

LP-Conversion Electromagnétique de puissance

- Gamme de puissance : du μW au GW ; du mW à la dizaine de mW
- Création d'un champ magnétique : électroaimant ou aimant permanent
- IMPORTANT : 4 Quadrant couple en fonction de la vitesse. $P = \Gamma \Omega$. Moteur est réversible. Il faut récupérer cette puissance avec actionneur électrique et/ou dissipation ex : freinage des trains.
- A la maison tension simple : $V = 230\text{V}$, tension composée : $U = 400\text{V}$
- Pertes fer : par hystérésis + courant de Foucault. Machine courant continu a aussi des pertes fer car il tourne dans un champ fixe.
- IMPORTANT : La puissance indiquée sur la plaque signalétique est la **puissance mécanique** !

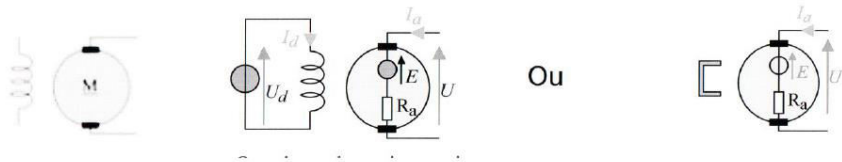
I- Machine à Courant Continu

A- Principe de fonctionnement

- **Machine à courant continu** : Pour démarrer une voiture, on utilisait encore récemment un moteur à courant continu (cf slide).
Inducteur : ce qui va créer le champ primaire.
- **Deux types d'excitation** : Excitation séparée, excitation série.
- **Les bobines de l'inducteur produisent un champ de direction fixe.** Côté rotor, les balais
- **Finesse et subtilité** : Redresseur commandée, on change le sens du courant. Il y a 2 champs fixes perpendiculaire qui permet d'avoir le couple maximum
- **Important** : nombre de paires de pôles : $p = 3 : 6$ électroaimants (dans le jargon, ils disent, 6 aimants, 3 nord, 3 sud)
- **Partie excitatrice** :
- **Rotor, encoches, conducteur que l'on soude sur le collecteur.** Le courant est commuté ! Cela permet de créer un champ fixe orthogonal au champ du stator. Quel que soit la position du rotor.
Le circuit du rotor est feuilleté car comme il bouge, il voit un champ fixe. Pour avoir un couple constant quel que soit l'orientation du rotor, il faut aligner beaucoup de spires légèrement décalées. Il faut regarder la valeur moyenne du couple. Le collecteur permet que le couple négatif devienne positif. Le balai est un contact glissant.

Modèle de la MCC en régime permanent : relations fondamentales

Fonctionnement en moteur à excitation indépendante



→ Si I_d est constant alors le flux est constant

Aimants permanents

Relations :

avec $E = K\phi\Omega$ si $\phi = \text{cte}$ alors $E = K\Omega$

$$U = E + R_a I_a$$

$$U \cdot I_a = E \cdot I_a + R_a \cdot I_a^2$$

$$\Rightarrow P_a = P_{em} + P_J$$

P_a : puissance absorbée par l'induit
 P_{em} : puissance électromagnétique
 P_J : pertes Joules

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega} = \frac{K \cdot \Omega \cdot I_a}{\Omega} \Rightarrow \boxed{C_{em} = K \cdot I_a}$$

K : constante de couple
 C_{em} : couple électromagnétique

$$C_{em} = C_u + C_p$$

C_u : couple utile sur l'arbre
 C_p : couple de perte. ($P_f + P_m$)

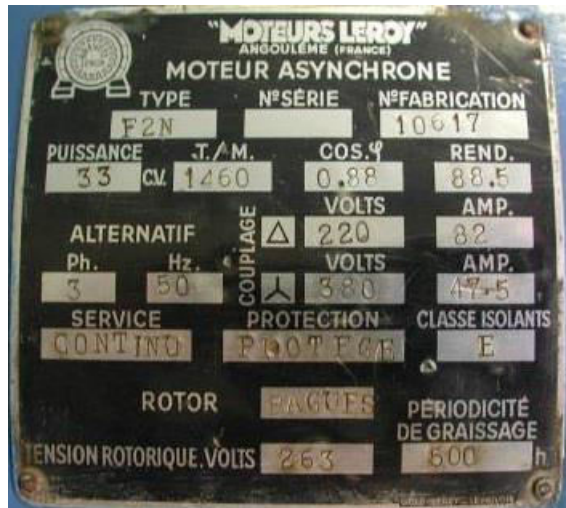
24

B- Avantages-Inconvénients

- **Avantage : facile à piloter.**
- **Inconvénient : Machine à courant continu** est chère et nécessite de l'entretien (nettoyage des balais, nettoyer le collecteur) donc c'est cher ! Il faut le remplacer par les autres machines (synchrone et asynchrone)
- **Est-ce que je peux démarrer une machine à courant continu sous tension nominale ?**
 400V résistance de l'induit 0.4 ohm. $I = 1000A$. Il faut mettre une résistance. Mais c'est dissipatif. Il va falloir trouver autre chose.
- **Qu'est-ce qui consomme le plus ?** 10kW absorbe 12kW électriquement. Puissance passe par le rotor. Au niveau refroidissement, c'est difficile à refroidir.

C- Différent type de Couplage

- **Il faut parler du couplage (!) :**



Il y a 2 tensions et 2 courants en fonction du couplage choisit. La petite tension (ici 220V) est la plus petite tension que peut supporter un enroulement. Quand le prof dit : « le réseau est de 400V » C'est sous-entendu : 400V entre phase ! Ce moteur ne peut supporter qu'une tension maximale de 220V pour un enroulement, il faut donc le brancher en couplage étoile. $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$. V est la tension simple (ie phase-neutre) et U la tension composée (ie entre phase). Si le réseau est de 230 V entre phase (ie 137 V entre phase et neutre), il faudra alimenter les bobinages de l'inducteur en triangle.

D- Moteur excitation série

- **Moteur excitation série** : L'inducteur est placé en série. L'inducteur va voir le même courant que l'induit. Le niveau de courant va être bcp plus important.

$$\begin{cases} E = K \cdot \Phi_e \cdot \Omega \\ C = K \cdot \Phi_e \cdot I_a \end{cases}$$

\Rightarrow Le courant d'induit est le même que le courant inducteur.

$$\Phi_e = \lambda \cdot I_a \text{ d'où } E = K \cdot \lambda \cdot I_a \cdot \Omega$$

$$C_{em} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega} = \frac{K \cdot \lambda \cdot I_a \cdot \Omega \cdot I_a}{\Omega} = K' I_a^2$$

\Rightarrow C_{em} est proportionnel à I_a^2

Super intéressant pour les machines mécaniques qui demandent un fort couple au démarrage. Train électrique vieux corail. Grande inertie car masse très importante. A faible vitesse, on a un couple très important. Par contre, il ne faut pas que le moteur démarre à vide (ie sans charge) car vitesse très grande. On l'utilisait dans la traction électrique (il disparaît), levage, grue. On l'utilise encore dans les outils électroportatifs, on parle de moteur universelle (ie à excitation série alimenté en monophasé où on change le sens du champ inducteur). Fenêtre où l'on voit des étincelles des charbons.

E- Un pilotage simple

- **Le couple est commandé par l'intensité de l'induit** $C_{em} = K I_d$
- **La vitesse est relié au champ électromoteur** : $E = K \Omega$

- **Pour faire varier la vitesse** : il faut faire varier la tension d'alimentation de l'induit (cf.

$$U = k\Omega + R_a I_a$$

$$\Omega = \frac{U}{k} - \frac{R_a}{k} \cdot I_a$$

slide 39).

En effet le courant est constant car relié au couple em. On utilise un hacheur. C'est la tension moyenne qui est importante. On fait varier le rapport cyclique pour faire varier cette tension moyenne. *Thyristor 51'*

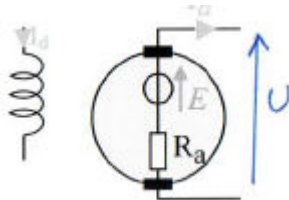
F- Fonctionnement en génératrice :

$$U = E - R_a I_a$$

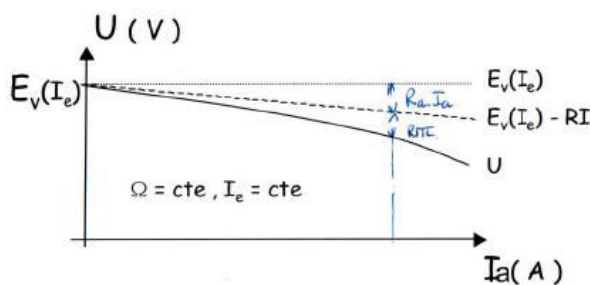
$$U \cdot I_a = E \cdot I_a - R_a \cdot I_a^2$$

$$P_u = P_{em} - P_{J_{induit}}$$

- Le courant est dans le sens de la force électromotrice.



- **Puissance utile** : Attention, le champ électromoteur contribue à créer l'intensité I_a mais cela crée des pertes électromagnétiques. Car $P_u = U I_a - E I_a - R_a^2 I_a^2$. La loi de Lenz provoque le freinage du rotor. La puissance utile est $P_u = U I_a$ avec U et la tension et le courant de l'induit. On remarque l'importance des conventions choisies. Les grandeurs sont orientées de telle manière à ce qu'elle soit positive !



$$U = E - R_a I_a$$

- **Droite de charge** :

Il s'agit d'une droite de charge d'un générateur de tension.

G- Aspects Pratiques

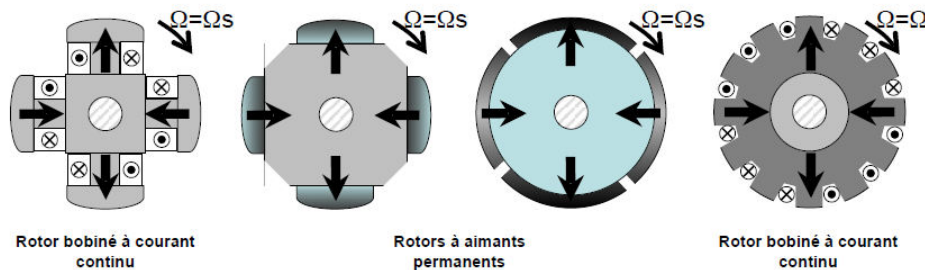
- **Comment déterminer les pertes collectives ?** : essai à vide rien de connecté mécaniquement au moteur. Perte fer et perte méca.
- **Caractéristique** : $E = f(I_d)$. Permet de trouver la constante de force électromotrice. (?)
- **Résistance de l'induit** : essai à vitesse nulle. On bloque le rotor. S'il ne tourne pas, on a plus de force électromotrice. Donc on sait déterminer R_a . Tension réduite.

- **Plaque signalétique** : 1009 Ampère dans l'induit. Moteur de 9 tonnes !
En TP : On commence par alimenter l'inducteur aux valeurs nominale. Puis on alimente l'induit en partant d'une tension de 0.

Pour arrêter, il faut couper l'inducteur en dernier car si on part de la relation de $\Omega \propto \frac{U}{K}$. Et $K = k\Phi_0$. Comme on coupe l'inducteur, le champ magnétique devient nul et $\Phi_0 = 0$ donc $K = 0$ et la vitesse devient théoriquement infinie => le moteur s'emballe. Un moteur est capable d'accepter 2 fois la vitesse nominale. Au-delà la force centrifuge fait qu'il explose !

II- Machine à courant alternatif

- **Plaque signalétique** : Puissance mécanique (!) 33CV. 1CV=735,499W
- **Rotor** : Le champ magnétique est réglé par des aimants et ou par des électroaimants. Sur la figure de droite, on parle de rotor à pôle lisse ou les enroulements sont fait de tel sorte à créer les pôles nord et sud. Les poles lisses sont moins soumis aux pb de forces



Concordance des paires de pôles entre rotor et stator

39

centrifuges.

- **Fonctionnement moteur ou alternateur** : Si le champ rotor est en avance / champ stator → alternateur. Sinon, moteur.
- **Relation** : $f = pn$.

3000 tours par minutes. La vitesse peut être élevée pour centrale thermique (nucléaire). (Vanne Vapeur + turbine) 5". On a besoin que d'une paire ou 2 paires de pôles.

Au fil de l'eau, ça tourne doucement. Le seul moyen de me raccrocher au réseau c'est augmenter le nombre de paires de pôle.

Les machines qui tournent vite, sont longues et diamètre faible (turbo alternateur) 1500-3000 tour/min. En revanche production hydraulique, machine tournent lentement (diamètre grand et longueur assez courte. Cette formule est vraie pour les machines synchrone et asynchrone.

- Dans machine à courant continu, il faut un champ statorique et un champ rotorique.

- Si je suis en alternateur, le rotor tourne devant le bobinage et crée un champ et cela crée un champ induit. La force électromotrice dépend de la fréquence et du flux produit par l'aimant situé au rotor. Comment régler le flux ?

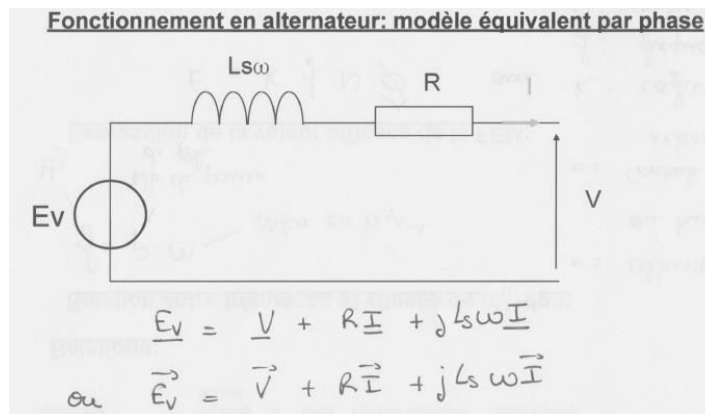
Je branche le stator, le champ statorique apparaît : il tourne admettons à 3000tr/min. Le rotor ne peut pas suivre. Une machine synchrone ne peut pas démarrer comme ça si on le branche sur le réseau. Le rotor n'a pas le temps de suivre. Il faut l'amener à la vitesse nominale. Ou il faut un variateur de vitesse.

- **20'22. Relation entre fréquence et vitesse de rotation** : Le modèle équivalent **par phase** en régime permanent. Il y a la force électromotrice, l'inductance cyclique (= autoinductance), la résistance. Alternateur dans avion (?21'44)
- **Relation importante** : $E_v = V + RI + jL_s w I$. On trace le diagramme vectoriel.
- L'alternateur n'est pas saturé. E linéaire
- Détermination de R et de L_s : (23'30). On peut souvent négliger la résistance devant l'inductance
- On trace E_v en fonction de I 1'30
- Caractéristique en court circuit : 2'46
- **Diagramme synchrone ou behn eschenburg** : On trace la tension simple. La charge fixe le courant et le déphasage. Diagramme monophasé. Déterminer le courant d'excitation

qu'il faut mettre pour fixer V (?) ... 12'00 ? Alternateur fourni de la puissance active Watt et aussi parler de la puissance réactive des VAR. $V = k i_e \Omega$.

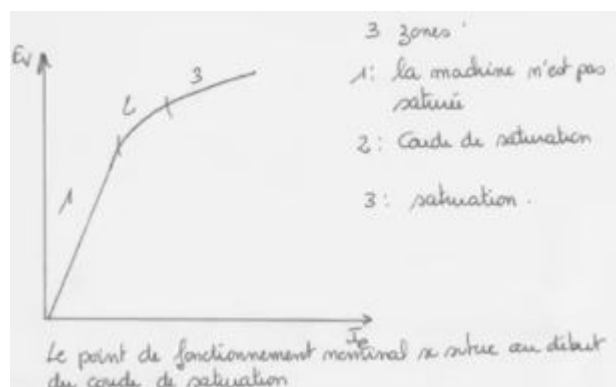
- 42'00 : rendement.
- Question sur la leçon : 44'00
- Comment on couple un alternateur sur le réseau ? 1'00'00.
- Quel est l'intérêt de la machine synchrone fonctionnant en moteur : 1'14 Moteur de grande puissance. Moteur va absorber de la puissance active. On va pouvoir fo

- **Modèle de Behn Eschenbourg = Modèle équivalent par phase**



Modèle simple, fem + réactance synchrone, résistance statorique.

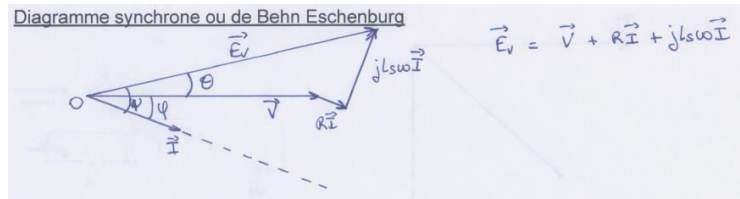
- **Courbe $E_v = f(I_e)$: Force électromotrice en fonction de l'intensité excitatrice (rotor).**
On entraîne la machine à vitesse nominale, on règle le courant d'excitation (courant du rotor), on mesure à vide la force électromotrice. On peut ainsi tracer $E_v = f(I_e)$. On remarque que la machine est linéaire pour les intensités faibles. Les machines travaillent au début de la saturation. (Pourquoi il y a une saturation ?)



- **Caractéristique en court-circuit** : Entraîne la machine à vitesse constante. On court-circuite les 3 phases du stator. On fait varier le courant d'excitation et on mesure le courant statorique. $I_{cc} = f(I_e)$. On obtient une droite. L'impédance synchrone se détermine comme $Z_s = \frac{E_v}{I_{cc}}$. $X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2} \sim Z_s$ car terme résistif faible.
- **Diagramme de Behn-Eschenbourg** : On le trace pour « un point » (courant, la tension et déphasage). En effet, l'alternateur alimente une charge qui fixe le courant et le

déphasage.

(i) Je connais I , V et ϕ . (ii) Je trace la perte de charge Ri (iii) Je trace la tension de l'auto-



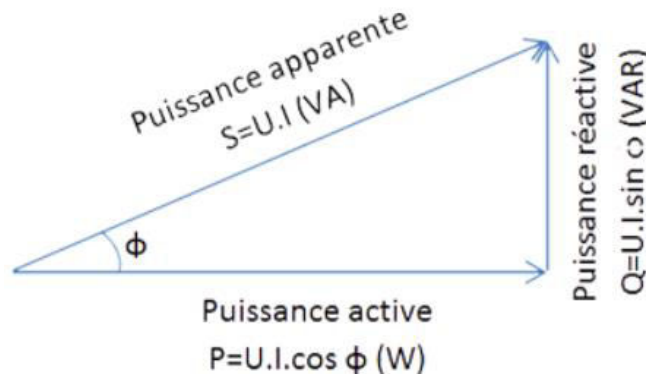
inductance $jL_s\omega$, (iii) Je peux trouver la force électromotrice E_v . (iv) Je peux trouver le courant exciteur I_e , pour remonter alimenter la charge.

Simplification : on peut négliger la résistance pour des puissances élevée (100MW).

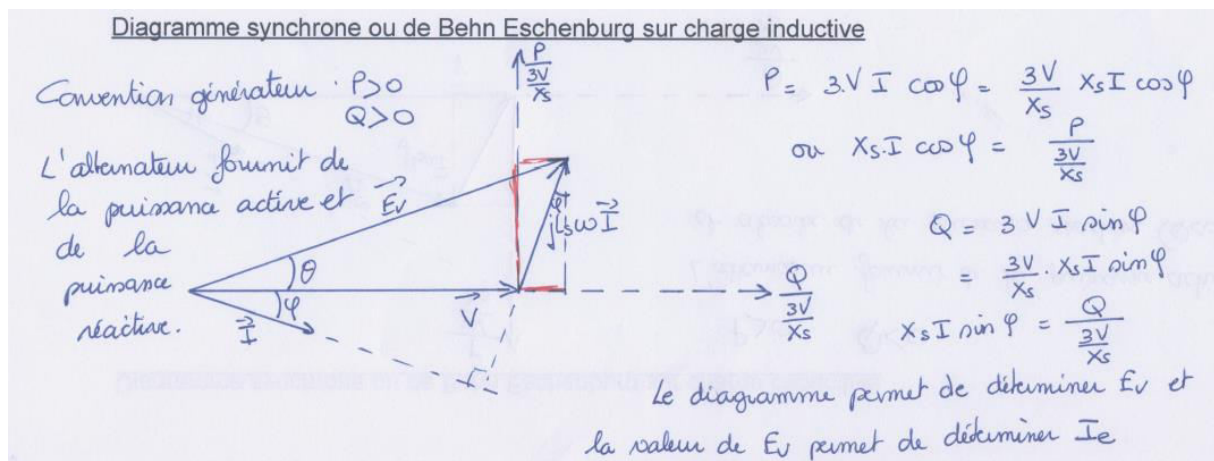
Remarque sur l'aspect inductif de la charge: On a considéré que la charge était « inductive » car le courant est en retard sur la tension (http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/archives/documents/electricite/RegimeSinusoidal/Association/Rlc_serie.htm).

Côté industriel : moteur, transformateur (sur le réseau), les lignes (effet inductif). La distribution 20 kV, on abaisse jusqu'à 400V, 230V : Ces lignes sont inductives. Transport 63kV 400kV (plutôt capacitive la nuit). 12'43. Si la charge est capacitive, il faut que l'alternateur consomme de la puissance réactive. Assez rare comme fonctionnement (59'40)

- **Rappel sur les notions de puissances actives, réactives, apparentes :**

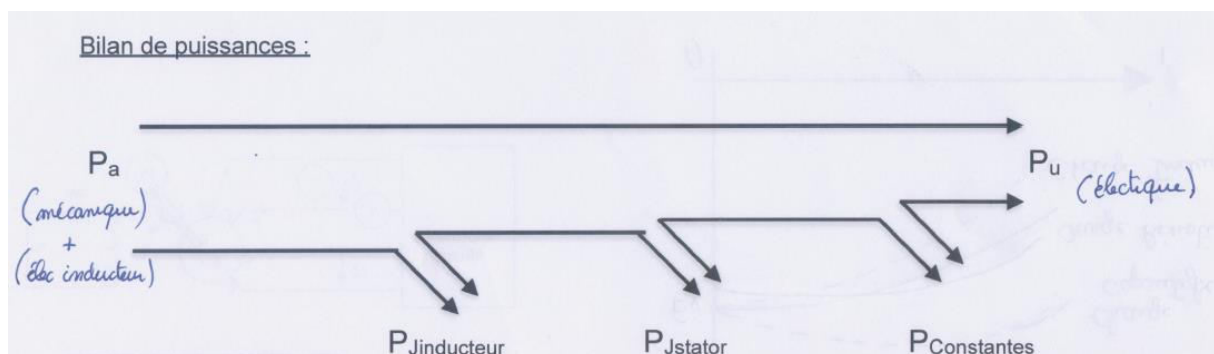


- (i) La puissance apparente : c'est celle à laquelle on souscrit à EDF. EDF dimensionne ces lignes en fonction de cette puissance apparente. Il impose aux industriels un déphasage un $\tan(\phi) < 0.4$. Unité : kVA (kiloVoltAmpère)
- (ii) La puissance active : C'est la puissance effectivement consommée par le consommateur. Unité Watt
- (iii) La puissance réactive : Elle est dû au déphasage entre courant et tension. Ce déphasage est contrôlé par le consommateur. Cela dépend de la charge en bout de ligne. (Unité : VAR pour volt Ampère réactif).
- **Contraintes** : Si on est couplé au réseau EDF, la fréquence de 50Hz est imposée. Donc cela impose une vitesse de rotation du rotor. Le paramètre de contrôle est l'intensité excitatrice du rotor (I_e). $E_v = k\omega I_e$.
Si on n'est pas couplé au réseau EDF, il faudra réguler la vitesse du moteur, et la tension.
- **Diagramme PQ (de Behn Eschenbourg en puissance) :**



La projection du vecteur $jL_s \omega I$ est la puissance active (sur l'axe des ordonnées) et la puissance réactive (sur l'axe des abscisses). En régulant le courant exciteur, EDF contrôle la puissance réactive consommée. *Un alternateur fournit de la puissance active et réactive.* Si on a trop de puissance réactive, il faut augmenter la tension des lignes (?). On est déjà à 400kV on peut pas aller au-delà de 420kV.

- Rendement :



Les pertes constantes regroupent les pertes fer (ie courant de foucault et hystérésis) et les pertes mécaniques (frottement sec et visqueux)

Les alternateurs de centrales nucléaires 98%.

- Leçon : 45''
- **Comment je règle la puissance active fournie par un alternateur ?** J'ai un alternateur couplé au réseau (ie la vitesse est fixe). Sur quoi je vais agir pour régler la puissance active. On agit sur le couple (en ouvrant les vannes). On agit sur la puissance mécanique. On rappelle qu'une conversion électromag parfaite implique $C_{em} \omega = e_v i$. *Pour augmenter la puissance électrique donné par mon alternateur, je vais augmenter la puissance mécanique fournie à mon alternateur.*
- **Comment je règle la tension ?** On joue sur le courant d'excitation I_e .
- **Couplage Machine Synchrone au réseau :**
 - (i) Fréquence de tension de l'alternateur identique à celle du réseau, (ii) Ordre des phases identiques (iii) Valeur efficace délivrée par l'alternateur identique à celle du réseau (iv) tension alternateur en phase avec celle du réseau. Solution : Montage à lampe : Il faut

que les 3 lampes soient éteintes. Synchrocoupleur : Si on n'est pas à la bonne fréquence, il modifie la vitesse de la machine synchrone, pour régler la tension efficace, il va régler le courant I_e .

- **Fonctionnement en moteur** : On inverse le sens de I . En fonctionnement inductif (ie courant en retard), le moteur absorbe de la puissance active et réactive. En fonctionnement capacitif, le moteur absorbe de la puissance active mais fournit de la puissance réactive au réseau. Cela permet de compenser la consommation de la puissance réactive de l'installation et éviter de mettre des batteries de condensateur.
- **Démarrage du moteur synchrone** : (i) On utilise un moteur auxiliaire pour atteindre la bonne vitesse. (ii) **Démarrage en Machine asynchrone**(???). On met des barres court-circuitées dans le rotor qui vont être le siège de courant induit qui vont s'opposer à la rotation (loi de lenz) (1'26) ????????????????
- **Pour faire varier la vitesse du moteur asynchrone, on peut faire varier la fréquence électrique**. Pour cela on conçoit un système redresseur-onduleur et on asservit le déphasage tension courant pour maintenir un couple constant. ???

III- Machine asynchrone ou à induction

A- Principe

- **Principe 1'37** : C'est la plus utilisée, pompage ventilation. Machine robuste, simple de fabrication mais complexe au niveau de la commande. En particulier si on veut maintenir un couple à vitesse nulle. On retrouve le stator d'une machine synchrone. Champ produit par 3 bobines disposées à 120 degrés. Création d'un champ tournant. $\Omega = \frac{\omega_s}{p}$. Rotor bobines court-circuitées ou barreaux = cage d'écureuil. Création de courant induit dans les barreaux. Le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure au champ tournant. Les bobines sont court-circuitées → Courant induit. Création d'un champ magnétique. Le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse du champ statorique ex : stator 2 paires de pole 1500 tours par minutes => 1450 tours par minutes pour le rotor. 5'44.
- **Résumé du principe** : Champ magnétique tournant (*par rapport au rotor*) + bobinage court-circuité → courant induit. Courant induit + champ magnétique → moment de laplace → rotation.

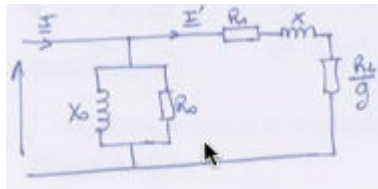
B- Le champ rotorique

- Création d'un champ tournant au rotor H_r . La fréquence f_r va varier $0 < f_r < f_s$. f_r : fréquence du champ rotorique par rapport à la vitesse de rotation du rotor cad dans le référentiel du rotor.
- Notion de glissement : Plus on charge mécaniquement, plus le glissement va être important. Glissement : 3-6% maximum.
- **Constitution technologique (2 possibilités)**: (i) Bobinage rotorique amené sur les bagues est court-circuitée. Mais on peut aussi ajouter des résistances. (ii) La majorité des machines ont des barres en alu court-circuitée par une couronne en alu. Sur ce type de machine, on n'a pas accès au rotor. On a juste accès au stator. On parle de rotor en cage d'écureuil. 9'30
- **Différence avec machine synchrone** : Pour un moteur synchrone, une bobine alimentée en continu. On crée un champ fixe au rotor qui va tourner. Moteur asynchrone est identique au moteur asynchrone coté stator. Par contre, le rotor ce n'est pas une bobine.

Il y a autant de bobine qu'au stator et elles sont court-circuitées entre elles. Elles vont être le siège de courant induit car balayées par un champ tournant. 12'20 **Il y a pas d'aimant/electroaimant au rotor.**

C- Glissement

- **Notion de glissement** : Champ tournant au stator Ω_s . Rotor tourne à la vitesse Ω . Le champ magnétique rotorique tourne à Ω_r dans le référentiel du rotor (!).
- **Les deux champs tournent à la même vitesse** : $\Omega_r + \Omega = \Omega_s$



- Glissement $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$. Vaut qq % en fonctionnement nominal.

D- Modèle électrique par phase : EN REGIME PERMANENT on ramène tout au niveau du stator.

- Description des éléments du modèle

X_0 réactance magnétisante. R_0 perte fer. 19'50.

R_1 : perte joule enroulement statorique

R_2 : perte joule de l'enroulement rotorique. R_2/g : ramené au stator.

X inductance de fuite ramené au stator. g glissement.

- Détermination des éléments du modèles.

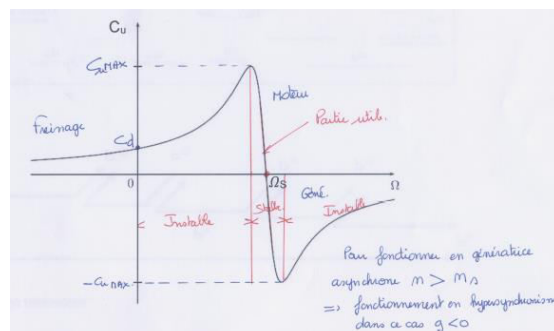
→ **Essai continu : détermination de la résistance statorique R_1 à courant nominal**

→ **Essai à vide (sans charge mécanique mais à tension nominale)** : Pas de charge ==> Faible glissement. Résistance R_2/g tend vers l'infini. On enlève une branche dans le modèle. On mesure V_{10} et I_{10} et la puissance active. On en déduit la puissance apparente, réactive, puis R_0 et X_0 . 22'44

→ **Essai à rotor bloqué** : sous tension réduite. $g=1$. $R_2/g=R_2$ On mesure I_{1cc} réglé à partir de V_{1cc} de manière à ce que le moteur absorbe un courant nominal (ie. $I_{cc}=I_{nominal}$). On mesure V_{1cc} , I_{cc} , P_{1cc} . On en déduit S_1 , Q_1 puis R_2 et X . Sachant que la puissance active de R_0 sera très faible car la tension d'alimentation est très faible.

E- Caractéristique mécanique $C_u = f(\Omega)$, hypo vs hypersynchronisme

- Couple en fonction de la vitesse : Au démarrage $\Omega = 0$ Couple de démarrage va augmenter en passant par le couple utile maximum puis arriver au couple nécessaire dans la zone de pente négative (fonctionnement stable).



- **Cette machine est réversible (!)**. En effet, si on tourne plus vite que vitesse de synchronisme, le couple devient négatif alors que la vitesse est positive donc la puissance mécanique devient négative (le moteur fournit de l'énergie à l'extérieur). 27'42 . La machine fonctionne en génératrice.
- Lorsque on fonction entre 0 et Ω_s hyposynchronisme (resp. hypersynchronisme = génératrice) Cette machine est essentiellement utilisé en moteur. Donc raccordé au réseau. En génératrice, cette machine produit de la puissance active mais consomme de la puissance réactive a cause de l'inductance magnétisante.

F- Bilan de Puissance :

- **Puissance électromagnétique transmise** : Puissance absorbée moins les pertes stator.
Perte joule rotorique, perte méca. On peut négliger les pertes fers du rotor car il voit un champ tourner très lentement Ω_r .
Au delà de 4kW, on est en triphasé. Pour avoir un bon rendement, on passe en triphasé.
La puissance transmise entre stator et rotor : $P_{em} = C_{em} \Omega_s$. 43'00

G- Démarrage du moteur asynchrone :

- Au démarrage : $g=1$. Courant de démarrage entre 4 et 8 fois le courant nominal. C'est un courant qui dure quelques 100 ms. Cela entraine des chutes de tension dans la ligne : il faut pas quand on allume le moteur on éteigne la lumière des voisins 47' Solution pour limiter le courant de démarrage :
- **Démarrage rotorique** : Un modèle simple permet d'exprimer le couple au démarrage en fonction de R (cf.p968 Cap prepa PSI : $\Gamma_0 = \frac{\phi_0^2 R \omega_0}{2(R^2 + L^2 \omega_0^2)}$). On démarre avec quelques résistances pour augmenter le couple au démarrage : On peut aller chercher le couple maximum au moment du démarrage. Cette technique est utilisée pour les systèmes à fortes inertie (broyeur, scie à ruban). Ces résistances limitent le courant de démarrage !!! On gagne sur 2 tableaux : limitation du courant de démarrage et augmentation du couple !!!
- **Cage d'écureuil** : Au démarrage, la vitesse du rotor est nulle. Donc la différence de fréquence est importante. Donc les courant circulent dans la cage extérieure à cause de l'effet de peau. Or, le barreau extérieur a une résistance plus importante que le barreau intérieur. Donc les courants sont limités. Ensuite, la vitesse du moteur augmente et donc la différence de fréquence diminue et donc l'effet de peau diminue. Le gros conducteur est favorisé pour la circulation des courants car sa section est plus importante. Par conséquent, la résistance diminue. 50'00. Par effet de peau.
- **Démarrage étoile triangle** : On commence par courant en étoile. Pour alimenter sous tension réduite le couple étant proportionnel au carré de l'alim, il est divisé par 3. Cela implique une division du courant de démarrage par 3. On passe en triangle. Il faut 2 contacteurs avec temporisation. Pb, il y a un acoup. Il faut un couple résistant assez faible = Couple quadratique.

- **Démarrage statorique 1'03** : On démarre sous tension réduite en venant mettre en série des résistances cette fois ci au stator ce qui fait que le moteur voit une tension inférieure à celle du réseau. On a moins d'accoups.
- **Démarrage électronique 1'04** : On utilise de l'électronique de puissance. Gradateur triac pour faire varier la valeur efficace de la tension. Comme le couple est proportionnel au carré de la tension, cela diminue le couple. Démarrage en douceur. La encore, couple démarrage faible (pompe et ventilateur) 1'06. Gradateur (on appelle cela un triac...) : dispositif permettant de faire varier la tension efficace du réseau en jouant sur le rapport cyclique. Utilisé sur les lampes halogènes des salons.

H- 1'08

- Comment faire pour varier la vitesse d'une machine asynchrone : Il faut modifier la fréquence. Il faut un variateur de vitesse alimenté par le réseau → continu redresseur On filtre pour avoir du continu et on découpe avec un onduleur pour fabriquer un réseau de tension à fréquence variable.
- Moteur alimenté par un réseau 400V. Ces moteurs pour des pb de démarrage est alimenté par un démarreur étoile triangle. <https://sitelec.org/animations2.htm>
- Vélo classique : 14'44. ~~Dynamo~~. Alternateur : machine synchrone fonctionnant en alternateur.

IV- Rails de Laplace (7min)

- https://www.youtube.com/watch?v=QK_irRFTM-U
- **Intérêt** : Une expérience simple (car géométriquement simple) permet de mettre en évidence le principe des moteurs / générateurs. Expérience à visée pédagogique pour comprendre avec des équations simples. Retrouver les lois du moteurs A courant continu. Montrer que l'on est capable d'orienter un circuit correctement !
- **P502 Cap prepa PSI** :
- **Fonctionnement en générateur** : Un opérateur tire sur la barre. (moteur, turbine entraînée par un barrage). D'après les lois de l'induction, force électromotrice est créée. Loi de lenz, l'induction, par ses effets, tant à s'opposer aux causes qui lui ont donnée naissance. Résistance à la traction donc force (heureusement car si pas de force, pas de puissance, et pas de conversion de puissance). La puissance exercée par l'opérateur, où va -t-elle se transmettre ? Eh bien sous une forme électrique $P_e = e i$ avec e la force électromotrice (comme s'il y avait une force dans le circuit) !
- **Fonctionnement en moteur** : On met un générateur. On se dit que c'est bête, la puissance du générateur va être convertie en effet joule. Non car présence d'un champ magnétique et courant + champ magnétique = Force de laplace. Une partie de la puissance électrique va être convertie en puissance mécanique. La puissance mécanique va engendrer un mouvement donc un champ électromoteur (induction de Lorentz) donc une force électromotrice. Loi de lenz elle s'oppose à la source de courant.
On obtient les formules suivantes : $e = -vBl$ et $F = ilB$ ex. Qui seront similaire dans une certaine mesure à celles du moteur à courant continu.

