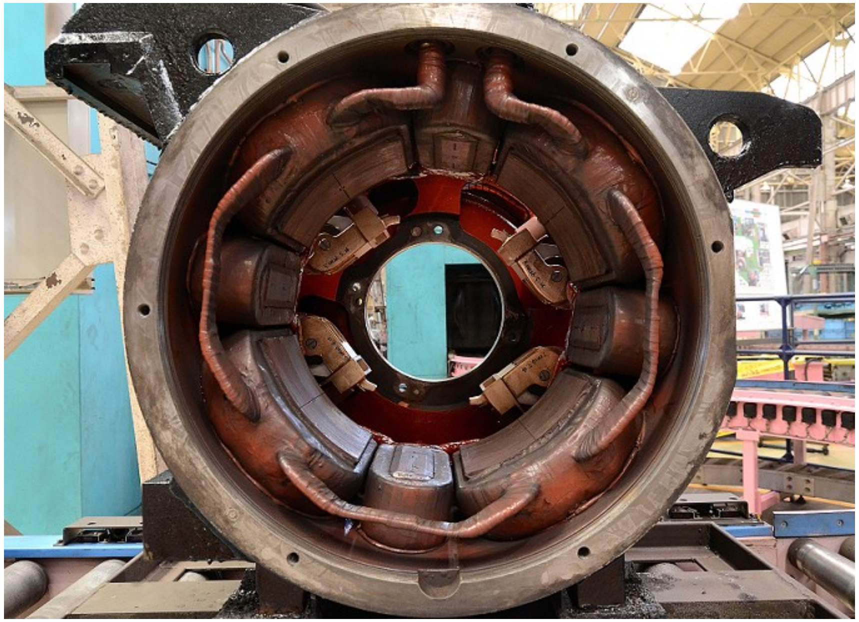
Contenu

1. Description générale
    1. Découverte du fonctionnement
    2. Constitution
2. Régime statique
3. Étude de la dynamique
4. Machines particulières

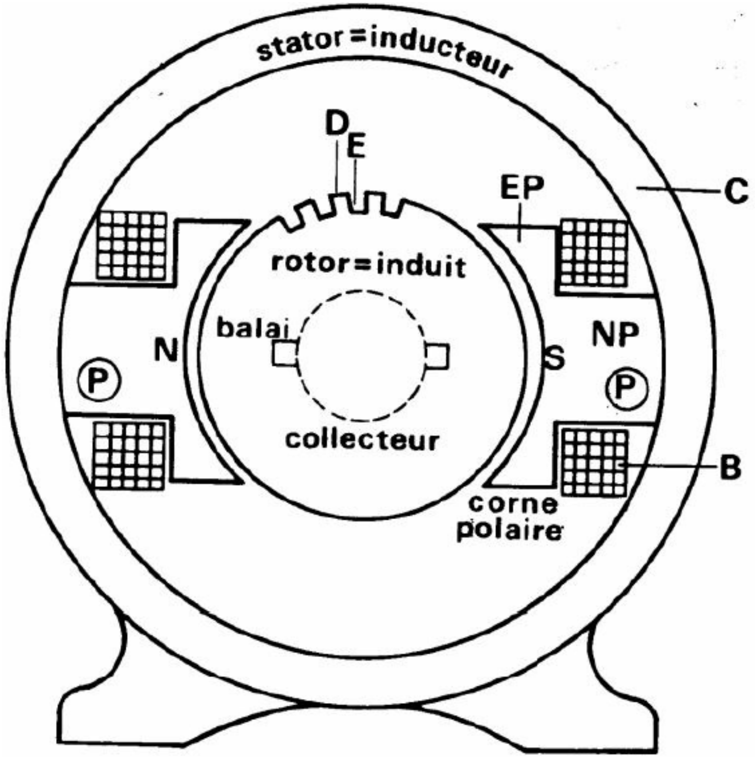
1.2 Constitution

Constitution





- Inducteur au stator
- Induit au rotor



1.2 Constitution

Stator/inducteur

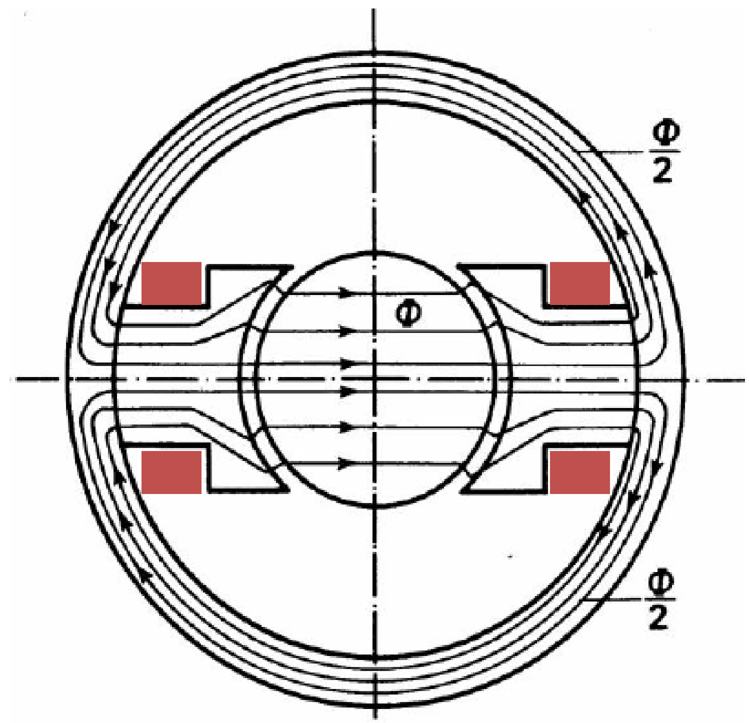
- Inducteur au stator
  Constitué d'aimants permanents ou d'électroaimants

L'inducteur est constitué de paires de pôles, créant le champ utile qui traverse l'entrefer

Nombre de paires de pôles p
Nombre de paires de pôles de l'inducteur

Jusqu'ici, on a vu que des machines à une paire de pôles

Mais on peut avoir des machines multipolaires



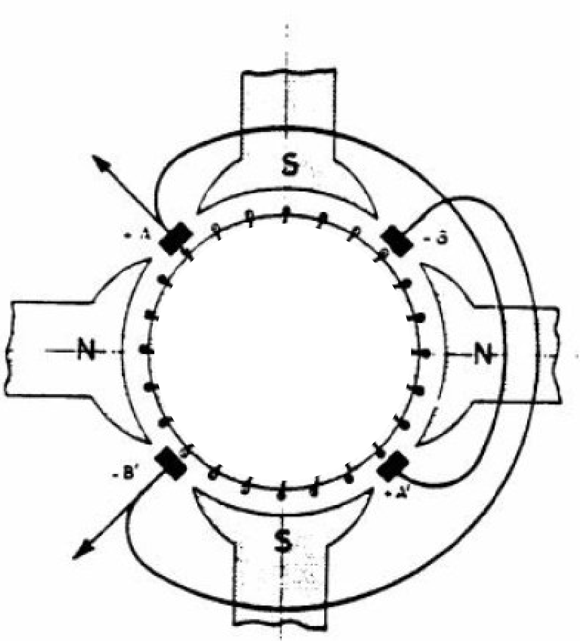
Inducteur à une paire de pôles
$p = 1$

1.2 Constitution

Inducteur multipolaire

Machine multipolaire
Machine dont l'inducteur possède plusieurs paires de pôles

Le principe de fonctionnement est exactement le même que pour une machine unipolaire



Inducteur à deux paires de pôles
$p = 2$

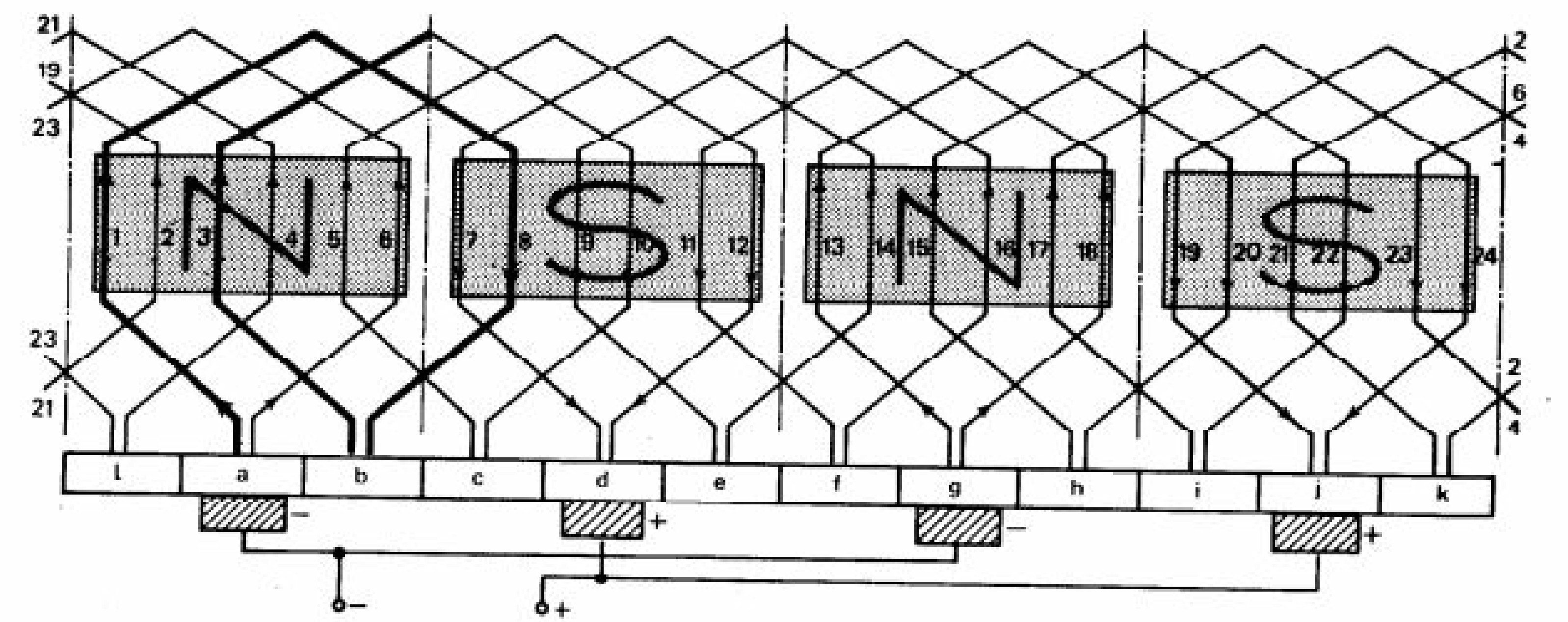
Pouvez vous devinez à quoi ressemble le rotor déplié d'un machine bipolaire ?

Combien de balais sont nécessaire dans une machine bipolaire ?

Combien de dérivation contient cette machine bipolaire ?

1.2 Constitution

Rotor/induit



On étend simplement les enroulements sous les 2 paires de pôles

On a besoin de 4 balais

On a 4 dérivations

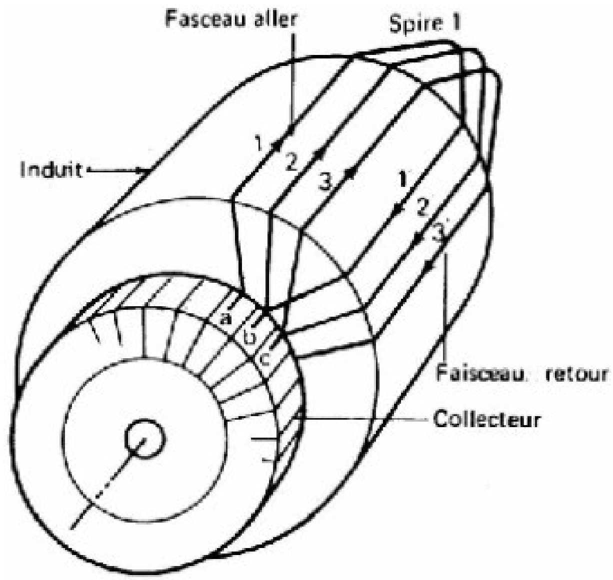
→ On peut étendre ce raisonnement pour toute machine multipolaire

1.2 Constitution

Rotor/induit

Induit au rotor

- Induit constitué de conducteurs placés dans des encoches sur la périphérie d'un rotor ferromagnétique
- Deux conducteurs se trouvant sous des pôles inverses connectés ensemble forme une spire
- Les spires sont mise en série par leur connexion sur le commutateur
- Le circuit de plusieurs spires en série reliant deux balais forme une dérivation



Les spires peuvent être :

- Diamétrales : la distance entre les deux conducteurs d'une spire correspond à la distance interpolaire
- À pas raccourci : la distance entre les deux conducteurs d'une spire est inférieure à la distance interpolaire

Une machine multipolaire à p paires de pôles nécessite $2p$ balais

1.2 Constitution

Dérivation

Soit un induit constitué de N_s spires

- Soit toute les spires sont mise en série (c'est le cas qu'on a rencontré jusqu'à présent)

→ Il n'y a qu'un circuit électrique entre chaque paires de balais
→ $2p$ balais, et $2p$ dérivations
→ Chaque dérivation contient $N_s/(2p)$ spires

- Soit on divise les spires en deux groupes, connectés en parallèle

→ On a deux fois $N_s/2$ spires connectées en série
→ Il y a **deux** circuit électrique possible entre chaque paires de balais
→ $2p$ balais, et $\boldsymbol{4p}$ dérivations
→ Chaque dérivation contient $N_s/(4p)$ spires

- …

De manière générale, on notera $2d$ = nombre de dérivations
→ $N_s/(2d)$ spires par dérivation

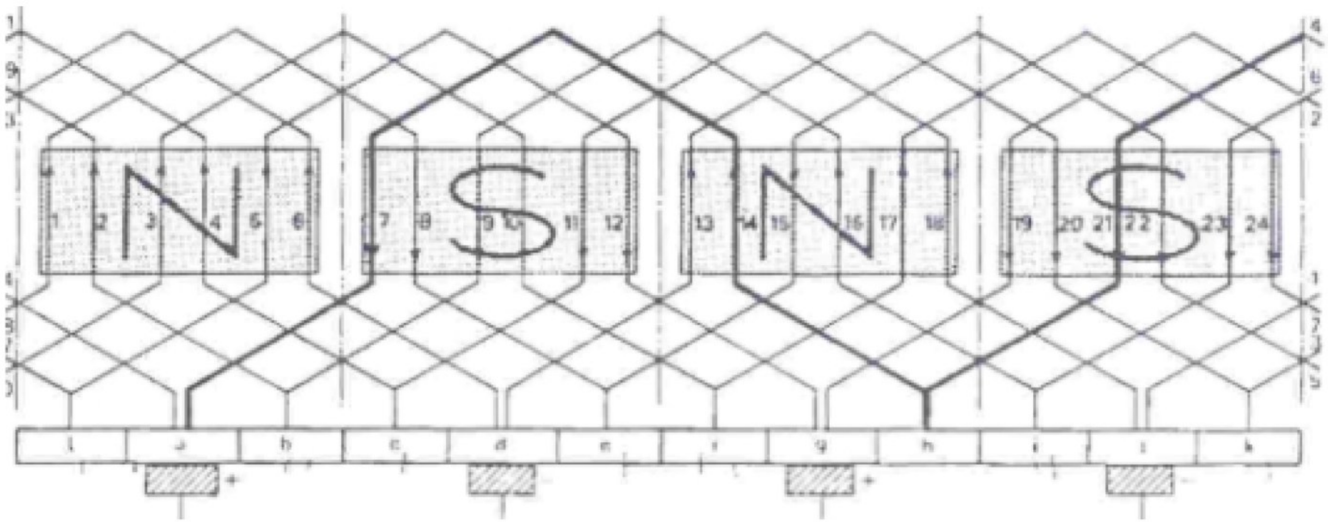
1.2 Constitution

Note – Type d'enroulement

Le type d'enroulement présenté ici, où toutes les spires d'une même dérivation se trouve sous une même paire de pôles, est appelé **enroulement imbriqué**

Tout les raisonnements seront fait en se basant sur ce type d'enroulement

Noter cependant qu'il existe un autre type d'enroulement, où les spires d'une même dérivation sont réparties sous les p paires de pôles : **enroulement ondulé**



Contenu

2.1 Machine à vide

Introduction

Système considéré

Grandeurs :

- Relatives au stator : « excitation », indice e : v_e, i_e
- Relatives au rotor : « armature », indice a : v_a, i_a
- Nombre de conducteurs : N_C
- Nombre de spires : $N_S = \frac{N_C}{2}$
- Nombre de pôles : p

Induit supposé infiniment divisé

→ On suppose que les spires sont uniformément réparties sur la périphérie du rotor

→ Cela va nous permettre de travailler avec des intégrales plutôt que des sommes discrètes

Notre premier objectif va être de calculer la tension récupérée aux bornes de l'induit, quand on travaille avec une génératrice :

- À vide ($i_a = 0$)
- Excitée ($i_e \neq 0$)
- Entraînée à vitesse Ω_r

2.1 Machine à vide

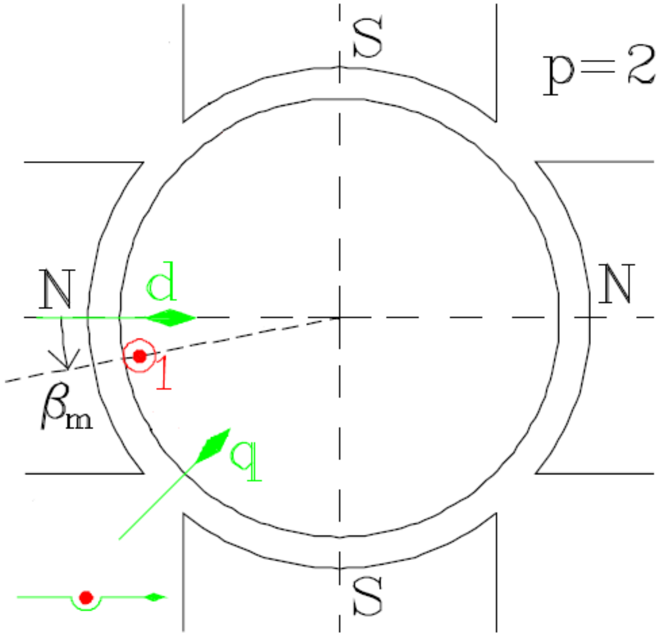
Introduction

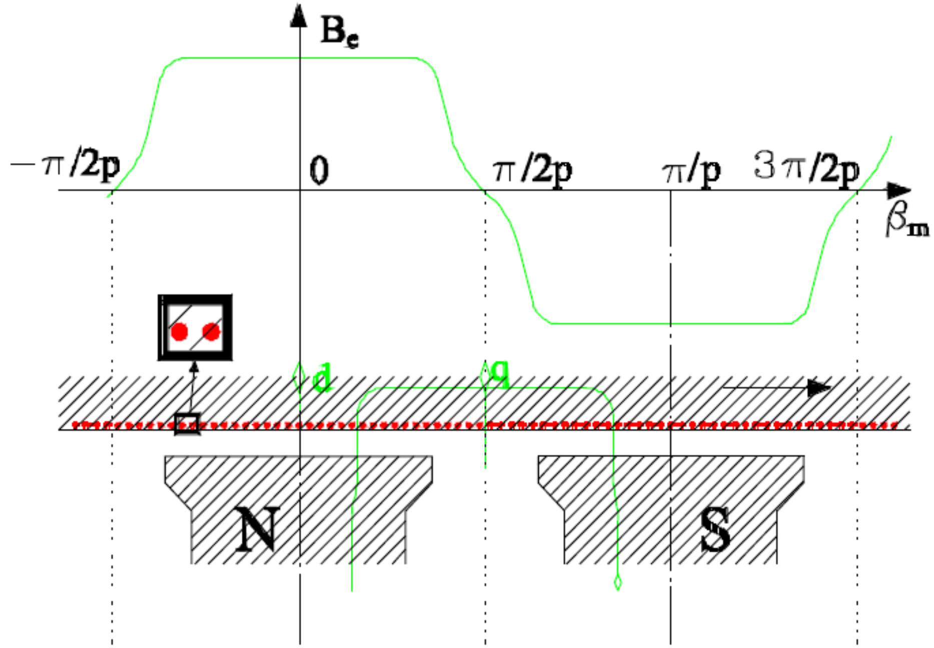
Répartition trapézoïdale de l'induction dans l'entrefer

→ On a une périodicité de $\frac{2\pi}{p}$ du champ d'induction

Axes de symétrie :

- Axe des pôles : axe longitudinal d $\quad(\mathrm{k}\frac{\pi}{p})$
- Axe interpolaire / axe neutre : axe transversal q $\quad(\mathrm{k}\frac{\pi}{p} + \frac{\pi}{2p})$





2.1 Machine à vide

Systèmes d'angle

Pour pouvoir généraliser tous les raisonnements peu importe le nombre de pôles, on va définir deux systèmes d'angles

Système d'angle mécanique

Système d'angle lié au mouvement réel du rotor.

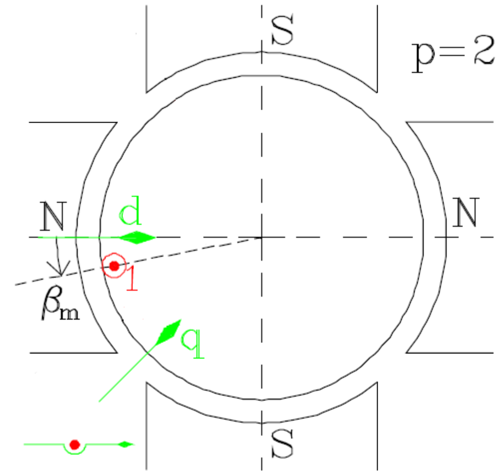
→ Un tour complet du rotor correspond à une rotation de 2π radian mécanique

Système d'angle électrique

Système d'angle lié à la variation du champ magnétique dans l'entrefer.

→ Décrit la périodicité du champ magnétique

→ **Un tour complet du rotor correspond à une rotation de $2\pi p$ radian électrique**



2.1 Machine à vide

Méthode des champs

F.e.m engendrée dans une spire

Spire constituée par un conducteur 1 et 1' :

- β_m : coordonnée angulaire du conducteur d'entrée 1
- $\beta_m - \alpha_m$: coordonnée angulaire du conducteur de sortie 1'

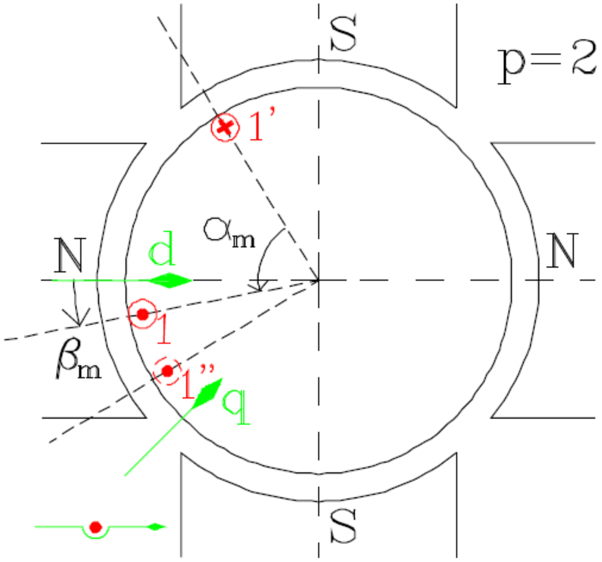
$$
\begin{aligned}
e_{spire} &= B(\beta_m)\, l\, v - B(\beta_m - \alpha_m)\, l\, v \\
&= \big(B(\beta_m) - B(\beta_m - \alpha_m)\big)\, l\, v
\end{aligned}
$$

- Si la spire est diamétrale ($\alpha_m = \frac{\pi}{p}$) :

$$B(\beta_m - \alpha_m) = -B(\beta_m) \qquad \rightarrow \boldsymbol{e_{spire} = 2\, B(\beta_m)\, l\, v}$$

- Si la spire est à pas raccourcis ($\alpha_m < \frac{\pi}{p}$) :

F.e.m engendrée moins élevée (développement donné pour information dans les notes)

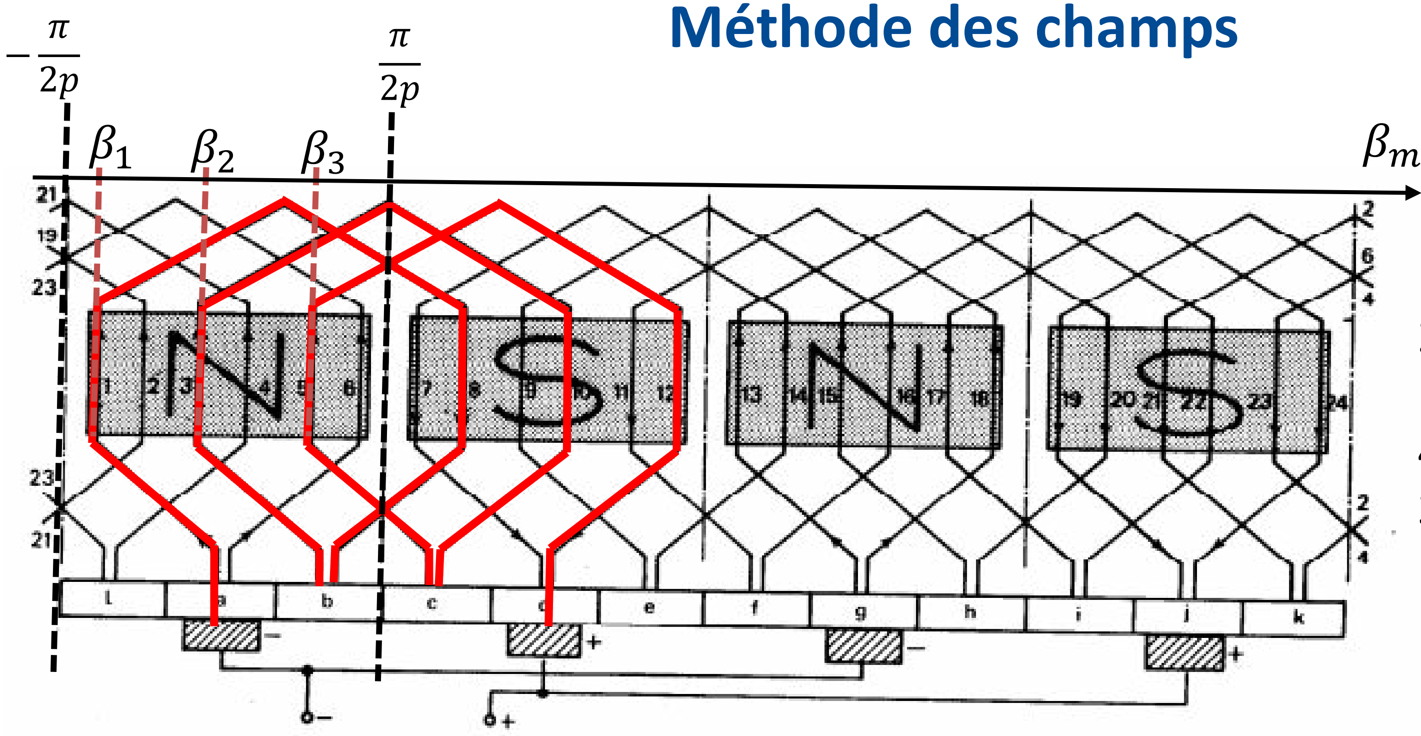


Comment calculer la f.e.m entre deux balais ?

Prenons un cas particulier en exemple

2.1 Machine à vide

Méthode des champs



24 conducteurs
12 spires
4 dérivations
3 spires par dérivations

Tension entre balais = tension aux bornes d'une dérivation = somme des tensions aux bornes des spires :

$$e_{balais\ a\rightarrow d} = 2\,B(\beta_1)\,l\,v + 2\,B(\beta_2)\,l\,v + 2\,B(\beta_3)\,l\,v$$

Même si les conducteurs se trouvent sous les deux pôles (N et S), les spires étant diamétrales, seuls la position des conducteurs d'entrée, se trouvant sous N, nous intéresse.

2.1 Machine à vide

Méthode des champs

F.e.m entre balais

Par définition, la tension entre balais est la tension aux bornes d'une dérivation, qui est la somme (= intégrale si induit infiniment divisé) de la tension aux bornes de toutes les spires de la dérivation

Soit un enroulement imbriqué à spires diamétrales à $2d$ dérivations

- Nombre de spires par dérivation : $\frac{N_s}{2d}$

→ Les conducteurs d'entrée des $\frac{N_s}{2d}$ spires d'une dérivation se trouvent sous un même pôle (angle mécanique $\frac{\pi}{p}$)

→ Densité angulaire de spires : $\frac{\frac{N_s}{2d}}{\frac{\pi}{p}} \frac{spires}{rad\ méca.}$

→ Il suffit d'intégrer sous un pôle la f.e.m aux bornes des spires, multiplié par la densité de spire.

2.1 Machine à vide

Méthode des champs

F.e.m entre balais

$$e = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} e_{spire}.\,densité\ de\ spires$$

$$e = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} [2\,B(\beta_m)\,l\,v\,]\,\frac{pN_s}{2d\pi}\,d\beta_m = \frac{p}{d}N_s\frac{\Omega_r}{\pi}\int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B(\beta_m)\,l\,R\,d\beta_m = \frac{p}{d}N_s\frac{\Omega_r}{\pi}\Phi = \boldsymbol{K\,\Phi\,\Omega_r}$$

Φ: flux utile par pôle

K : constante qui dépend des données de l'enroulement

Formules également valables pour les enroulements ondulés à spires diamétrales

2.1 Machine à vide

Méthode des champs

De manière générale : $\boldsymbol{e = K\,\Phi\,\Omega_r}$

Valable aussi pour un enroulement à spires raccourcies, à condition de changer le K

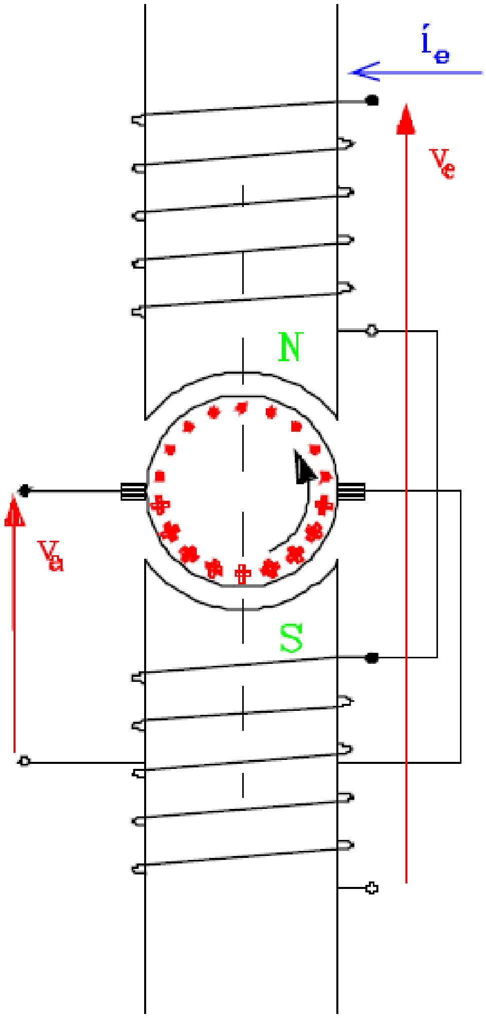
→ La f.e.m. (= la tension à vide) d'une dynamo est proportionnelle au flux utile par pôle et à la vitesse de rotation

Valable pour une machine en charge ($i_a \neq 0$) en considérant la modification du flux utile Φ par le courant d'induit i_a

Essayant maintenant d'utiliser la méthode des circuits pour étudier la dynamo

2.1 Machine à vide

Méthode des circuits



La f.e.m. engendrée dans un conducteur est alternative mais la **f.e.m. engendrée en un point fixe de l'espace est constante**

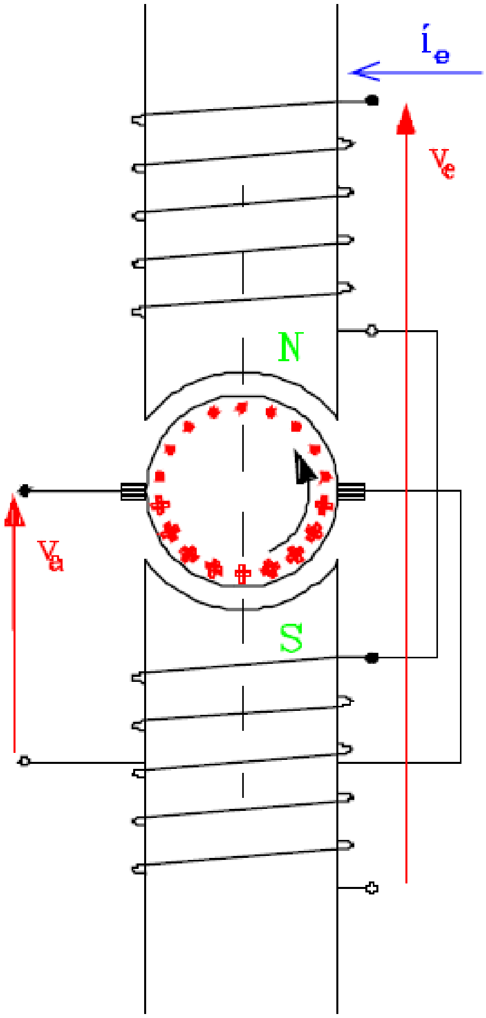
→ tout conducteur se trouvant à un position donnée aura toujours la même f.e.m à ses bornes

Induit : pseudo-stationnaire

On peut utiliser ce principe pour construire un composant équivalent à l'induit

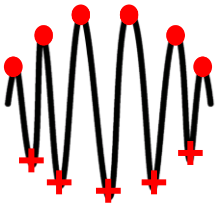
2.1 Machine à vide

Méthode des circuits



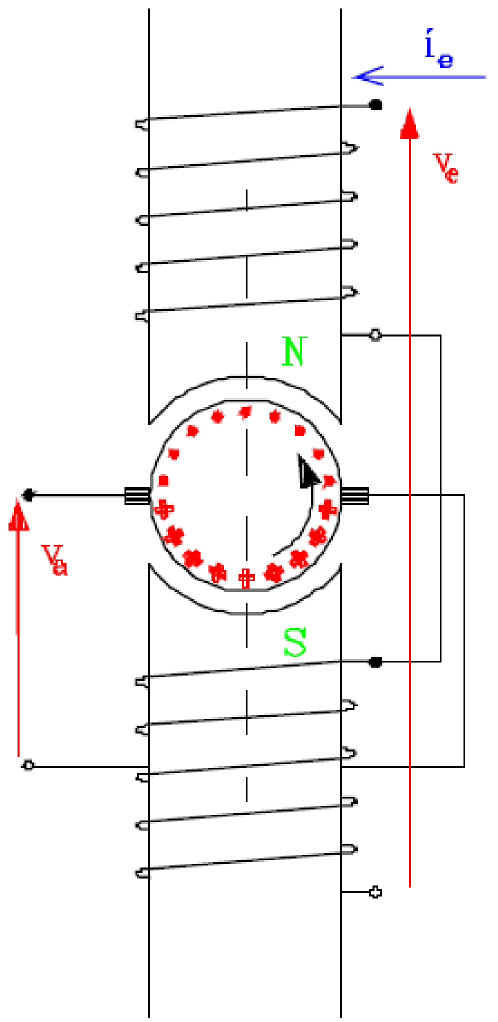
L'induit étant pseudo stationnaire, on peut le représenter par une bobine fixe, reliant les deux balais

→ On a alors un simple couplage mutuel entre l'enroulement d'excitation et d'armature



2.1 Machine à vide

Méthode des circuits



Tension aux bornes des balais

- Enroulement d'excitation parcouru par i_e
- Enroulement d'armature pseudo-stationnaire considéré à vide ($i_a = 0$)

$$v_a = R_a i_a + D\Psi_a$$
$$\rightarrow (v_a)_{i_a=0} = D\Psi_a$$

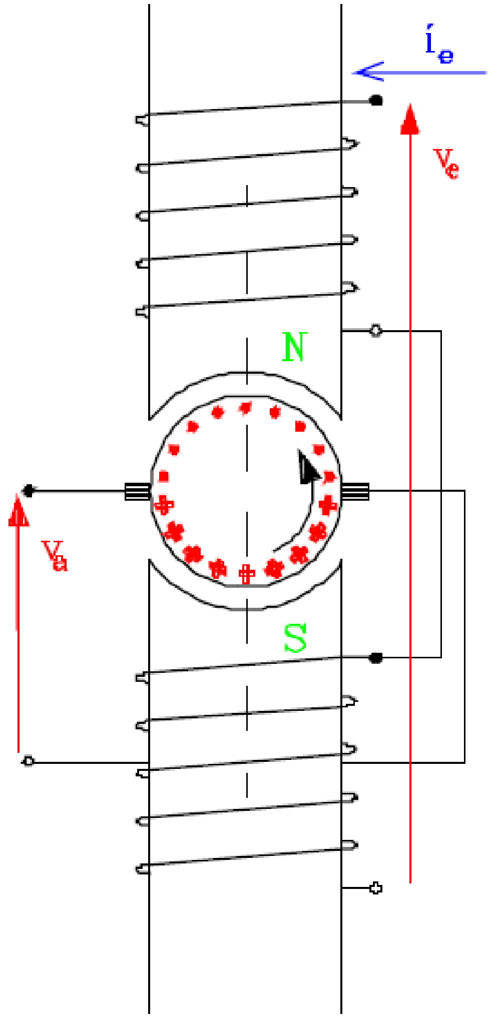
Où $\Psi_a \equiv M(\beta_m, i_e) i_e$

Où $M =$ inductance mutuelle entre les enroulements d'excitation et d'armature :

  - Dépend de l'angle de décalage entre l'axe des pôles et l'axe de l'enroulement réel d'armature
  - Dépend des non-linéarités magnétiques

2.1 Machine à vide

Méthode des circuits



Tension aux bornes des balais

Tension aux bornes des balais :

$$\begin{aligned}(v_a)_{i_a=0} &= D\Psi_a \\ &= D(Mi_e) \\ &= DM\, i_e + M\, Di_e \\ &= \frac{\partial M}{\partial \beta_m} D\beta_m\, i_e + \frac{\partial M}{\partial i_e} Di_e\, i_e + M\, Di_e \\ &= G(\beta_m, i_e)\Omega_r i_e + \left(M + \frac{\partial M}{\partial i_e} i_e\right) Di_e\end{aligned}$$

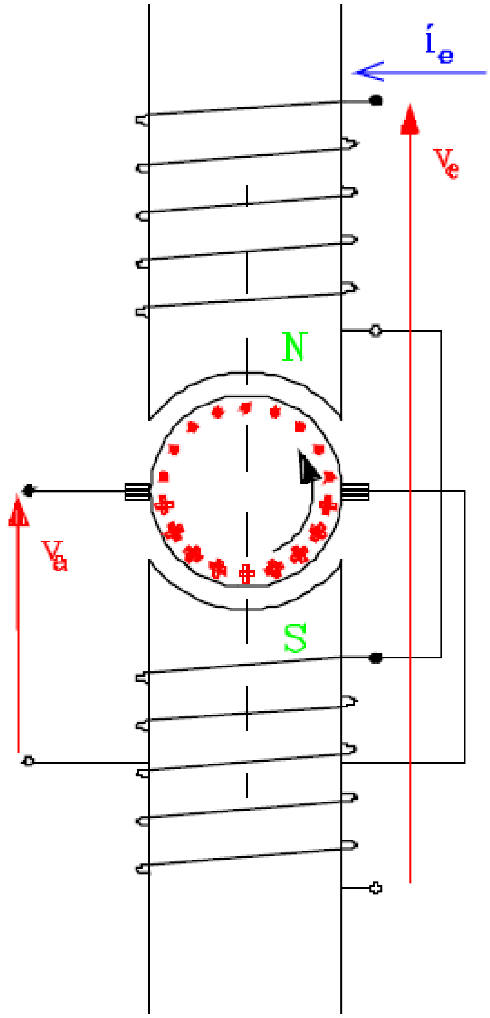
Valeur locale/différentielle de la mutuelle :

$$M' = \left(M + \frac{\partial M}{\partial i_e} i_e\right) = \left(\frac{\partial \Psi_a}{\partial i_e}\right)_{\beta_m = cte}$$

→ nulle si balais sont calés sur l'axe neutre ($\beta = \pi/2$) car enroulements a et e alors « perpendiculaires »

2.1 Machine à vide

Méthode des circuits



Tension aux bornes des balais

On a donc, pour $\beta = \pi/2$ et $i_e = cte$:

Tension aux bornes des balais :

$$(v_a)_{i_a=0} = \frac{\partial M}{\partial \beta_m} D\beta_m\, i_e = G(i_e)\Omega_r i_e$$

Où $G(i_e) = \frac{\partial M(\beta_m, i_e)}{\partial \beta_m} = \frac{1}{i_e}\frac{\partial \Psi_a}{\partial \beta_m}$

$$\Rightarrow \mathrm{e} = (v_a)_{i_a=0} = G(i_e)\; i_e\; \Omega_r$$

Lien avec la méthode des champs :

$$G(i_e)\;\; i_e = K\;\Phi$$

Connaissance de la caractéristique à vide → détermination de G en fonction de i_e

2.1 Machine à vide

Premier schéma équivalent à vide

A l'état stationnaire :

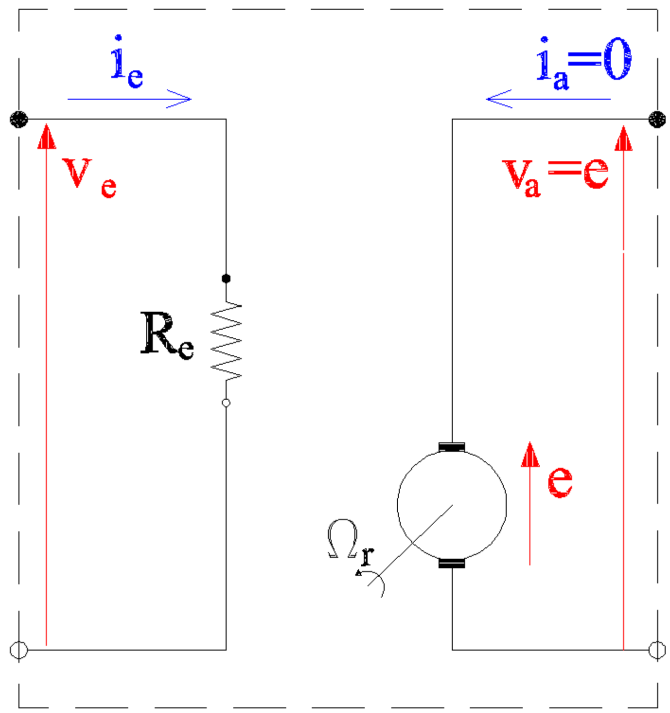
$$\mathbf{e} = (v_a)_{i_a=0} = G(i_e)\, i_e\, \Omega_r = K\, \Omega_r\, \Phi$$

$$v_e = R_e i_e + D\Psi_e = R_e i_e$$

Ces lois nous permettent de trouver le schéma équivalent à vide

Notez que le schéma est donné en convention récepteur :

- i_a positif correspond à une puissance électrique fournie à la machine
  $\longrightarrow$ fonctionnement moteur
- i_a négatif correspond à une puissance électrique fournie par la machine
  $\longrightarrow$ fonctionnement génératrice



Pour trouver le schéma équivalent en charge, il faut étudier l'influence de i_a

2.1 Machine à vide

Effet du décalage des balais ?

Que se passe-t-il si les balais ne sont pas sur les axes neutres ?

Soit des balais décalés de γ_m :

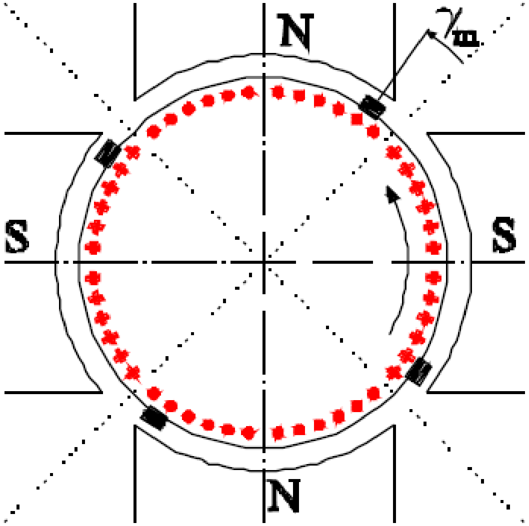
- Méthode des champs :

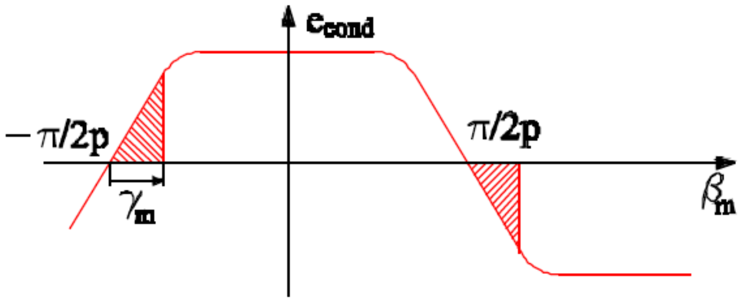
$$e = p \int_{-\frac{\pi}{2p}+\gamma_m}^{\frac{\pi}{2p}+\gamma_m} e_{spire}.densit\acute{e}\ de\ spires$$

- Méthode des circuits :

Effet de mutuelle : M’ non nul

On obtient une tension à vide réduite
⟶ Dans la suite, balais supposes calés sur l’axe neutre





Contenu

2.2 Machine en charge

Intruduction

Quand a-t-on un courant d'armature ?

Fonctionnement en génératrice : si une charge extérieure est connectée aux balais
Fonctionnement en moteur : toujours pour le démarrage et pour contrer les pertes

Quels sont les effets de la circulation d'un courant d'armature ?

- Effet Joule :
  - Résistance de l'enroulement
  - Résistance des balais

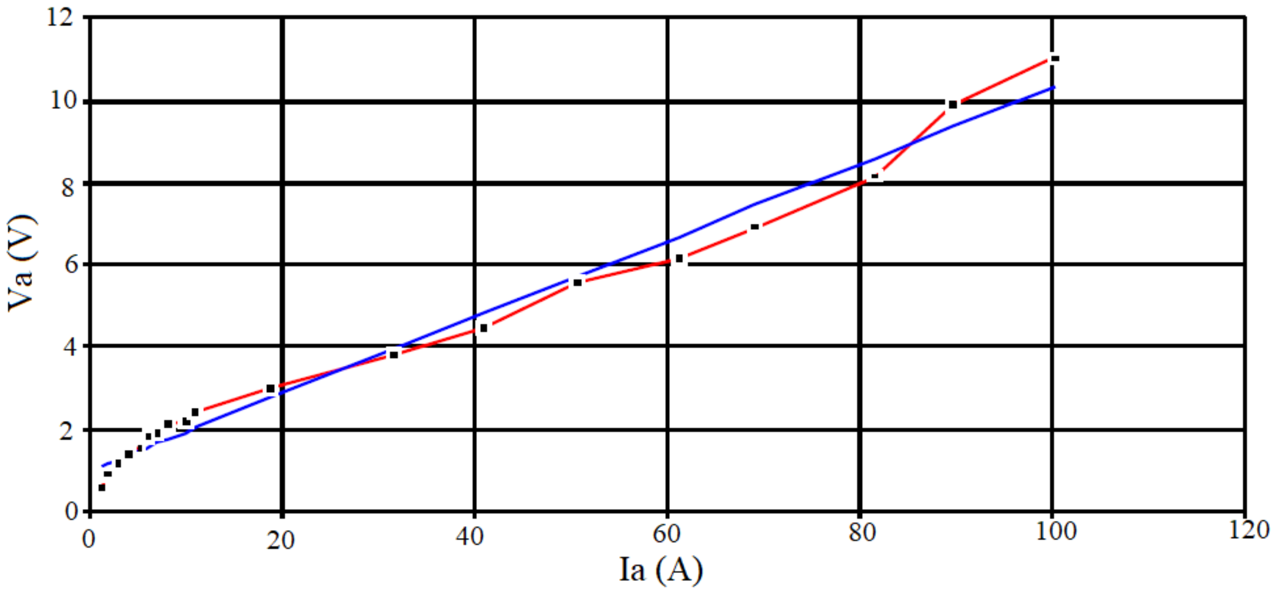
    Varie en général avec le courant (balais en carbone : effet non-linéaire)
  - Résistance du contact balais/collecteur

    Fonction de l'état de la surface du collecteur et des balais, de la vitesse et du sens de rotation, de la pression et de la nature des balais, de la température et du courant
- Réaction d'induit :

  La circulation d'un courant dans l'armature crée un champ d'induction, qui s'ajoute à celui d'excitation, ce qui modifie le flux utile

2.2 Machine en charge

Effet Joule



Relation générale : $\Delta V_{Ra} = \Delta V_b \,\mathrm{sign}(i_a) + R_a i_a$

ΔV_b : chute de tension du contact balais-collecteur

R_a : résistance des enroulements et connexions

Chute de tension dans le contact balais-collecteur :

- ~2V pour les balais au carbone
- ~0,6V pour des balais métalliques

2.2 Machine en charge

Couple électromécanique

Essayons de trouver une expression du couple électromécanique à partir d'un bilan de puissance

Principe de conservation de la puissance (convention récepteur)

$$\left[P_{électrique} - \left(P_{pJoule} + P_{pmagn}\right)\right] + \left[P_{meca} - P_{pméca}\right] = 0$$

Où :

- $P_{pJoule} = P_{pJoule,e} + P_{pJoule,a}$

- Pertes Joule $P_{pJoule,a}$ dans l'armature nulles si $i_a = 0$
- Pertes magnétiques P_{pmagn} présentes même si $i_a = 0$
  Hystérèse et courants de Foucault
  Causées par une variation de l'induction
- Pertes mécaniques $P_{pméca}$
  Frottement (balais sur le collecteur, arbre sur les paliers, air sur le rotor)
  Fonction de la vitesse de rotation

2.2 Machine en charge

Couple électromécanique

Couple électromagnétique

La puissance électromécanique est fournie par le circuit d'armature à l'arbre :

$$P_{em} = P_{électrique} - P_{pJoule,a} = v_a i_a - \Delta V_b i_a - R_a i_a^2 = e\ i_a$$

Par ailleurs :

$$P_{em} = C_{em} \Omega_r$$
$$e = K\ \Phi\ \Omega_r = G\ i_e\ \Omega_r$$

Le couple électromécanique fourni par le circuit d'armature à l'arbre vaut donc :

$$\boldsymbol{C_{em} = K\ \Phi\ i_a = G\ i_e\ i_a}$$

Positif pour un moteur ($i_a > 0$ dans la convention récepteur)

Négatif pour une dynamo ($i_a < 0$ dans la convention récepteur)

Réversibilité de la machine à courant continu (dynamo et moteur)

2.2 Machine en charge

Couple électromécanique

Pour rappel, résumé du fonctionnement en moteur :

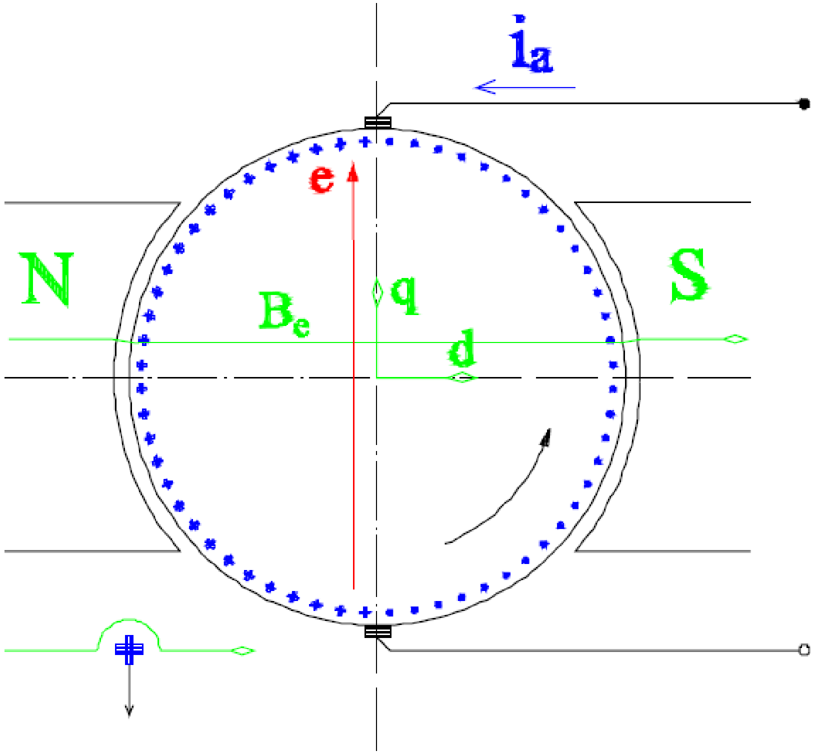
- Initialement à l'arrêt
  - v_a appliquée à l'armature, mais f.e.m. nulles

  → Courant i_a limité que par la résistance d'armature

  → Courant i_a élevé

  → Couple moteur important

- Le couple moteur fait tourner le rotor dans le sens positif
- $\Omega_r \nearrow \Rightarrow$ les f.e.m. $\nearrow$
- F.e.m. opposées aux courants $\Rightarrow i_a \searrow$ jusqu'à l'équilibre



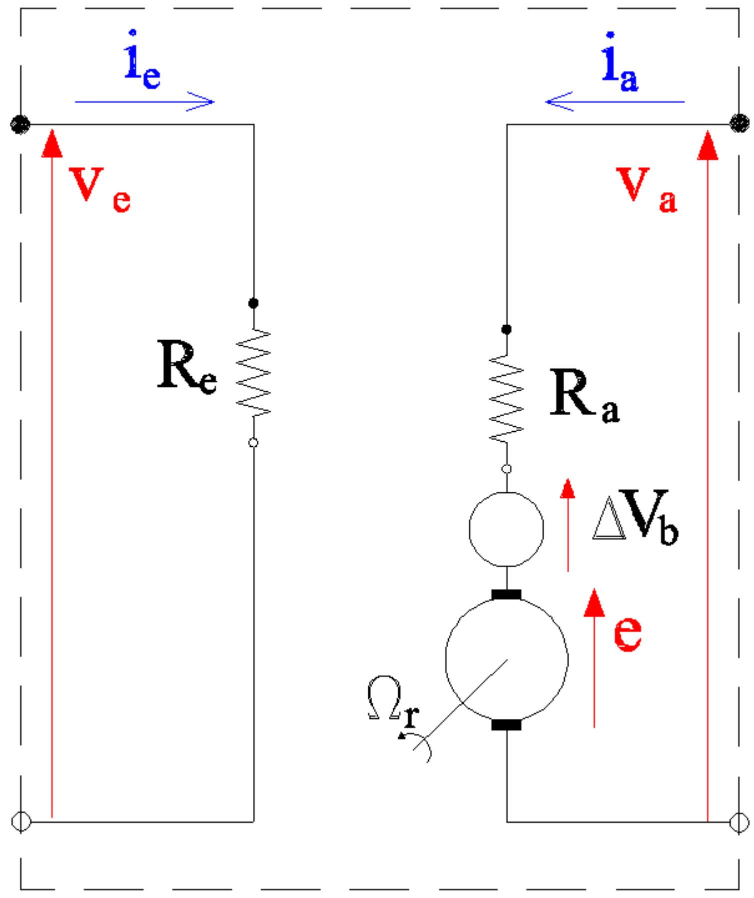
2.2 Machine en charge

Schéma équivalent en charge

Etudier l'influence i_a sur les pertes permet de trouver le schéma équivalent en charge (à l'état stationaire)

R_e : résistance du circuit inducteur
R_a : résistance du circuit d'induit
Ω_r : vitesse de rotation
e : force électromotrice engendrée
$\Delta V_b \, \mathrm{sign}(i_a)$: chute de tension du contact balais-collecteur

Effets inductifs des enroulements pas représentés car courants continus et état stationnaire
→ Mais on devra en tenir compte dans l'étude dynamique

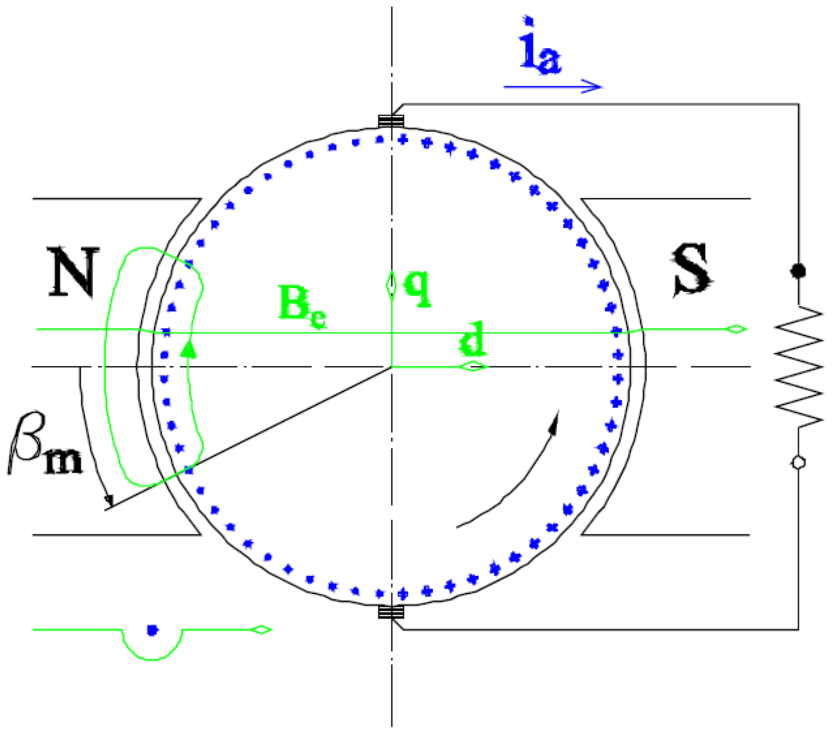


2.2 Machine en charge

Réaction d'induit

Etudions maintenant l'influence de la réaction d'induit dans une génératrice

- Induit supposé infiniment divisé
- Balais sur l'axe neutre
- Génératrice connectée à une charge extérieure
  → courant circulant dans l'induit
- Sens du courant dans l'induit : même que la f.e.m. qui le crée



Effet des courants d'induit :
Création d'un champ magnétique
Flux d'axe perpendiculaire à celui du flux inducteur

2.2 Machine en charge

Réaction d'induit

Calcul du champ magnétique

- Soit une ligne d'induction fermée qui traverse l'entrefer en deux points symétriques par rapport à l'axe des pôles
- Soit $0 < \beta_m < \frac{\pi}{2p}$ l'abscisse angulaire d'un de ces points

A.t. enserrés par une ligne d'induction :

$$\frac{N_c}{2\pi}\frac{i_a}{2d}2\beta_m$$

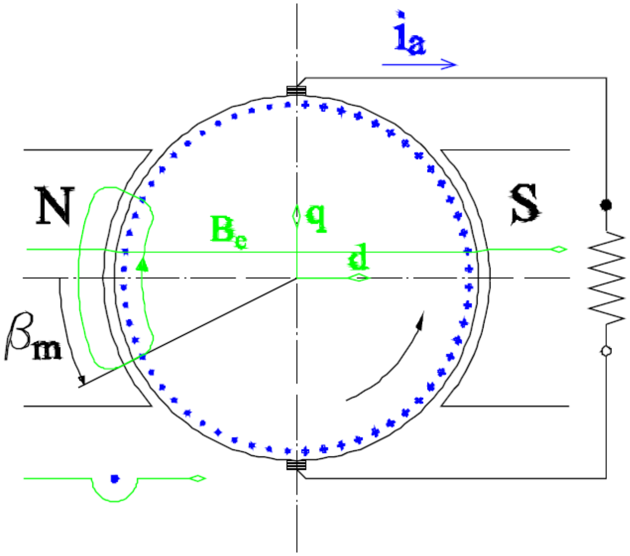
Fer supposé parfait → A.t. concentrés dans l'entrefer

Si entrefer constant de largeur δ, par symétrie :

$$2\delta H(\beta_m) = \frac{N_c}{2\pi}\frac{i_a}{2d}2\beta_m \quad \Leftrightarrow \quad H(\beta_m) = \frac{N_c}{2\pi}\frac{i_a}{2d}\frac{\beta_m}{\delta}$$

Champ magnétique maximal pour $\beta_m = \frac{\pi}{2p}$:

$$H\left(\frac{\pi}{2p}\right) = \frac{N_c}{2\pi}\frac{i_a}{2d}\frac{\pi}{2p\delta} = \frac{N_c}{8\delta}\frac{i_a}{pd} = \frac{N_s}{4\delta}\frac{i_a}{pd}$$



2.2 Machine en charge

Réaction d'induit

Réaction d'induit :

- Correspond au champ magnétique $H(\beta_m) = \frac{N_c}{2\pi}\frac{i_a}{2d}\frac{\beta_m}{\delta}$
- Indépendante de la vitesse de rotation à courant d'armature constant
- Identique à celle que produirait une bobine fixe alignée sur l'axe neutre
- Son axe est transversal (axe q)

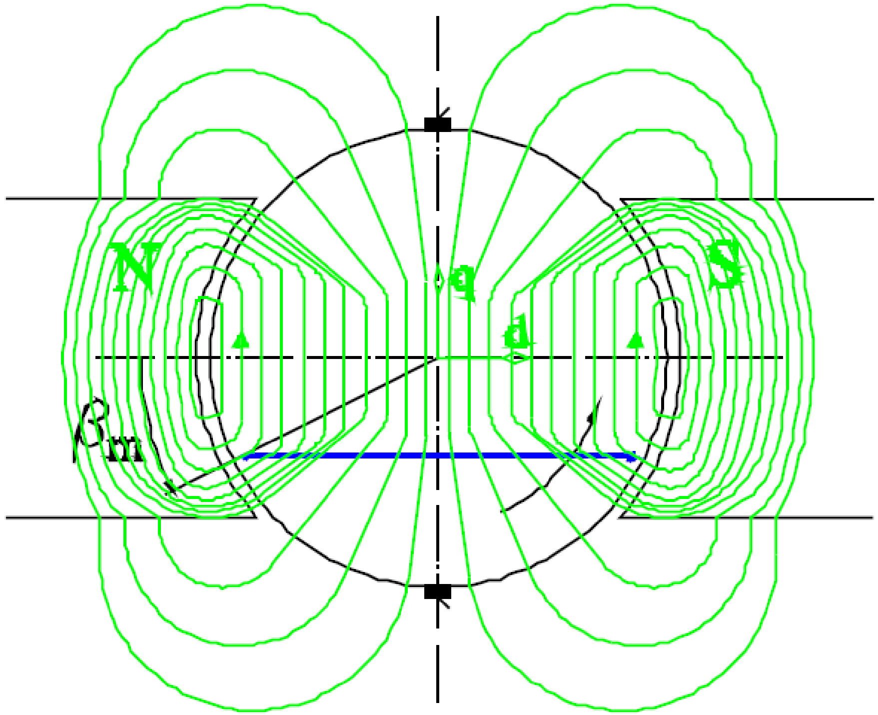
- Positive (= dans le sens de l'axe q) pour une dynamo
- Négative (= dans le sens opposé à l'axe q) pour un moteur

2.2 Machine en charge

Réaction d’induit

Visualisation du champ magnétique de la réaction d’induit

Génératrice, 2 pôles, entrefer variable (pôle saillant) et fer réel (perméabilité finie)



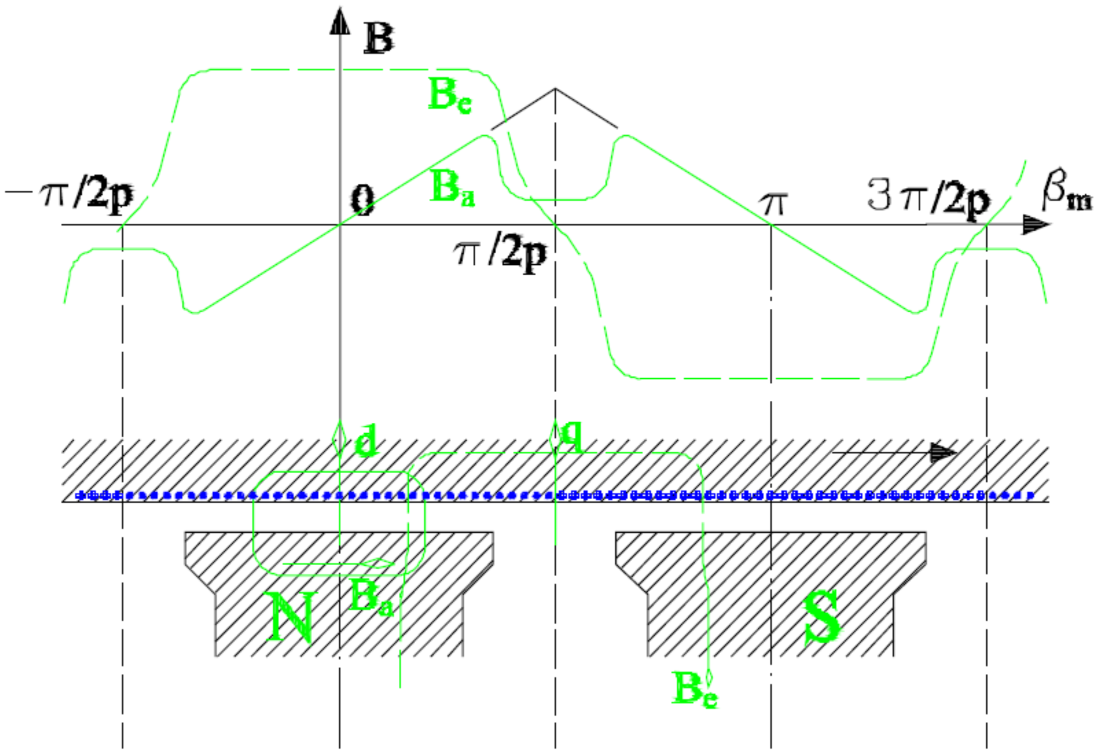
Le schéma serait-il le même pour un fonctionnement en moteur ?

2.2 Machine en charge

Réaction d'induit

Est-ce que ce champ de réaction d'induit a une influence sur le fonctionnement ?

Etudions d'abord sa répartition spatiale dans l'entrefer



B_e : champ d'excitation
→ répartition trapézoïdale

B_a : Champ de réaction d'induit
→ **Non uniforme sous un même pôle, mais son flux par pôle est nul**

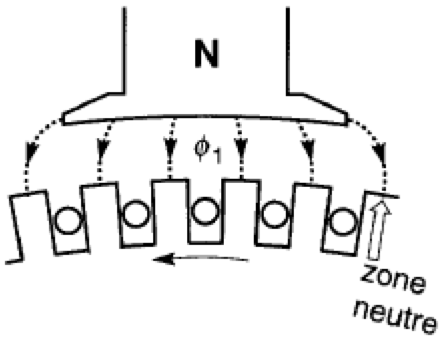
2.2 Machine en charge

Le champ résultant

Visualisation intuitive du champ résultant pour une génératrice

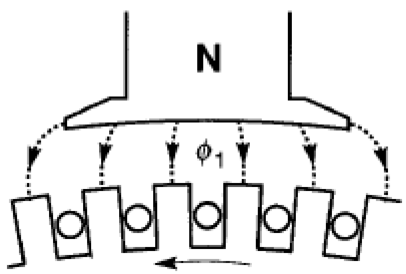
Champ d'excitation

$i_a = 0$



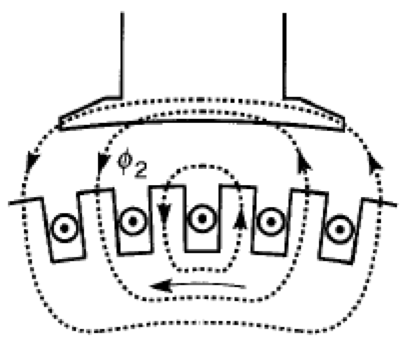
$i_a \neq 0$

Champ d'excitation



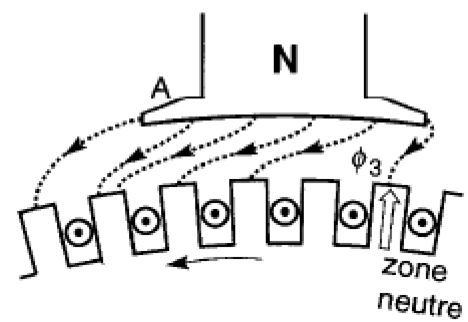
+

Champ d'induit



=

Champ résultant

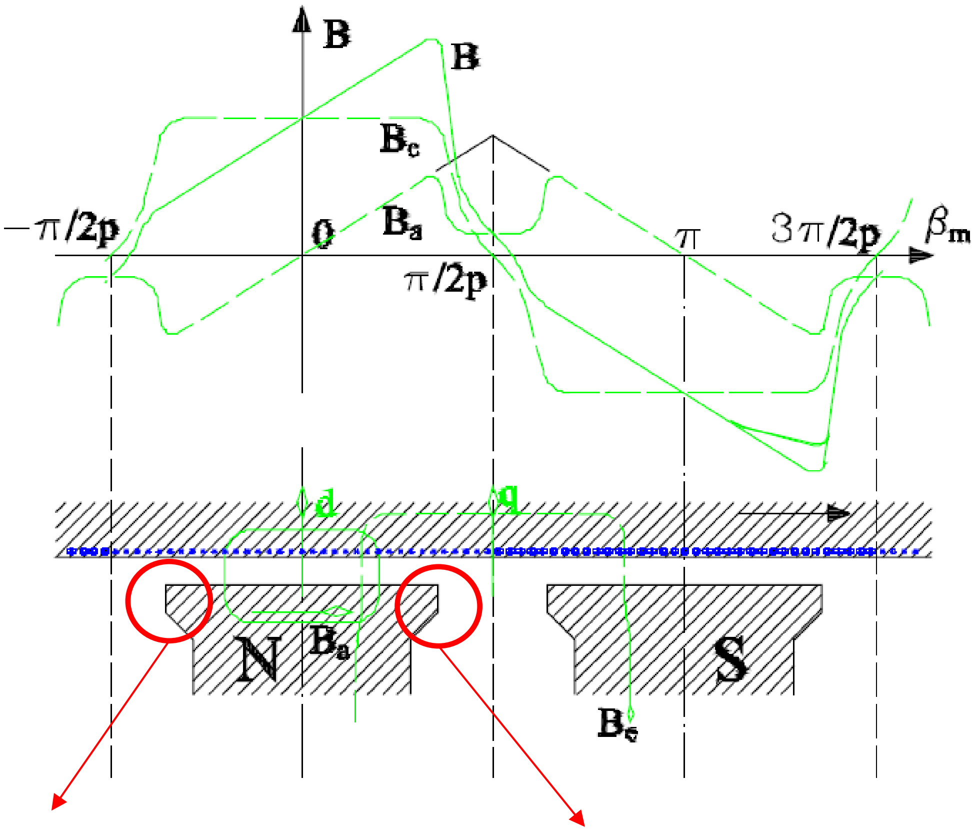


On a un déplacement de la zone neutre

2.2 Machine en charge

Le champ résultant

Sans saturation : principe de superposition applicable



Corne polaire d'entrée

Corne polaire de sortie

B_e : champ d'excitation
→ répartition trapézoïdale

B_a : Champ de réaction d'induit
→ Non uniforme sous un même pôle, mais son flux par pôle est nul

B: Champ résultant
→ Plus faible sous la corne polaire d'entrée, plus élevé sous la corne polaire de sortie

2.2 Machine en charge

Le champ résultant

Sans saturation (principe de superposition applicable)

- La ligne neutre magnétique ($B = 0$) s'est déplacée
- Par endroit, B a augmenté par rapport à sa valeur à vide
  - Augmentation de la tension aux bornes de certaines spires
  - Risque de claquage entre lames du collecteur

Mais le flux par pôle n'a pas changé → la f.e.m. en charge est la même qu'à vide

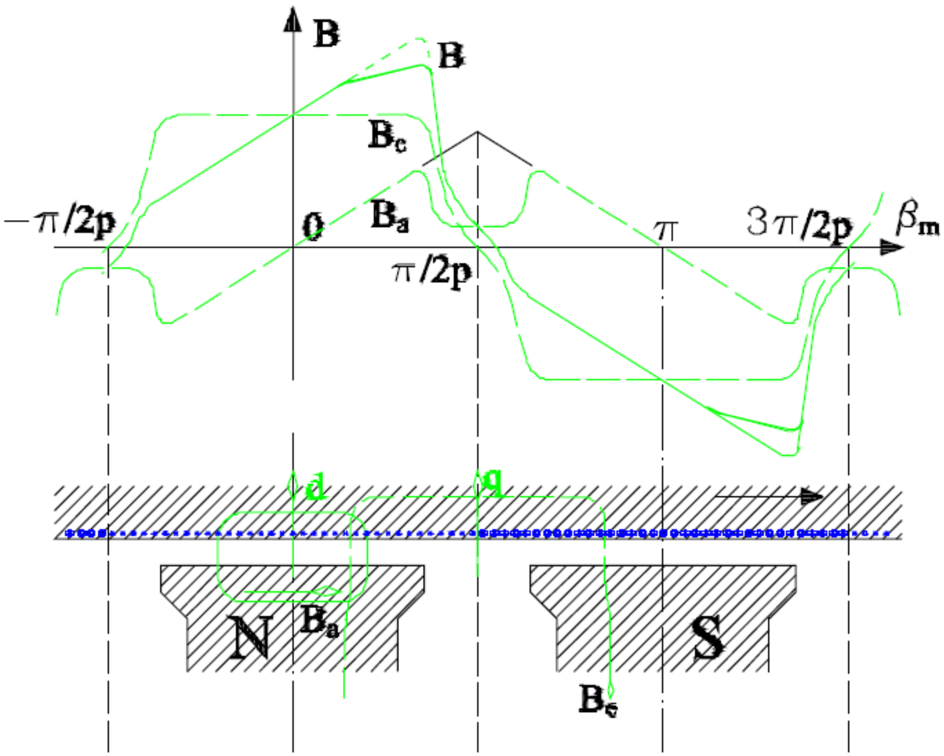
- Réaction d'induit dans une dynamo :
  - Démagnétisante sous la corne polaire d'entrée
  - Magnétisante sous la corne polaire de sortie

Est-ce que ce sera la même chose dans un moteur ?

2.2 Machine en charge

Le champ résultant

Avec saturation : principe de superposition n'est plus applicable



B_e : champ d'excitation
→ répartition trapézoïdale

B_a : Champ de réaction d'induit
→ Non uniforme sous un même pôle, mais son flux par pôle est nul

B: Champ résultant

2.2 Machine en charge

Le champ résultant

Avec saturation (principe de superposition n'est plus applicable)

→ L'induction en charge est inférieure à la somme des inductions dues à l'excitation et à la réaction d'induit
→ Le flux longitudinal en charge est inférieur à sa valeur à vide pour le même courant d'excitation
→ f.e.m. engendrée plus faible (e' au lieu de e)

Cette baisse de f.e.m engendrée est modélisée par un courant d'excitation « résultant » i_e' :

$$i_e' = i_e - i_{eri}$$

i_e' = courant d'excitation qui, à vide, donnerait la f.e.m. e'

2.2 Machine en charge

Réaction d’induit – génératrice VS moteur

Génératrice

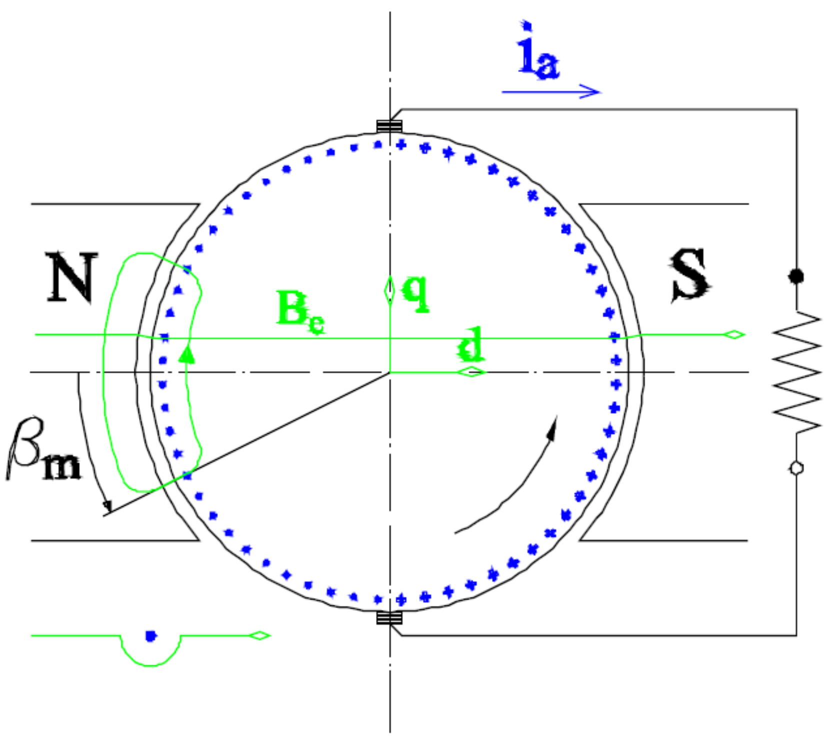
Champ résultant :

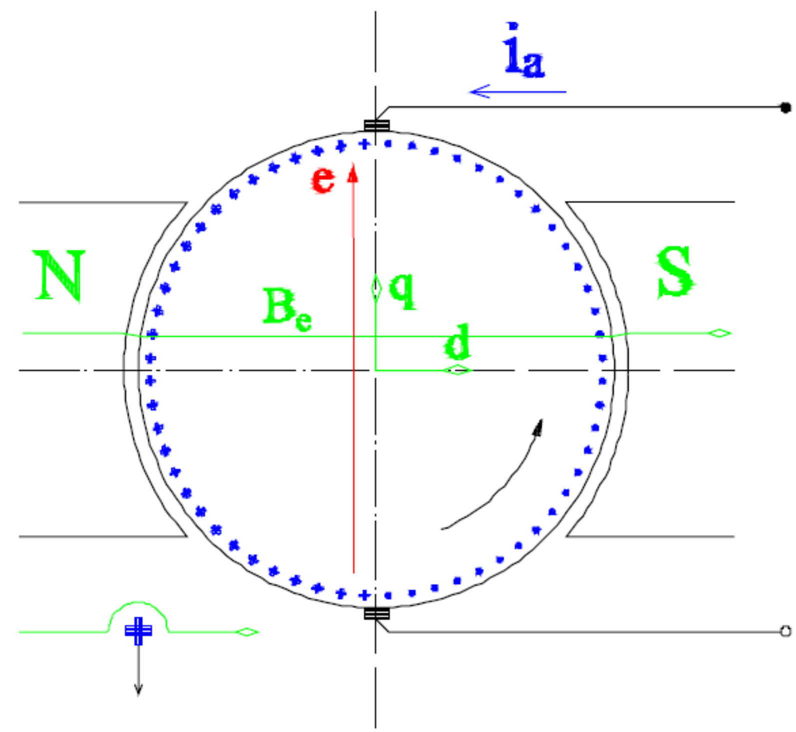
- Plus faible sous la corne polaire d’entrée
- Plus élevé sous la corne polaire de sortie

Moteur

Champ résultant :

- Plus élevé sous la corne polaire d’entrée
- Plus faible sous la corne polaire de sortie





2.2 Machine en charge

Inconvénients de la réaction d’induit et remèdes

Inconvénients

- Déplacement de la ligne neutre magnétique ($B = 0$) → commutation plus difficile
- Augmentation de l’induction → risque d’un claquage entre les lames du collecteur

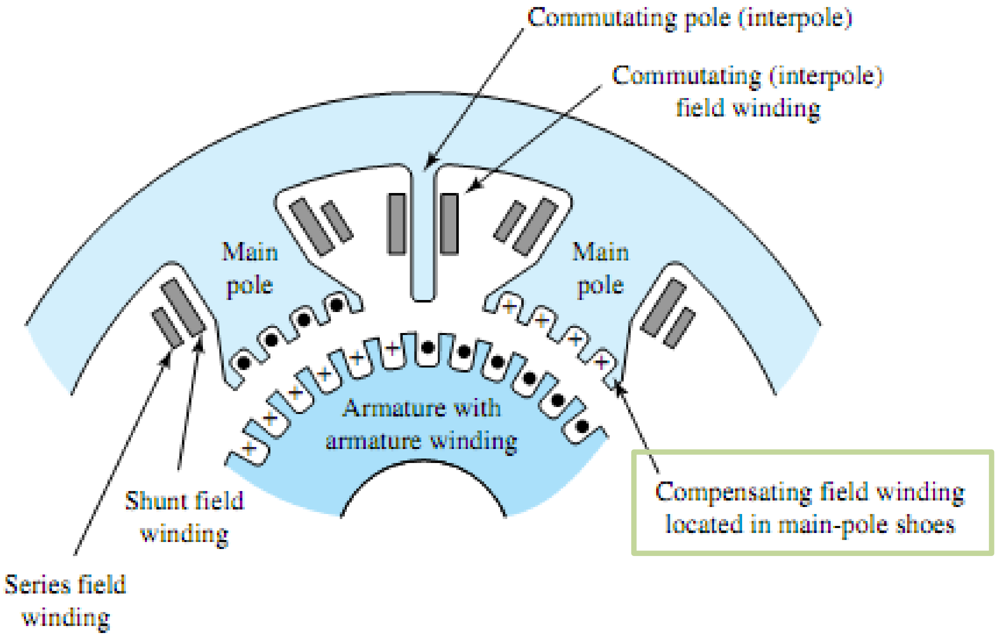
Remèdes

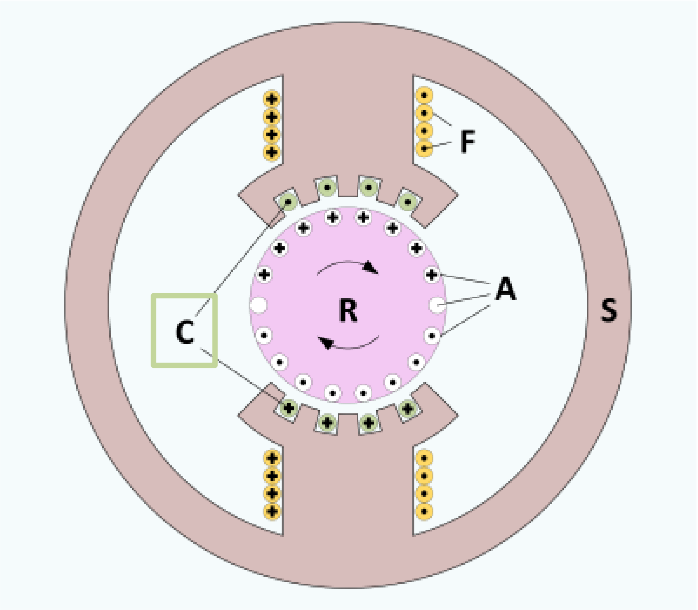
- **Enroulement de compensation** pour compenser l’action de l’armature
  → Enroulement d’axe transversal distribué dans des encoches situées sur les pièces polaires parcouru par le courant i_a
- Augmentation de la réluctance du flux d’axe transversal sans modifier trop le flux principal (longitudinal) grâce à une fente dans le pôle

2.2 Machine en charge

Inconvénients de la réaction d'induit et remèdes

Enroulement de compensation



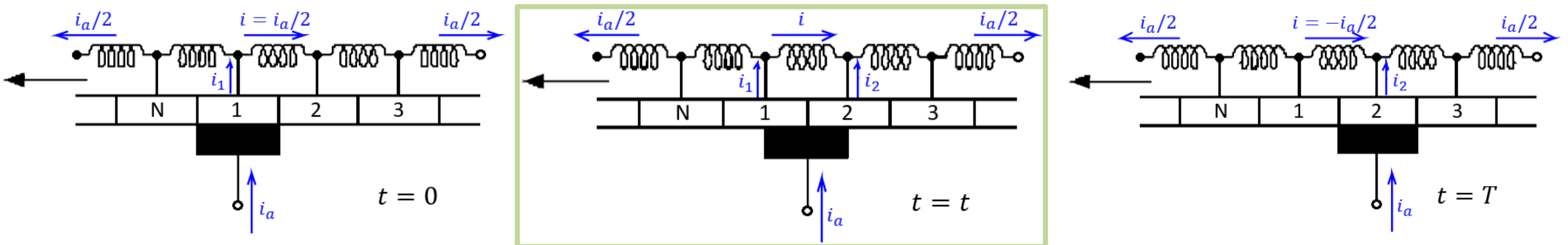


2.2 Machine en charge

Commutation

Commutation

Ensemble des phénomènes accompagnant le renversement du sens du courant des conducteurs d’induit lorsqu’ils passent dans la zone où ils sont court-circuités par les balais appliqués sur le collecteur



Variation brusque du courant
→ surtension très élevée (effet inductif)

→ Production d’étincelle possible
→ Rupture possible de l’isolation

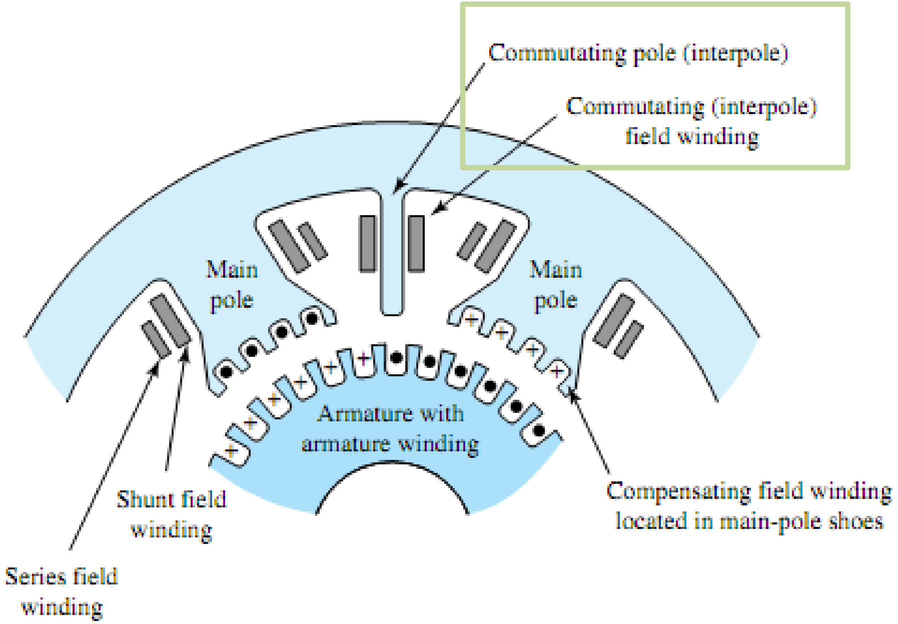
Analyse générale du phénomène électrique donnée en annexe à titre informatif
(avec hypothèses simplificatrices)

2.2 Machine en charge

Commutation

Remèdes

- Création d'une f.e.m. opposée à la f.e.m. induite par le flux total dans les spires qui commutent
- Flux d'axe neutre (axe transversal) dont le sens est opposé à la réaction d'induit, créé par des **pôles auxiliaires de commutation** (parcourus par un courant i_a)

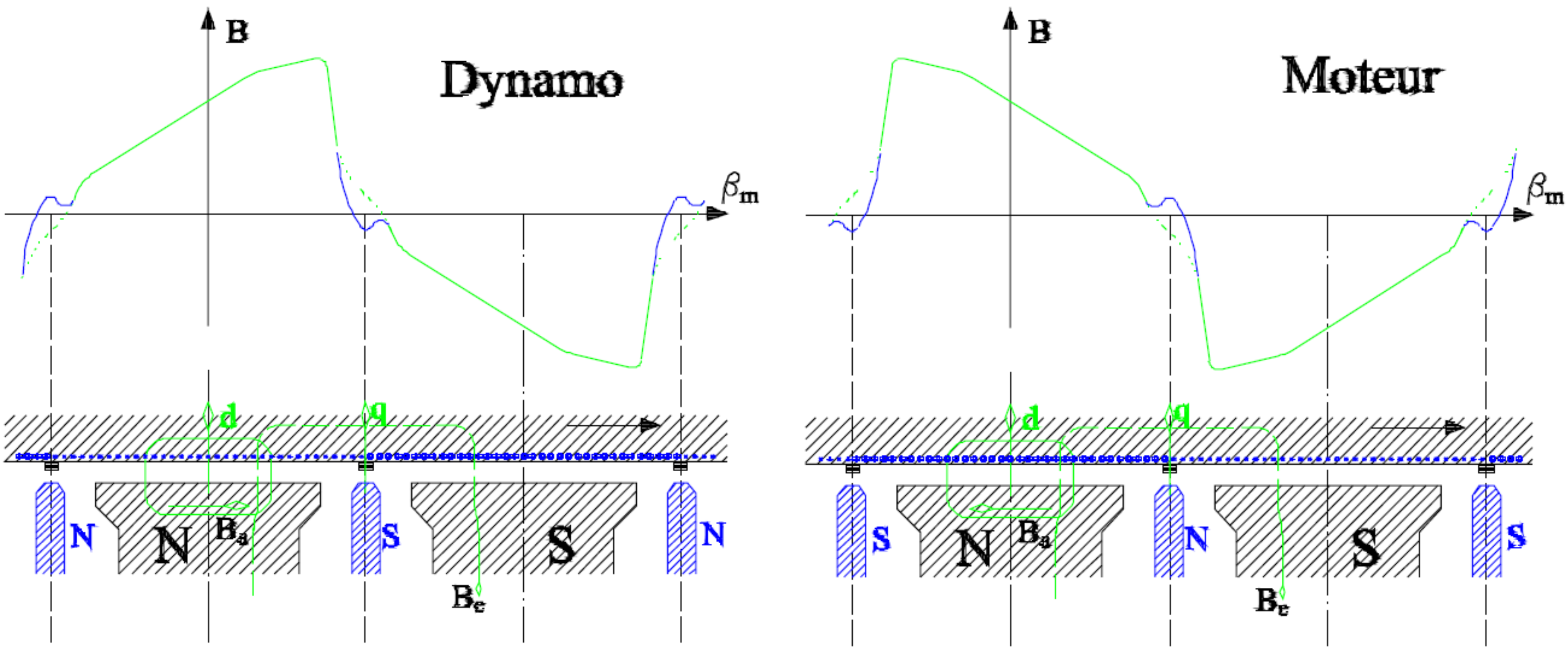


2.2 Machine en charge

Commutation

Pôles de commutation

- Dynamo : pôles de commutation toujours du signe du pôle qui les suit immédiatement dans le sens de rotation de la machine
- Moteur : contraire



Contenu

2.3 Dynamique

Modèles linéaires et schéma équivalents en charge

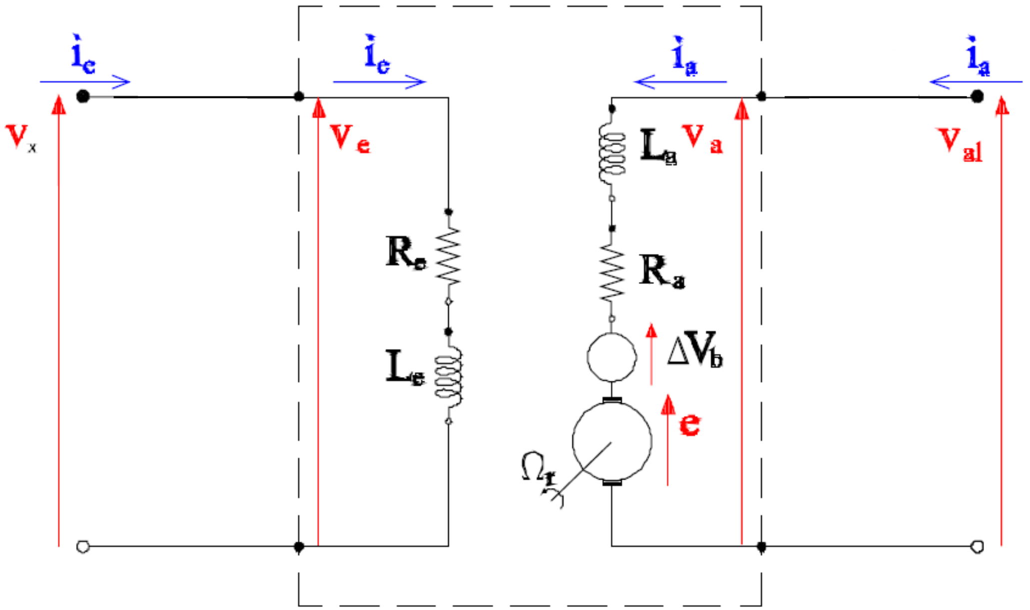
Soit le schéma équivalent en charge

→ Plus en statique : présence d'inductance

→ Toujours convention moteur

- R_e : résistance du circuit inducteur
- L_e : inductance du circuit inducteur
- R_a : résistance du circuit d'induit
- L_a : inductance du circuit d'induit

- Ω_r : vitesse de rotation
- e : force électromotrice engendrée ($e = G i_e \Omega_r$)
- ΔV_b sign(i_a) : chute de tension du contact balais-collecteur

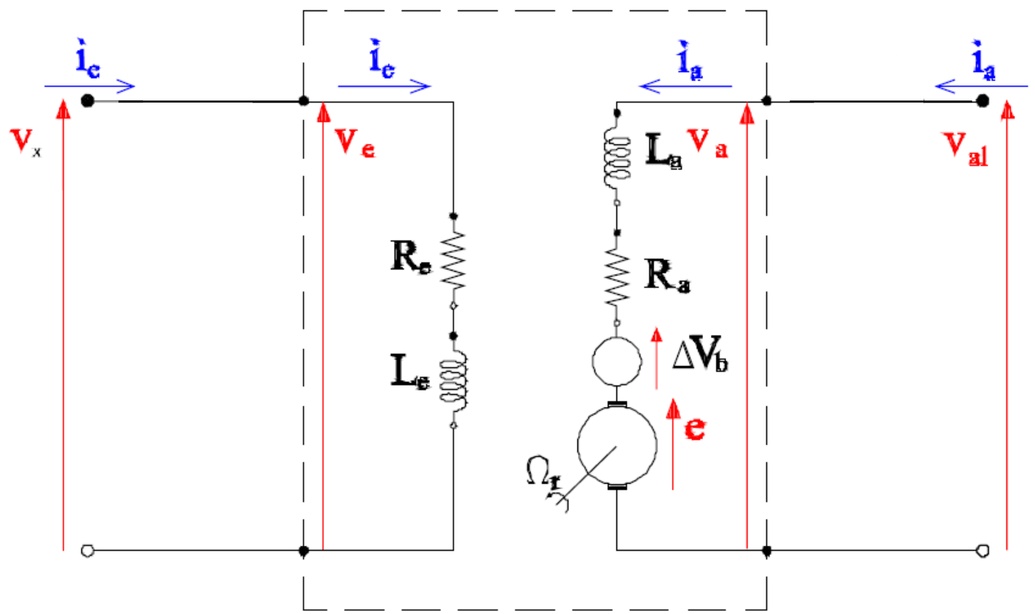


2.3 Dynamique

Modèles <u>linéaires</u> et schéma équivalents en charge

Equations

- Circuit d'excitation : $v_x = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt}$
- Circuit d'armature : $v_{al} = e + \Delta V_b \operatorname{sign}(i_a) + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$
- F.e.m. : $e = K\,\Phi\,\Omega_r = G\,i_e\,\Omega_r$



2.3 Dynamique

Modèles linéaires et schéma équivalents en charge

Equations

- Équation du mouvement :

$$J\frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} + C_r$$

Où :

- $C_{em} = K\,\Phi\,i_a = G\,i_e\,i_a$ et $-C_r = -C + C_{pméca} + C_{pmagn}$
- J : moment d'inertie de l'ensemble moteur+charge
- C_{em} : couple électromécanique appliqué par le moteur à l'arbre
- C : couple mécanique net appliqué par la charge à l'arbre ($C < 0$ en fonctionnement moteur)
- C_r : couple résistant total, dû à la charge et aux pertes (mécaniques et magnétiques)

2.3 Dynamique

Modèles <u>linéaires</u> et schéma équivalents en charge

Système canonique d'équations différentielles

Circuit d'excitation

$$Di_e = \frac{1}{L_e}[v_x - R_e i_e]$$

Circuit d'armature

$$Di_a = \frac{1}{L_a}[v_{al} - \Delta V_b \,\mathrm{sign}(i_a) - G\, i_e\, \Omega_r - R_a i_a]$$

Equation du mouvement

$$D\Omega_r = \frac{1}{J}[G\, i_e\, i_a - C_r(\Omega_r)]$$

Contenu

1. Description générale
2. Equations générales et circuits équivalents
3. Courbes caractéristiques, démarrage et freinage
    1. Différents types de machine
    2. Courbes caractéristiques des génératrices
    3. Courbes caractéristiques des moteurs
    4. Réglage de la vitesse
    5. Démarrage et freinage
    6. Rendement
4. Machines particulières

3.1 Différents types de machine

Machine à excitation indépendante

Machine dont le courant d'excitation est fourni par une source indépendante
→ Ce sont les machines qu'on a utilisé jusqu'à présent

Machine à excitation dérivée ou shunt

L'enroulement d'excitation est branché en parallèle de l'enroulement d'armature

- En moteur, le courant est fourni par la source extérieure
- En dynamo, le courant est fourni par le circuit d'armature

Machine à excitation en série

L'enroulement d'excitation est branché en série avec l'enroulement d'armature.

- En moteur, le courant est fourni par la source extérieure.
- En dynamo, le courant est fourni par le circuit d'armature.

3.1 Différents types de machine

Machine à excitation composée ou compound

L'enroulement d'excitation comporte deux bobinages :

- un enroulement en série, branché en série avec l'armature
- un enroulement en dérivation (shunt), branché en parallèle avec l'armature

→ Le champ magnétique total résulte de la somme des deux flux produits par les enroulements série et shunt.

L'objectif est de déterminer, pour ces 4 types de machines, les caractéristiques en **génératrice** et en **moteur**
→ Trouver, grâce aux équations générales et aux circuits équivalents, comment varient les grandeurs caractéristiques des machines et comment les contrôler

Contenu

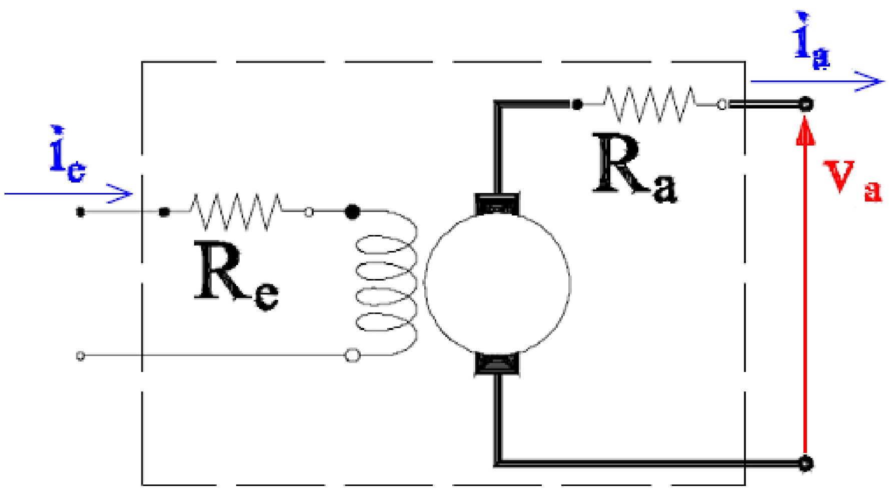
1. Description générale
2. Equations générales et circuits équivalents
3. Courbes caractéristiques, démarrage et freinage
    1. Différents types de machine
    2. Courbes caractéristiques des génératrices
    3. Courbes caractéristiques des moteurs
    4. Réglage de la vitesse
    5. Démarrage et freinage
    6. Rendement
4. Machines particulières

3.2 Courbes caractéristiques des génératrices

Courbes caractéristiques d'une génératrice (tracées à $\Omega_r = cte$) :

- $v_a = f(i_e)$: caractéristique à vide ($i_a = 0$) ou en charge ($i_a \neq 0$)
- $v_a = f(i_a)$ à $i_e = cte$: caractéristique externe
- $i_e = f(i_a)$ à $v_a = cte$: caractéristique de régulation

Nous allons uniquement nous intéresser à la **caractéristique à vide et en charge**, pour une **machine à excitation indépendante**.



On adopte la convention générateur dans le schéma équivalent

3.1 Courbes caractéristiques des génératrices

Caractéristique à vide $v_a = e = f(i_e)$

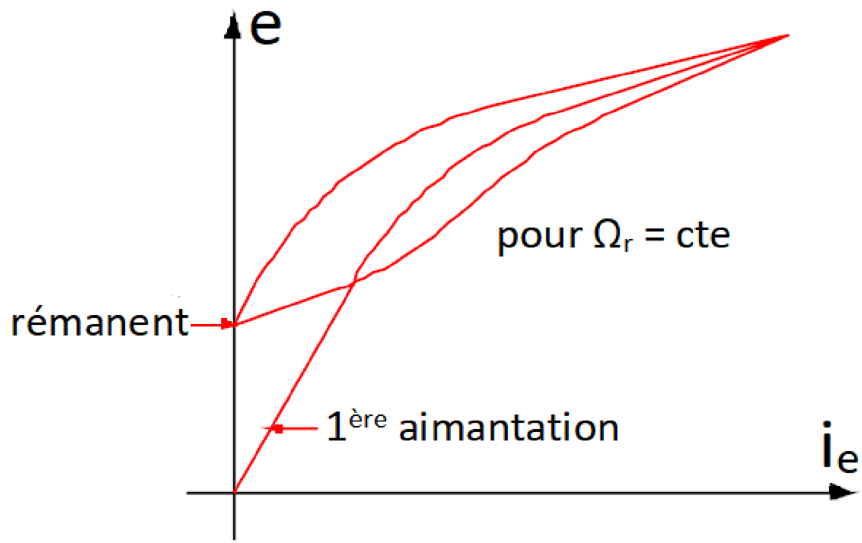
Nous avons déjà trouver la relation qui nous permet de tracer cette courbe :

$$e = K\,\Phi\,\Omega_r = K\Omega_r\,\Phi(i_e)$$

$\Phi(i_e)$ est une relation non linéaire (relation B-H non linéaire dans le fer) :

- Courbe de première aimantation
- Cycles d'hystérèse
- Tension rémanente

→ La courbe dépend de l'état du matériau ferromagnétique



→ On décide de négliger le rémanent, et de toujours travailler en première aimantation

3.2 Courbes caractéristiques des génératrices

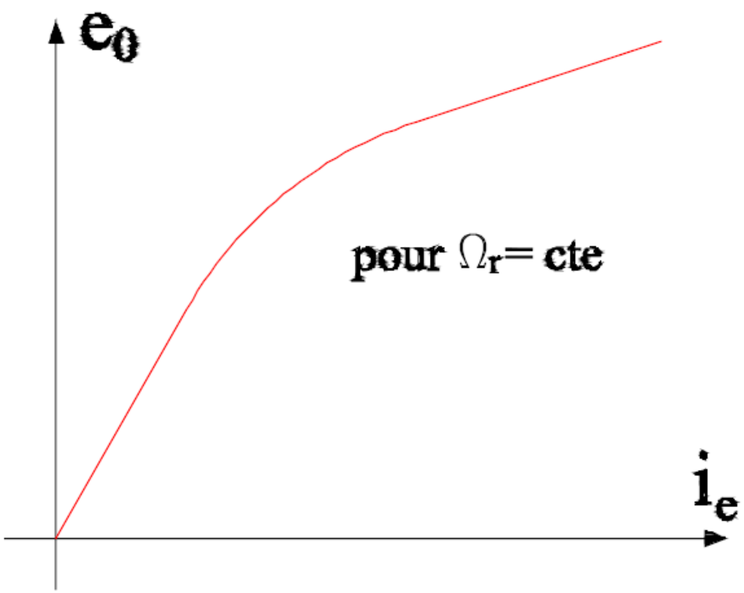
Caractéristique à vide $\boldsymbol{v_a = e = f(i_e)}$

→ On décide de négliger le rémanent, et de toujours travailler en première aimantation

Caractéristiques à vide pour deux valeurs différentes de $\boldsymbol{\Omega_r}$?

- Courbes semblables :
  Les f.e.m. obtenues pour une même valeur de i_e sont dans le rapport des vitesses :

$$\frac{e_{01}}{e_{02}} = \frac{K\ \Phi(i_e)\ \Omega_{r1}}{K\ \Phi(i_e)\ \Omega_{r2}} = \frac{\Omega_{r1}}{\Omega_{r2}}$$



Notez que cette courbe est souvent relevée expérimentalement
Ce relevé à Ω_r constante permet de déterminer la relation $K\Phi$ en fonction de i_e

3.2 Courbes caractéristiques des génératrices

Caractéristique en charge $\boldsymbol{v_a = f(i_e)}$

Tensions aux bornes de la machine : $v_a = e - R_a i_a - \Delta V_b$

- Avec $i_a \neq 0$, on a des pertes dans le circuit d'armature :
  - Chute de tension $R_a i_a + \Delta V_b$

  → **La courbe à vide subit une translation verticale de $\boldsymbol{-R_a i_a - \Delta V_b}$**

- Avec $i_a \neq 0$, on a une réaction d'induit :
  - Avec saturation (toujours le cas dans les machines modernes) :

  Réaction démagnétisante de l'induit
  Pour rappel, cette baisse de f.e.m engendrée est modélisée par un courant d'excitation « résultant » $i_e' < i_e$:

$$i_e' = i_e - i_{eri}$$

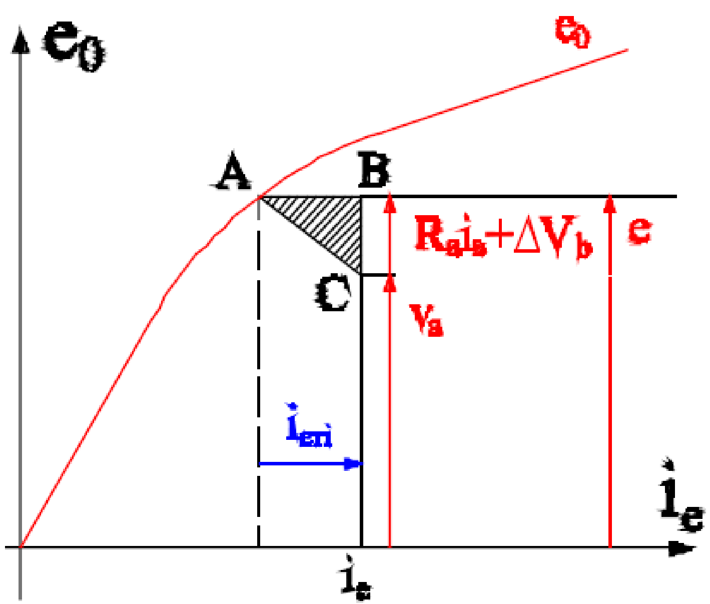
  → **La courbe à vide subit une translation horizontale de $\boldsymbol{i_{eri}}$**
  (on suppose i_{eri} cst pour i_a cst)

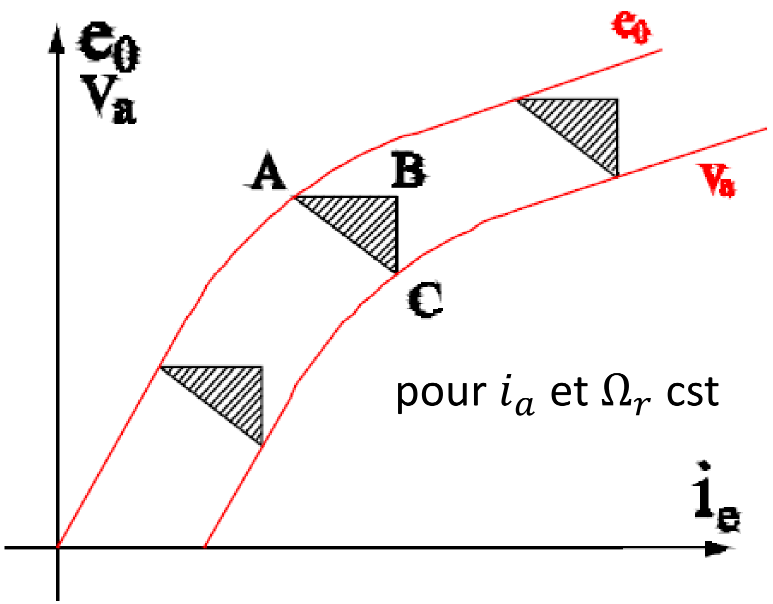
3.2 Courbes caractéristiques des génératrices

Caractéristique en charge $v_a = f(i_e)$

- Avec $i_a \neq 0$, on a des pertes dans le circuit d'armature :
  → **La courbe à vide subit une translation verticale de $-R_a i_a - \Delta V_b$**

- Avec $i_a \neq 0$, on a une réaction d'induit :
  → **La courbe à vide subit une translation horizontale de i_{eri}**



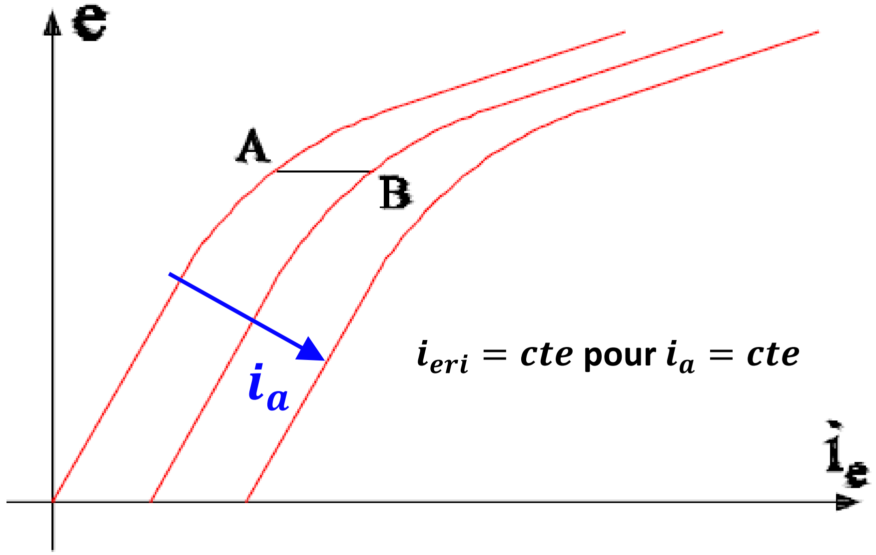


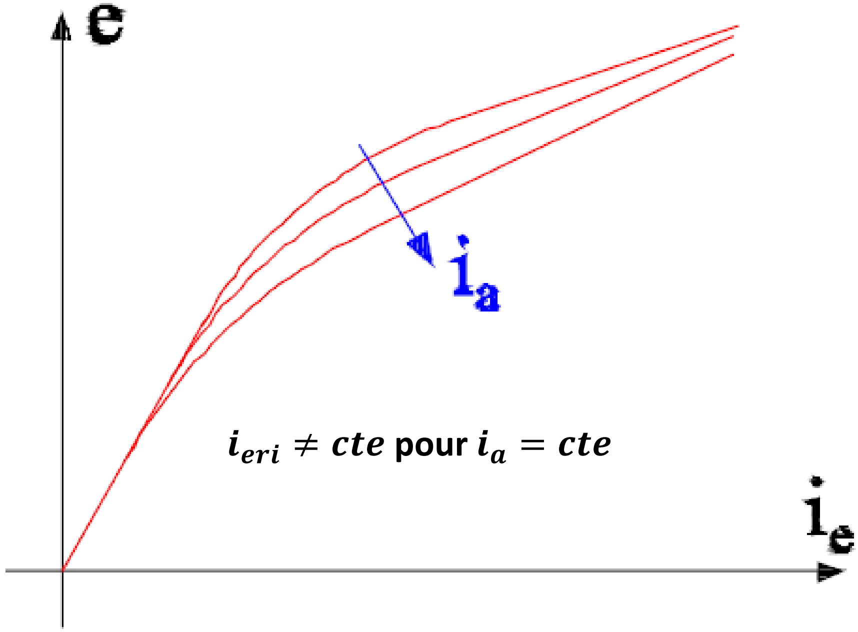
3.2 Courbes caractéristiques des génératrices

Caractéristique en charge $v_a = f(i_e)$

En réalité $i_{eri} \neq cte$ pour $i_a = cte$

→ La courbe n’est pas seulement translatée quand i_a augmente, mais déformée





Contenu

3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Courbes caractéristiques d'un moteur :

- $\Omega_r = f(i_e)$ à $i_a = 0$: caractéristique à vide
- $\Omega_r = f(i_a)$ à $i_e = cte$ et $v_a = cte$: caractéristique en charge
- $-C = f(i_a)$ à $i_e = cte$ et $v_a = cte$: caractéristique en charge
- $-C = f(\Omega_r)$ à $i_e = cte$ et $v_a = cte$: caractéristique mécanique

Nous allons nous intéresser à la **toute ces courbes** pour une **machine à excitation indépendante**.
Nous verrons ensuite plus en détails certaines courbes pour d'autres machines.

Conventions moteur

- Courant i_a : $i_a > 0$ lorsqu'il est consommé par le moteur
- Couple moteur : couple net appliqué à la charge $-C$
  - $-C > 0$ en fonctionnement moteur
  - $-C = C_{em} - C_{pméca} - C_{pmagn}$

Note : les caractéristiques tracées décriront néanmoins aussi le fonctionnement en génératrice car les machines sont réversibles

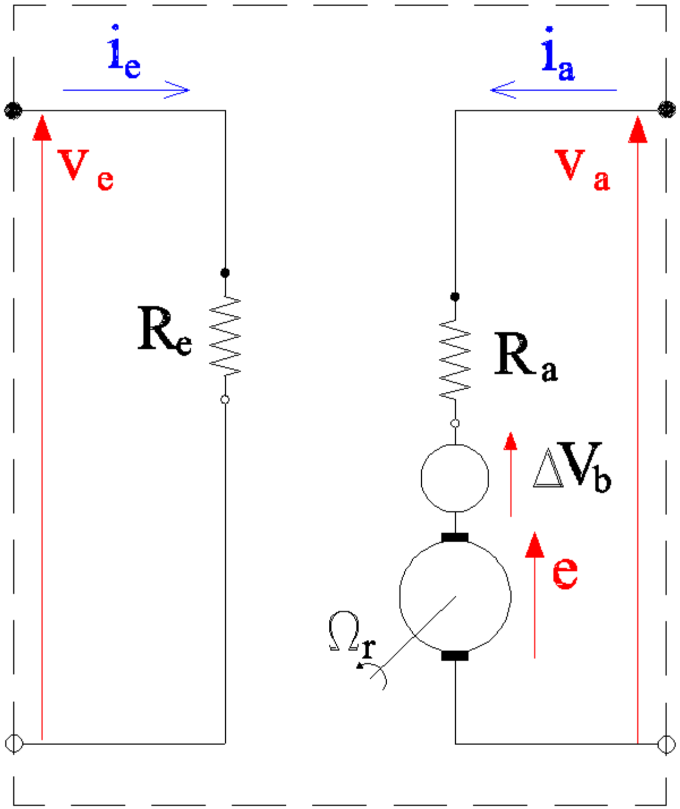
3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique à vide en moteur $\Omega_r = f(i_e)$

Soient
- $v_a = constante$
- $R_a = constante$

Supposons connue la caractéristique à vide en génératrice relevée à la vitesse de référence Ω_g :

$$e_{0g} = f(i_e)$$



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique à vide en moteur $\Omega_r = f(i_e)$

Caractéristique à vide en moteur

À vide, le couple électromécanique sert uniquement à compenser le couple des pertes mécaniques et magnétiques

→ Courant absorbé très faible (quelques % de i_{aN})
→ Chute de tension très faible
→ Tension aux bornes pratiquement égale à la f.e.m. à vide :

$$v_a = e + R_a i_a + \Delta V_b \cong e \cong e_0$$

Or $e_0 = K\,\Phi(i_e)\,\Omega_r \Rightarrow \Omega_r = \frac{v_a}{K\,\Phi(i_e)}$

La caractéristique à vide en génératrice à la vitesse Ω_g : $e_{0g}(i_e) = K\,\Phi(i_e)\,\Omega_g$

$$\Rightarrow \Omega_r = \Omega_g \frac{v_a}{e_{0g}(i_e)}$$

Pour une machine alimentée sous tension constante $v_a = v_{al}$, la caractéristique à vide en moteur est, à une constante multiplicative près, l'inverse de la caractéristique à vide en génératrice

3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique à vide en moteur $\Omega_r = f(i_e)$

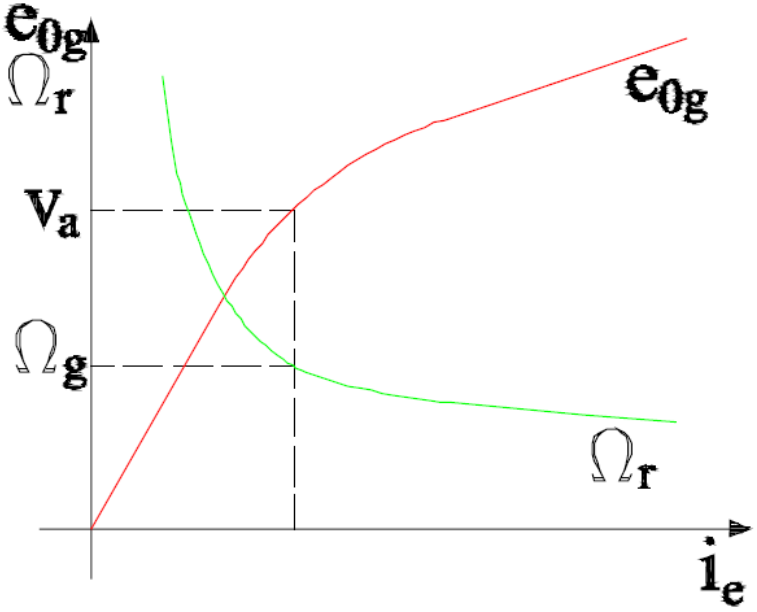
$$\Omega_r = \Omega_g \frac{v_a}{e_{0g}(i_e)}$$

Constatations principales :

- La vitesse diminue lorsque le courant d'excitation augmente
- Si l'on diminue trop l'excitation, la vitesse augmente fortement

→ Si fil d'excitation arraché :

- i_e tombe à 0
  → accélération dangereuse du moteur
- e tombe à 0
  → i_a limité juste par la résistance d'induit



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique en charge en moteur

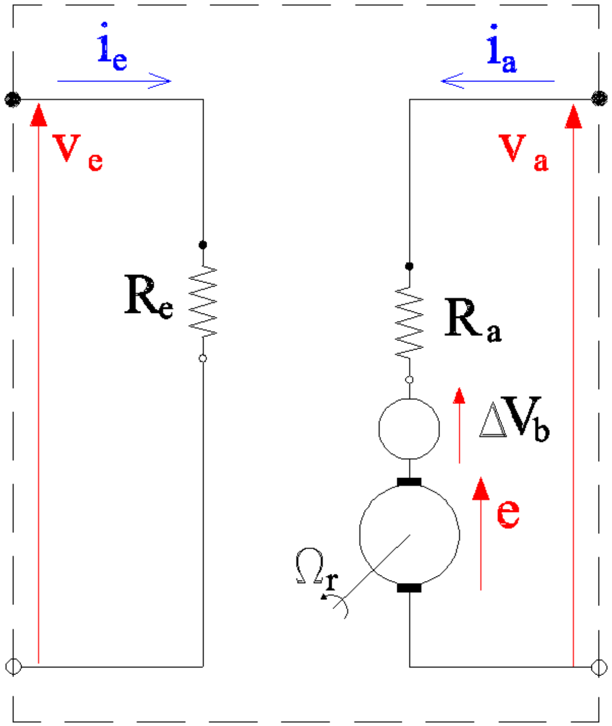
Soient

- $v_a = constante$
- $i_e = constante$

Relations fondamentales :

- $v_a = e + \Delta V_b \,\mathrm{sign}(i_a) + R_a i_a$
- $e = K\,\Phi\;\Omega_r \Leftrightarrow K\,\Phi = \dfrac{e}{\Omega_r} = \dfrac{e_g}{\Omega_g}$
- $e_g = f(i_e, i_a)$ à Ω_g donné

- $C_{em} = K\,\Phi\;i_a$
- $-C = C_{em} - C_p$
  - C_p : couple de pertes
    - Mécaniques, fonction de la vitesse de rotation
    - Magnétiques, fonction de la vitesse de rotation et de l'état magnétique



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique en charge en moteur $\Omega_r = f(i_a)$

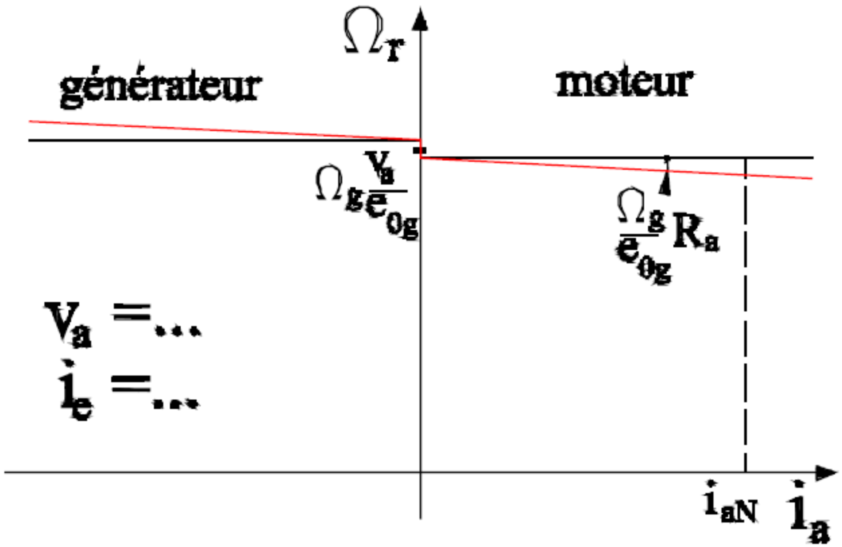
Caractéristique en charge en moteur $\Omega_r = f(i_a)$

$$\Omega_r = \frac{e}{K\Phi} = \frac{v_a - \Delta V_b \operatorname{sign}(i_a) - R_a i_a}{\frac{e_g}{\Omega_g}} = \Omega_g \frac{v_a - \Delta V_b \operatorname{sign}(i_a) - R_a i_a}{e_g(i_e, i_a)}$$

Courbe pour $i_e = cte$, $e_g = e_{0g} = cte$ et R_a « petit »

Réaction d'induit négligée

- Si $i_e \nearrow$, $e_{0g} \nearrow$ également
  → la vitesse à vide diminue
  → la caractéristique se déplace
- Si le sens du courant d'excitation <u>ou</u> celui de la tension est inversé, le sens de rotation l'est également



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

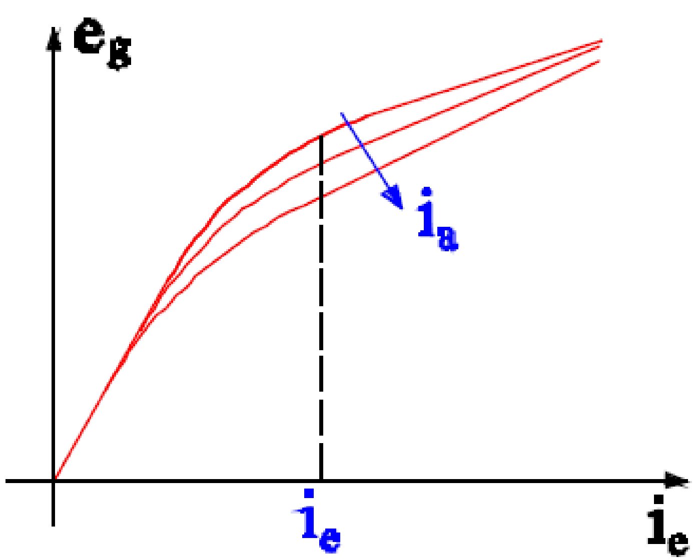
Caractéristique en charge en moteur $\Omega_r = f(i_a)$

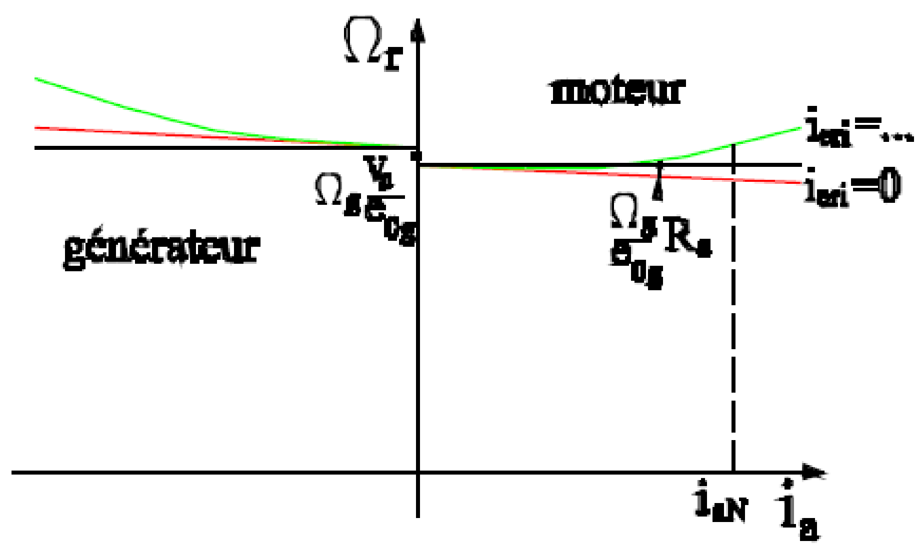
Courbe pour $i_e = cte$, $e_g = e_{0g} = cte$ et R_a « petit »

Avec réaction d'induit démagnétisante ?

- Pour une valeur donnée de i_e, la f.e.m. en charge e_g diminue lorsque i_a augmente

→ Augmentation de la vitesse de rotation en moteur aux valeurs élevées du courant





3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique en charge en moteur $-\mathrm{C} = f(i_a)$

Caractéristique en charge en moteur $-\mathrm{C} = f(i_a)$

$$C_{em} = K\,\Phi\,i_a = \frac{e_g(i_e, i_a)}{\Omega_g}\,i_a \quad \text{et} \quad -C = C_{em} - C_p$$

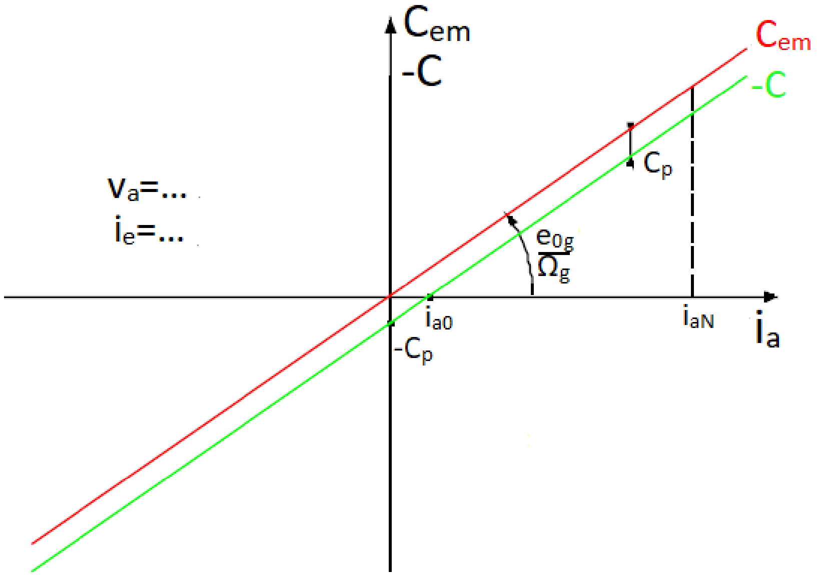
Courbe pour $i_e = cte$, $e_g = e_{0g} = cte$ et R_a « petit »

Réaction d'induit négligée

Vitesse à peu près constante

→ couple de pertes à peu près constant

→ couple moteur : fct linéaire de i_a



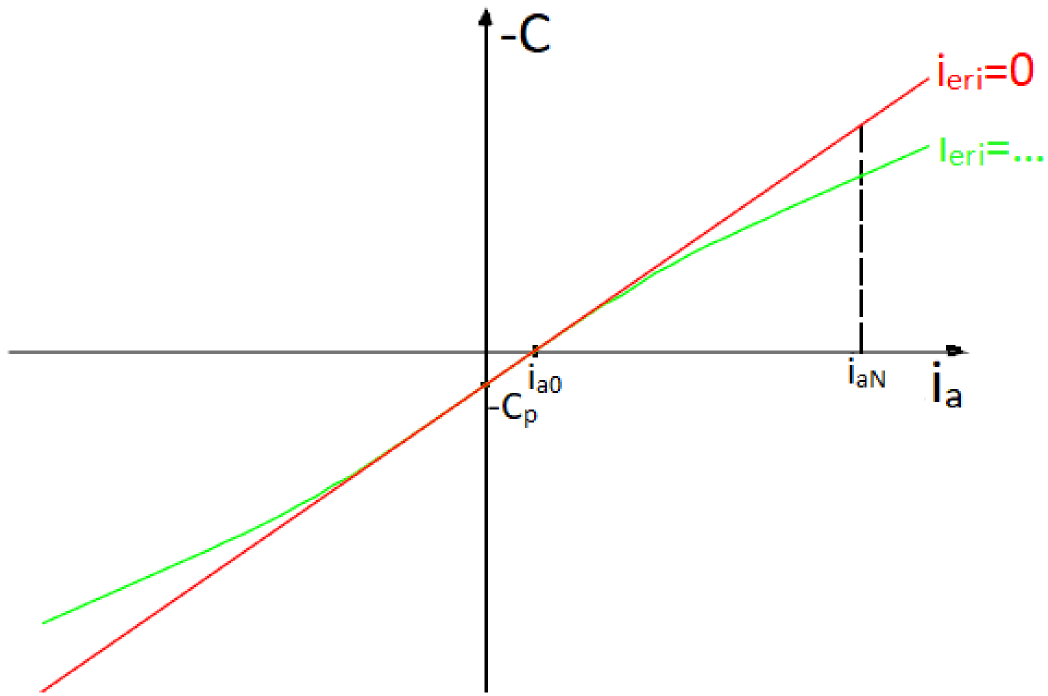
3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique en charge en moteur $-\mathrm{C} = f(i_a)$

Courbe pour $i_e = cte$, $e_g = e_{0g} = cte$ et R_a « petit »

Avec réaction d'induit démagnétisante ?

Réduction du flux longitudinal, donc du couple ($C_{em} = K\ \Phi\ i_a$) lorsque i_a augmente



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique mécanique $-\mathrm{C} = f(\Omega_r)$

Caractéristique en charge en moteur $-\mathrm{C} = f(\Omega_r)$

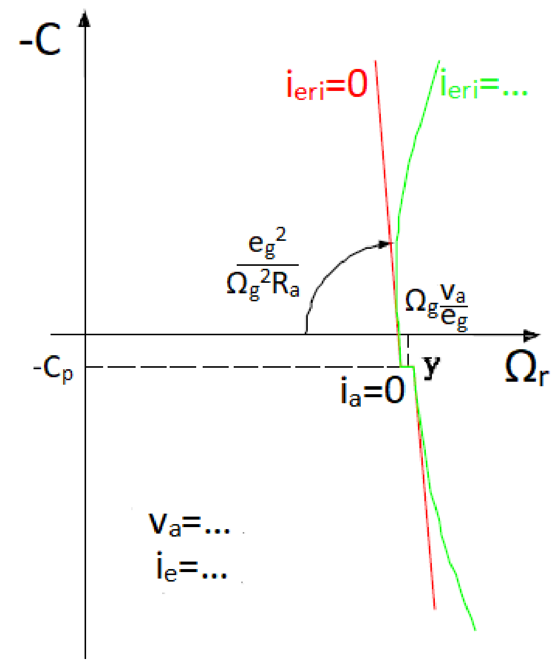
On a $-C = C_{em} - C_p = \dfrac{e_g}{\Omega_g} i_a - C_p$

$$\Rightarrow \quad -C = \frac{e_g}{\Omega_g R_a}(v_a - \Delta V_b\,\mathrm{sign}(i_a)) - \frac{e_g^2}{\Omega_g^2 R_a}\,\Omega_r - C_p$$

Courbe pour $i_e = cte, e_g = e_{0g} = cte$ et R_a « petit »

Réaction d'induit négligée

- Caractéristique linéaire
- Vitesse de rotation du moteur pratiquement indépendante du couple $-C$ car $R_a \ll$



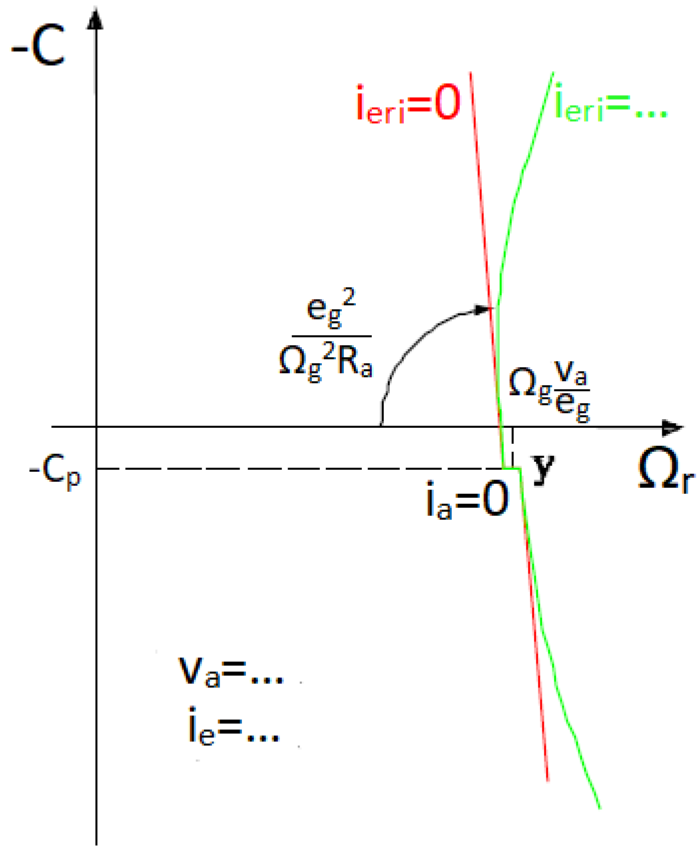
3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique mécanique $-C = f(\Omega_r)$

Courbe pour $i_e = cte$, $e_g = e_{0g} = cte$ et R_a « petit »

Avec réaction d'induit démagnétisante ?

- La vitesse de rotation ↗ par rapport au cas sans réaction d'induit lorsque i_a ↗
- Le couple ↘ par rapport au cas sans réaction d'induit lorsque i_a ↗

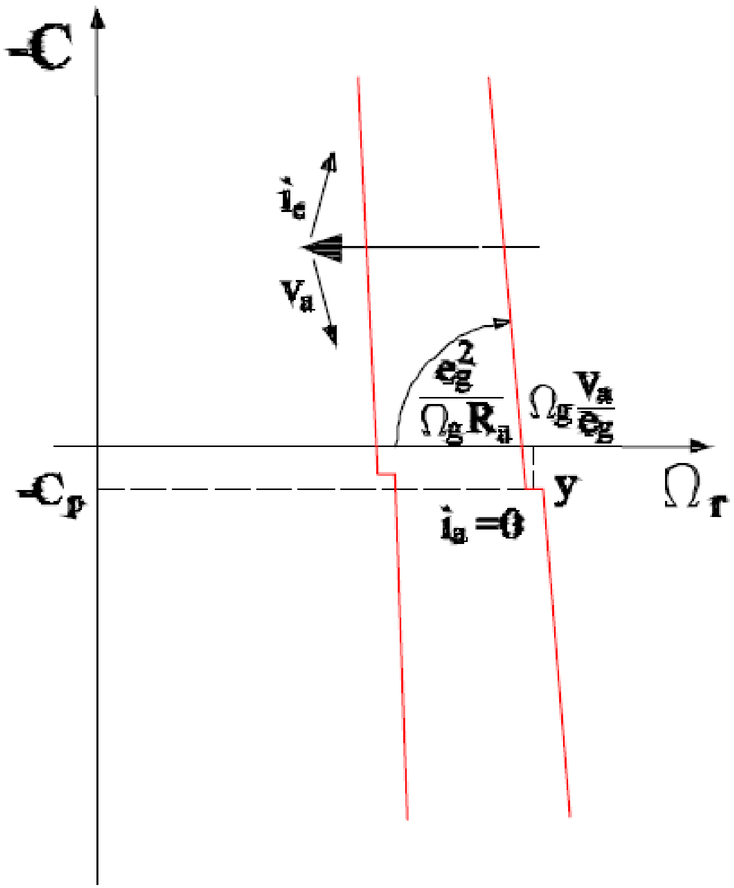


3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique mécanique $-C = f(\Omega_r)$

Action sur les variables de commande

- Augmentation du courant d'excitation
  → déplacement de la courbe vers la gauche + léger redressement
- Diminution de la tension d'alimentation
  → déplacement de la courbe vers la gauche (sans redressement)



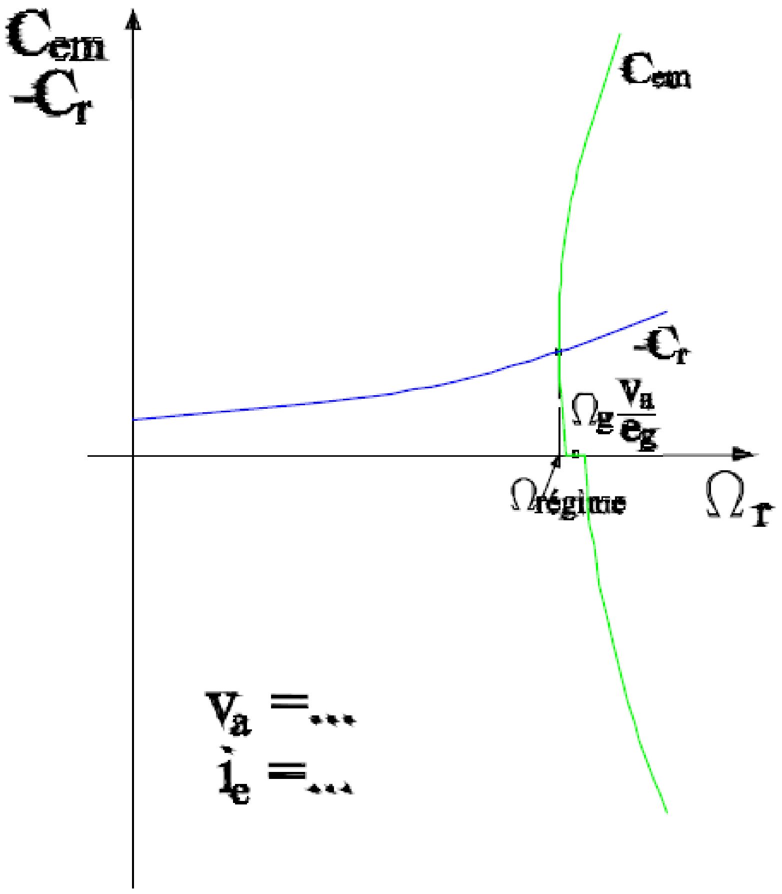
3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique mécanique $-C = f(\Omega_r)$

Vitesse en régime d'un moteur ?

Équilibre entre le couple moteur et le couple résistant opposé par la charge
→ **Vitesse quasiment indépendante du couple résistant**

- Vitesse réglable en agissant :
  - Soit sur le courant d'excitation
  - Soit sur la tension d'alimentation



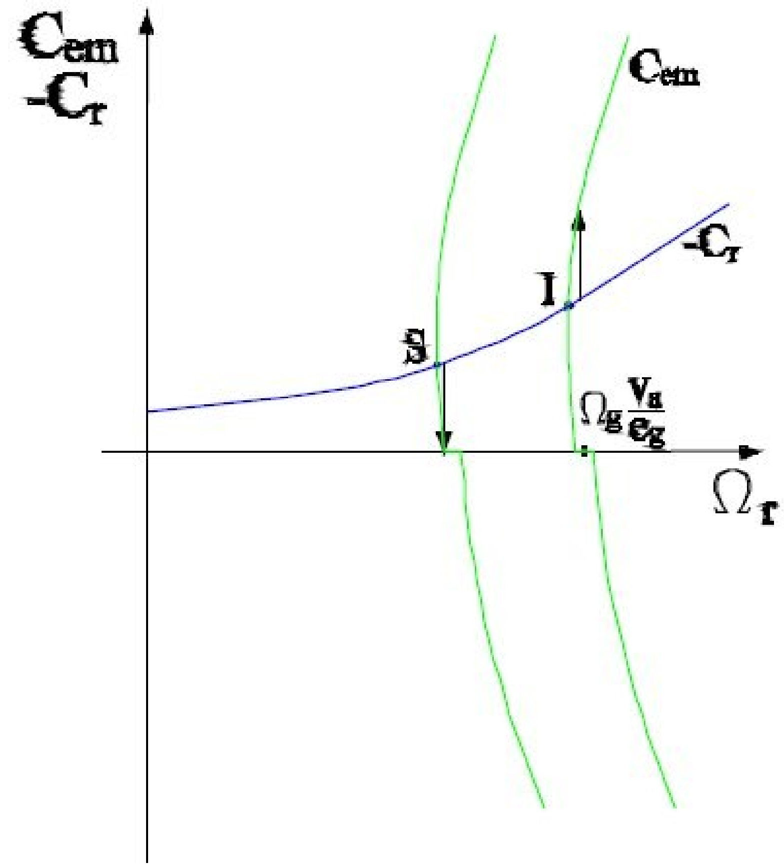
3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Caractéristique mécanique $-C = f(\Omega_r)$

Stabilité du point de fonctionnement ?

Stable si couple d'accélération négatif lorsque la vitesse de rotation augmente

→ Toujours le cas si réaction d'induit démagnétisante négligeable
→ Pas le cas aux fortes charges si la réaction d'induit n'est pas négligeable



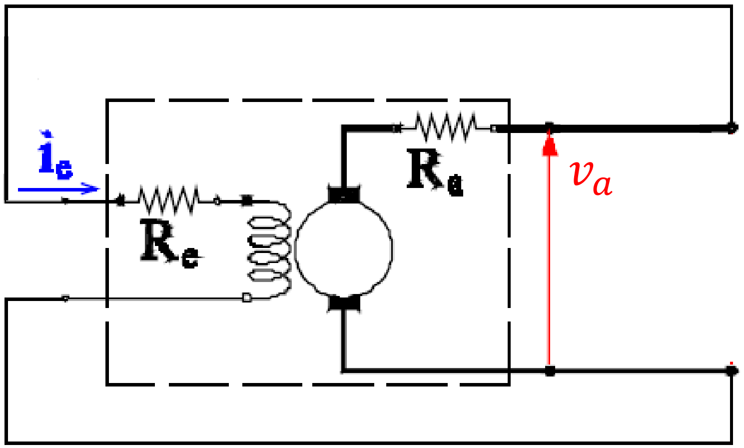
3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Moteur à excitation dérivée

Regardons maintenant le cas d'un moteur à excitation dérivée

Si tension d'alimentation constante, caractéristiques du moteur à excitation dérivée = caractéristiques du moteur à excitation indépendante

Notez que le sens de rotation du moteur n'est pas affecté par une inversion de polarité de la source



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

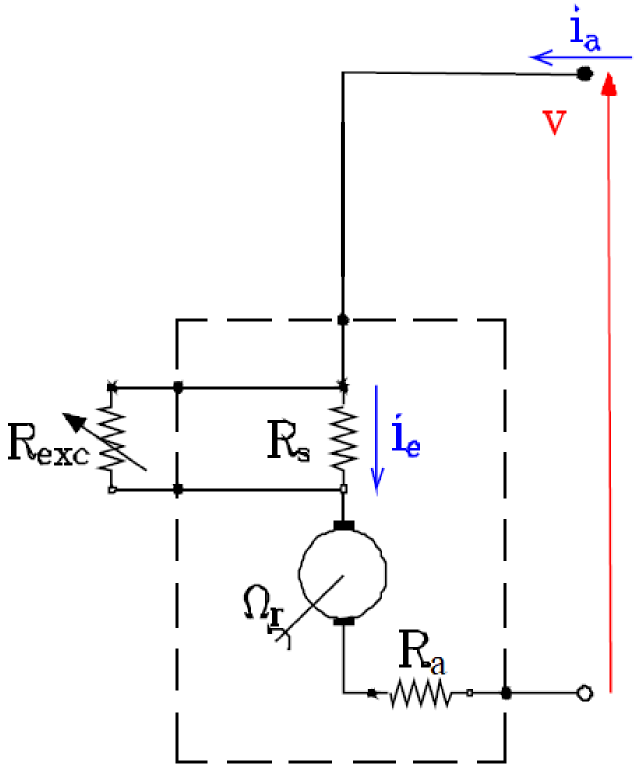
Moteur à excitation en série

Regardons maintenant le cas d'un moteur à excitation en série

R_a : résistance d'armature de la machine (quelques %)
R_s : résistance de l'enroulement d'excitation (quelques %)

Pour régler le courant i_e passant dans l'enroulement d'excitation, on peut placer un rhéostat d'excitation en parallèle.
On considèrera dans les raisonnements que $R_{exc} = \infty$, et donc $i_e = i_a$

Rhéostat
Résistance électrique réglable



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Moteur à excitation en série – caractéristique à vide

Pour pouvoir trouver les caractéristiques en charge, on va avoir besoin d'une expression analytique de la caractéristique à vide

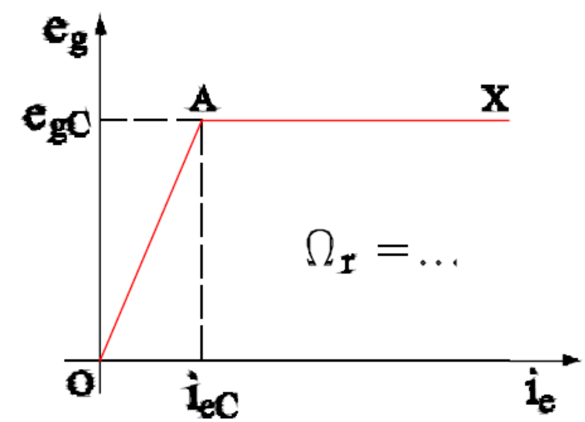
On va approcher la caractéristique à vide par une simplification divisée en deux zones :

- Pour $i_e < i_{eC}$ - zone non-saturée :

$$e_g = G\ \Omega_g\ i_e = G\ \Omega_g i_a$$

- Pour $i_e > i_{eC}$ - zone saturée :

$$e_g = G\ \Omega_g\ i_{eC} = e_{gC}$$



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Moteur à excitation en série – caractéristique en charge

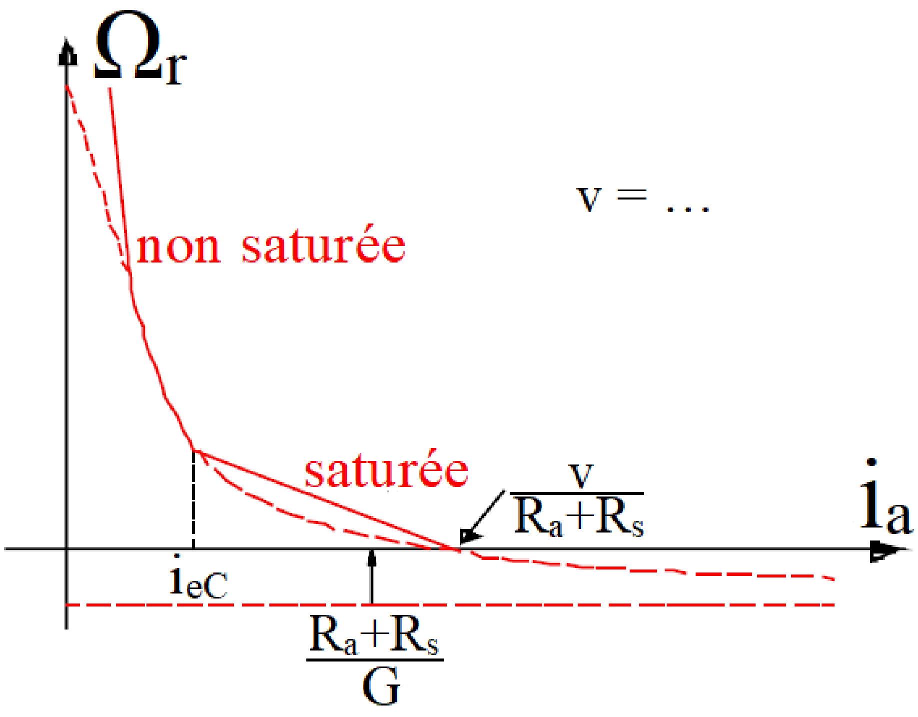
Caractéristique en charge en moteur $\Omega_r = f(i_a)$

On a $\Omega_r = \dfrac{e}{K\Phi} = \Omega_g \dfrac{v - \Delta V_b \,\mathrm{sign}(i_a) - (R_a + R_s)i_a}{e_g(i_e)}$

Développement pour les zones saturées et non saturées dans les notes

- Courbe en continu : simplifiée par le développement dans les deux zones
- Courbe en pointillé : réelle

- Forte dépendance de la vitesse par rapport au courant absorbé
- Vitesse en réalité non infinie à courant nul car rémanent, mais vitesses très élevées néanmoins possibles



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Moteur à excitation en série – caractéristique en charge

Caractéristique en charge en moteur
$C_{em} = f(i_a)$

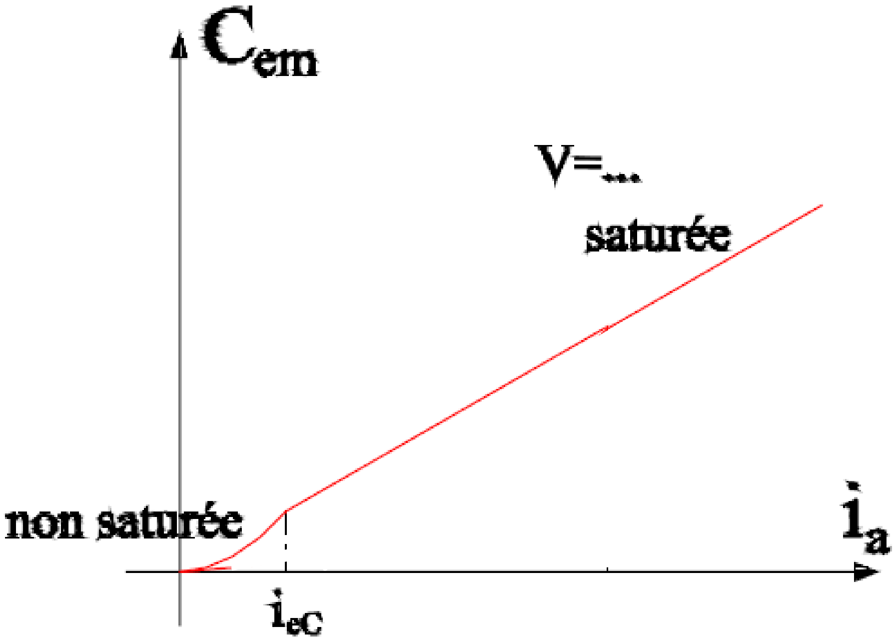
$$C_{em} = K\,\Phi\,i_a = \frac{e_g}{\Omega_g} i_a$$

Zone non saturée, pour $i_a < K_{se} i_{eC}$:

$$C_{em} = G\frac{i_a^2}{K_{se}}$$

Zone saturée, pour $i_a > K_{se} i_{eC}$:

$$C_{em} = G i_{eC} i_a$$



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Moteur à excitation en série – caractéristique mécanique

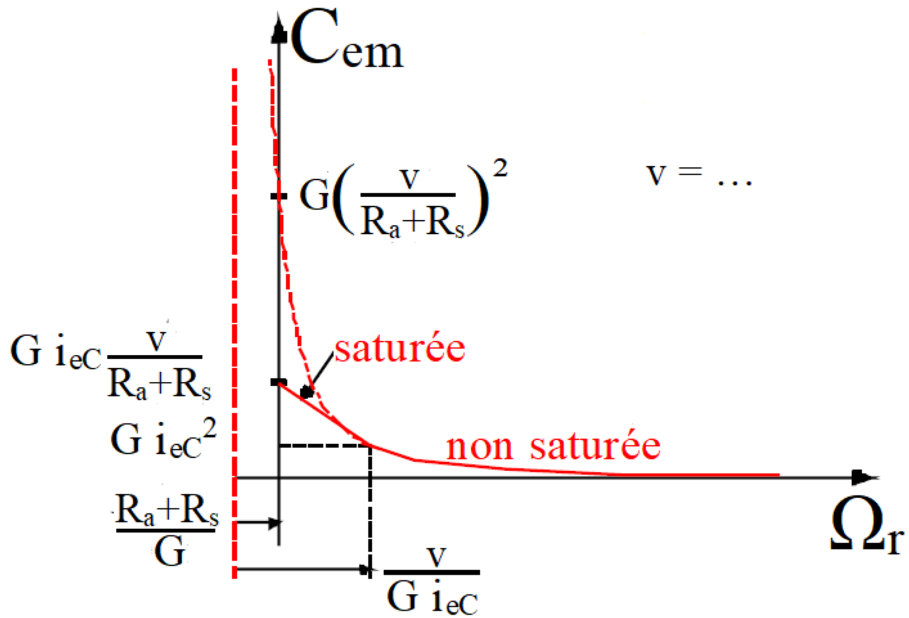
Caractéristique mécanique $C_{em}= f(\Omega_r)$

Zone saturée : $C_{em} = G i_{eC} i_a = \cdots$

Zone non saturée : $C_{em} = G \frac{i_a^2}{K_{se}} = \cdots$

- Courbe en continu : simplifiée par le développement dans les deux zones
- Courbe en pointillé : réelle

- Déplacement de la courbe vers le bas si v ↘



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Moteur à excitation composée

Regardons maintenant le cas d'un moteur à excitation composée (compound)

Un machine à excitation composée peut être vue comme une machine à excitation dérivée comportant quelques spires en série

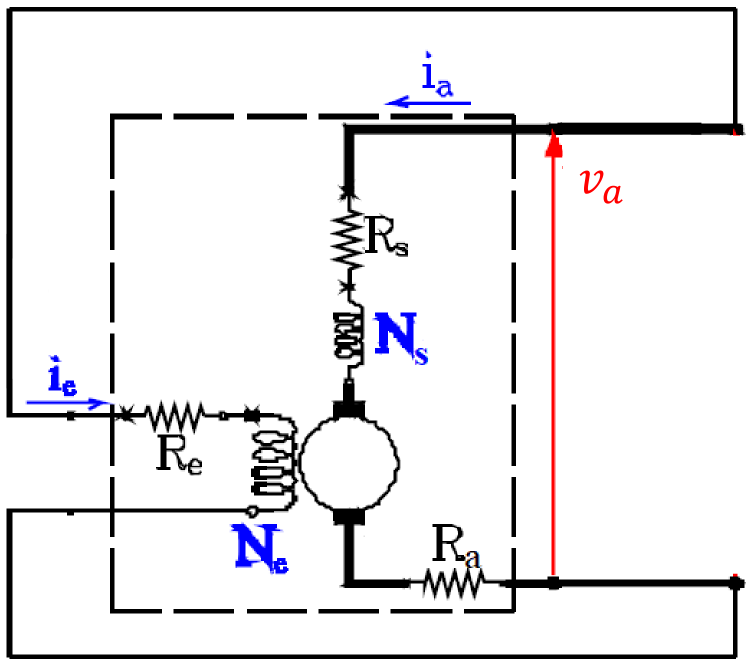
Soit une machine avec :

- N_S spires en série
- N_e spires dérivée

Cette configuration de spire est modélisée par un courant d'excitation i_e'

$$i_e' = i_e \pm \frac{N_s}{N_e} i_a$$

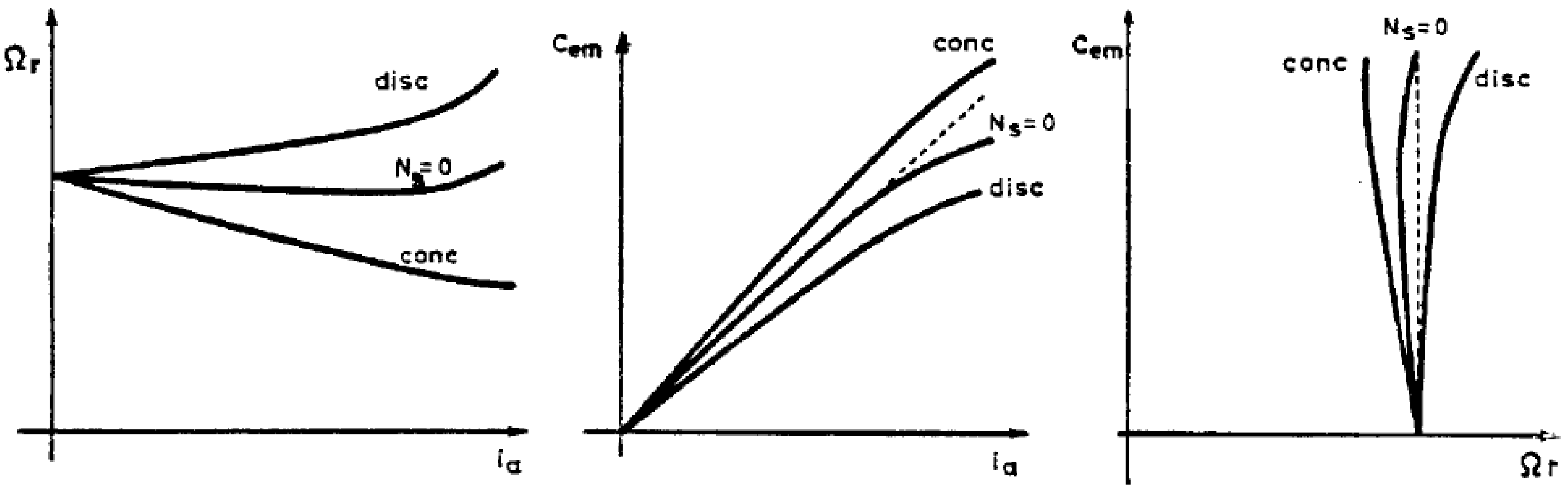
Ou le signe est défini par le sens commun (+, spires concordantes) ou inverse (-, spires discordantes) du flux créé par les spires en série et dérivées.



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Moteur à excitation composée

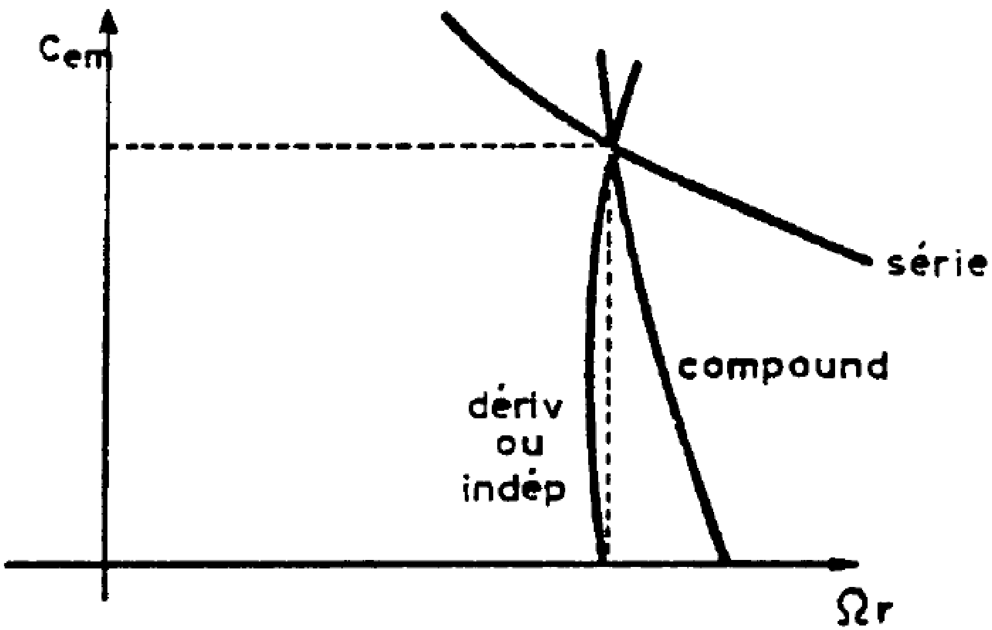
- Spires concordantes : pour une valeur donnée de i_e, par rapport au cas $N_s = 0$, à chaque valeur de i_a, correspond
  - Une valeur de i_e' augmentée
  - Une valeur de Ω_r diminuée
  - Une valeur de C_{em} augmentée
- Vice-versa pour des spires discordantes



3.3 Courbes caractéristiques des moteurs

Résumé

Comparaison de machines de types différents mais possédant les mêmes grandeurs nominales



Dans les machines modernes, on prévoit toujours quelques spires séries de stabilisation

Contenu

3.4 Réglage de la vitesse

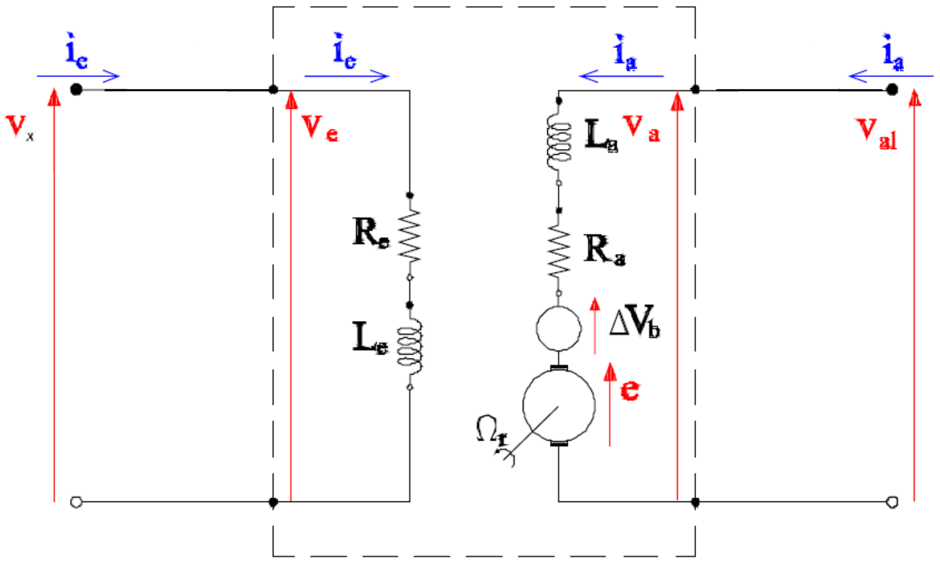
Introduction

Cas du moteur à excitation indépendante

Relation générale : $\Omega_r = \frac{v_{al} - \Delta V_b \,\text{sign}(i_a) - (R_a + R_d) i_a}{K\Phi}$

Deux variables de commande :

- Tension d'alimentation v_{al}
- Excitation Φ, c'est-à-dire i_e



3.4 Réglage de la vitesse

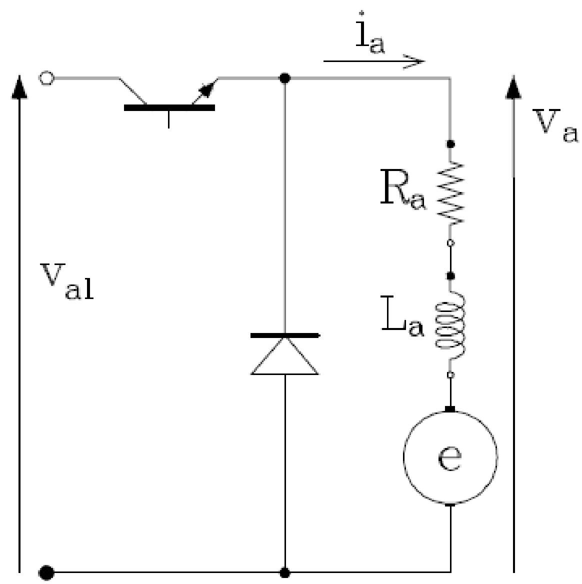
Action sur v_{al}

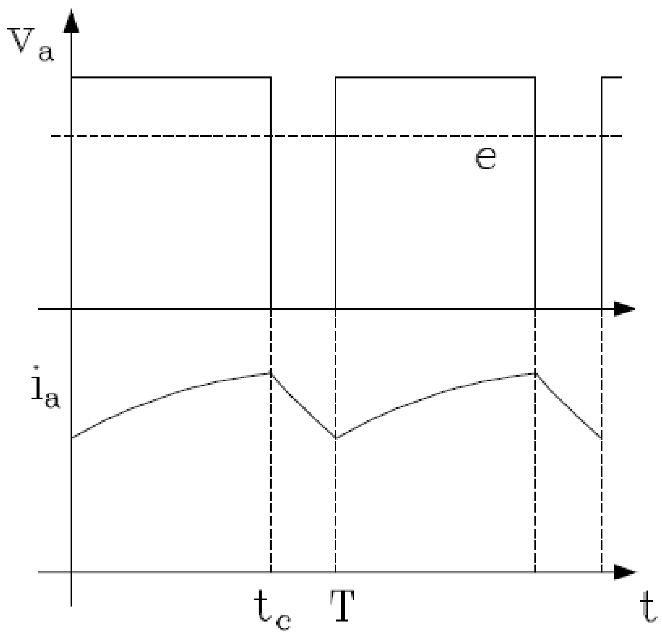
La vitesse se règle de 0 à sa valeur nominale par action sur v_{al}

Nécessite de l'électronique de puissance pour le réglage
(plus de détails dans le chapitre 10)

Exemple : hacheur à transistors

$$v_{a,moy} = v_{al}\,\frac{t_c}{T}$$





3.4 Réglage de la vitesse

Action sur i_e

$$v_{al} \cong e = K\Phi\Omega_r$$

→ Jouer sur i_e permet de modifier Φ, qui joue sur la vitesse

Attention, pour conserver un couple constant à la charge, si le flux diminue, i_a augmente :

$$C_{em} = K\ \Phi\ i_a$$

→ attention à ne pas dépasser la valeur maximale de i_a, et donc la valeur minimale de i_e

3.4 Réglage de la vitesse

Résumé

Comparaison entre action sur v_{al} et action sur i_e

- Coût plus élevé pour le réglage par la tension d'alimentation
  → Courants réglés plus importants
- Rapidité plus grande pour le réglage par la tension d'alimentation
  → La constante de temps du circuit d'excitation n'intervient pas
- Plage de réglage plus importante pour le réglage par la tension d'alimentation