

LES MACHINES SYNCHRONES



OBJECTIFS

- Connaître le principe du champs tournant.
- Comprendre le fonctionnement en générateur synchrone (alternateur).
- Comprendre le principe et l'utilisation du moteur synchrone.

Prérequis:

- ELT 1
- Électricité 2

public cible:

- 2^{ième} année Génie industriel et maintenance.

CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT

Rotating Magnetic Field

Principle of AC Motors

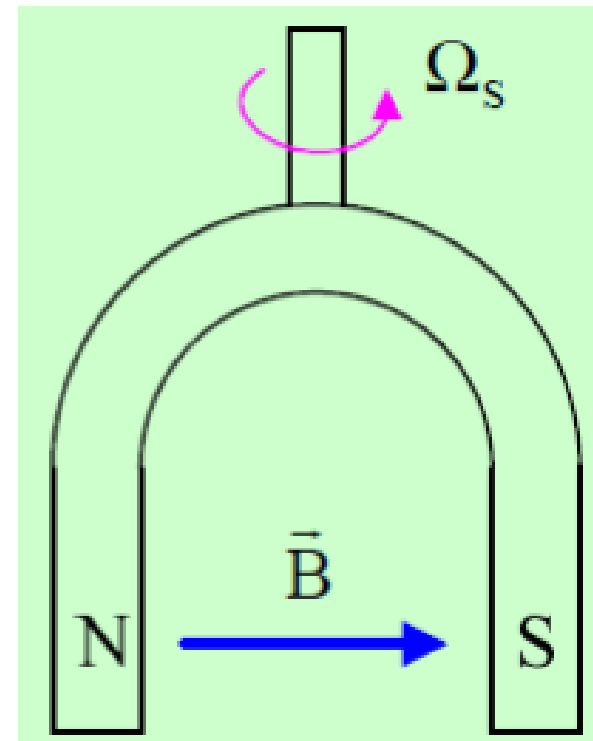


Special Thanks
Sajith K V

www.LearnEngineering.org

Champ tournant produit par un aimant

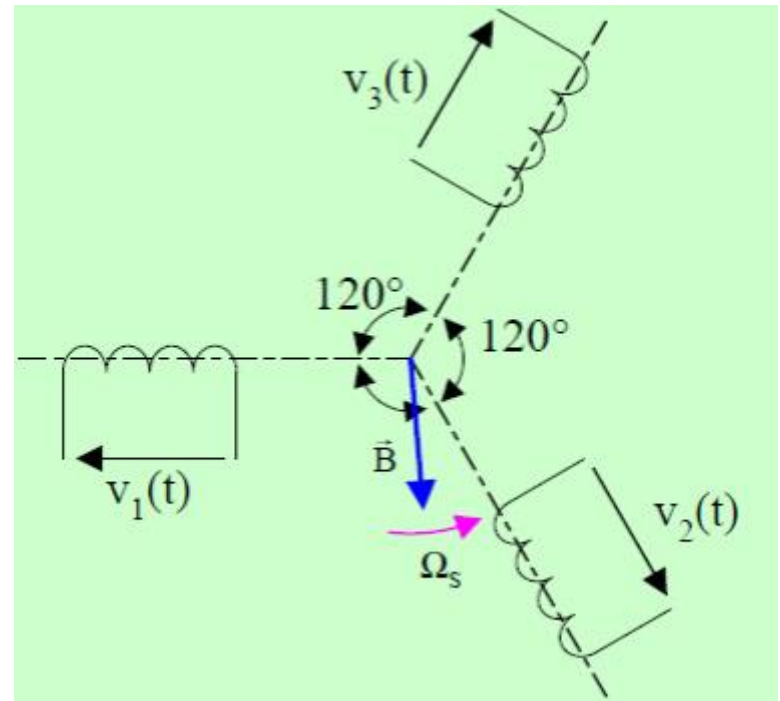
- Le champ magnétique “tournant” est caractérisé par sa vitesse de rotation Ω_s .



Champ tournant produit par un système triphasé

- Soit trois bobines alimentées par un système de tensions triphasées :
- Au centre, le champ magnétique résultant est un champ tournant.
Vitesse de rotation :

$$\Omega_s = \omega = 2\pi f$$

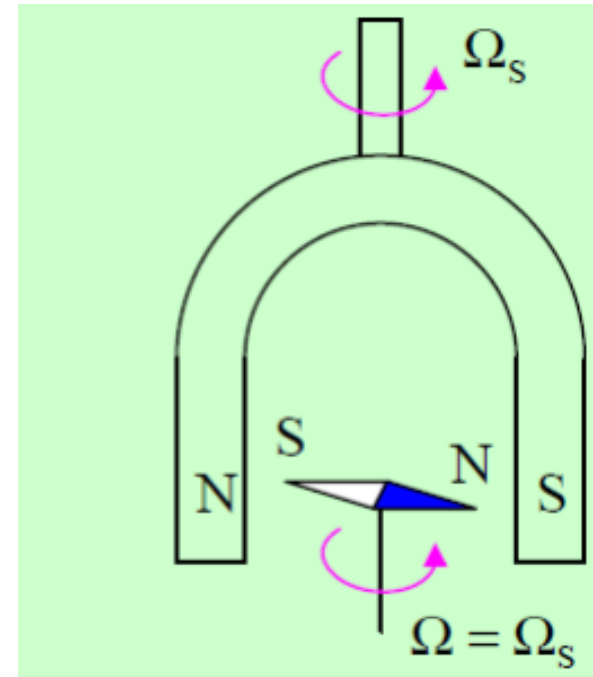


- **Principe de la machine synchrone**

Les mouvements de l'aimant et de l'aiguille aimantée sont ***synchrones*** :

$$\Omega = \Omega_s$$

C'est pour cela que Ω_s est appelée ***vitesse de synchronisme***.



Principe de la machine synchrone triphasée

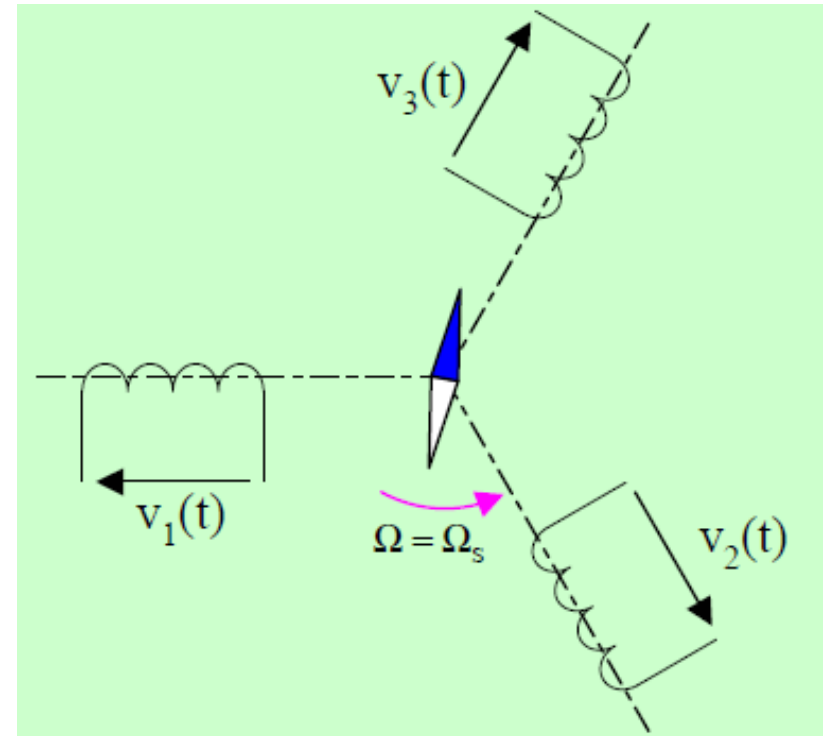
- L'aiguille (le rotor) tourne à la vitesse de synchronisme :

$$\Omega = \Omega_s = \omega = 2\pi f$$

C'est le principe de

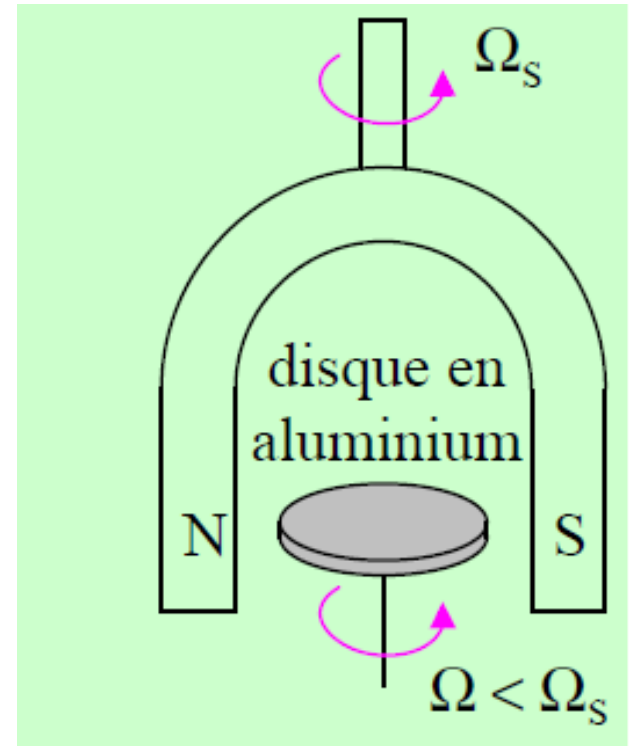
fonctionnement

du **moteur synchrone**.



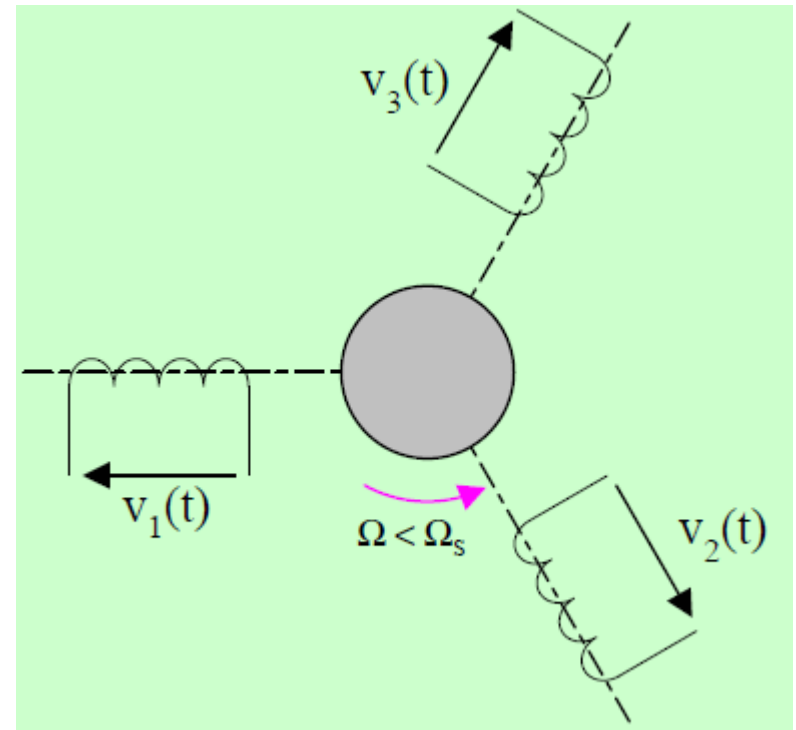
Principe de la machine asynchrone

- Remplaçons l'aiguille aimantée par un disque conducteur non ferromagnétique :
- On constate que le disque tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme.
Les deux mouvements sont *asynchrones*.



Principe de la machine asynchrone triphasée

- Pour $f = 50$ Hz, le disque (le rotor) tourne à une vitesse un peu inférieure à 50 tr/s.
C'est le principe de fonctionnement du **moteur asynchrone**.



La Machine Synchrone Triphasée

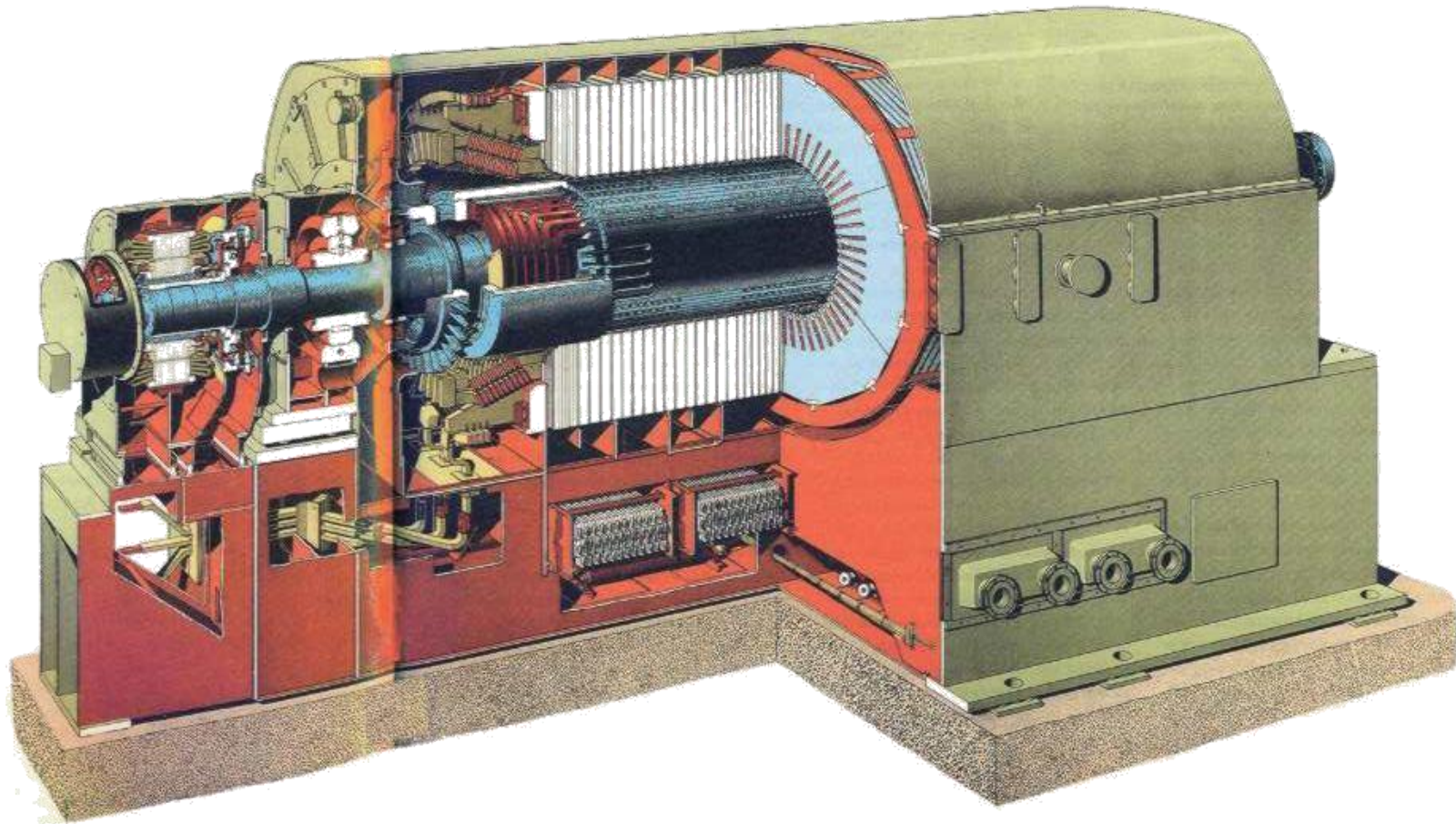
DEFINITION

- La machine synchrone est une machine à champ magnétique tournant qui présente $2p$ pôles magnétiques au rotor ainsi qu'au stator. p représente le nombre de paires de pôles (p pôles nord et p pôles sud).
- La vitesse de rotation n du rotor dépend directement de la fréquence f de la tension d'alimentation, on parle de vitesse de synchronisme.



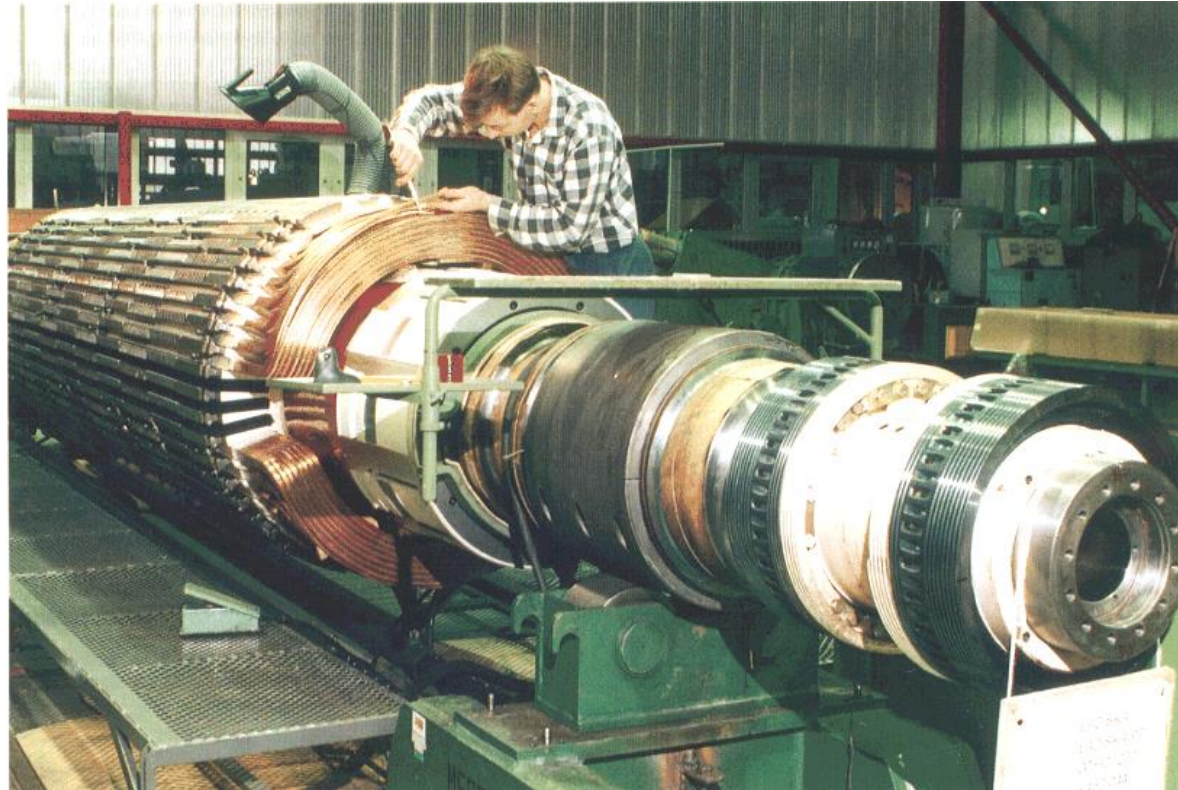
www.LearnEngineering.org

CONSTITUTION



Rotor

Au rotor, nous avons
l'inducteur (ou excitation).
C'est un aimant ou un
électroaimant alimenté en
courant continu par
l'intermédiaire de balais.
L'inducteur crée un champ
tournant.



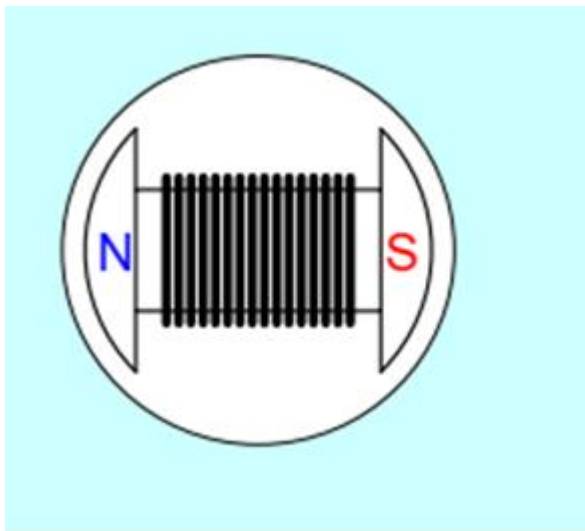
- Deux grandes catégories de machines synchrones :
 - **Machines à pôles saillants (roue polaire)**

Le rotor est caractérisé par son

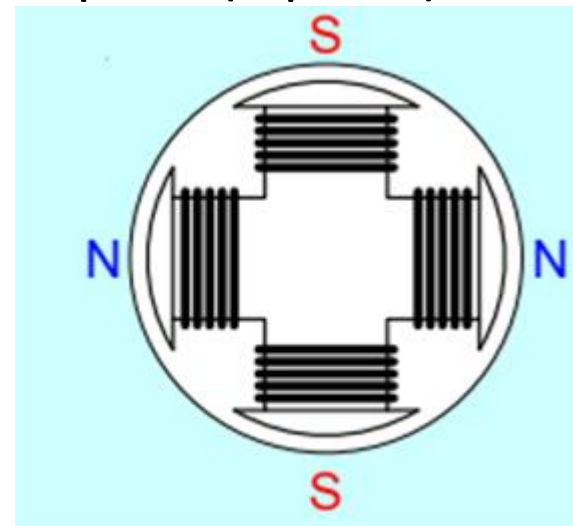
nombre de paires de pôles p :



$p = 1$ (2 pôles)

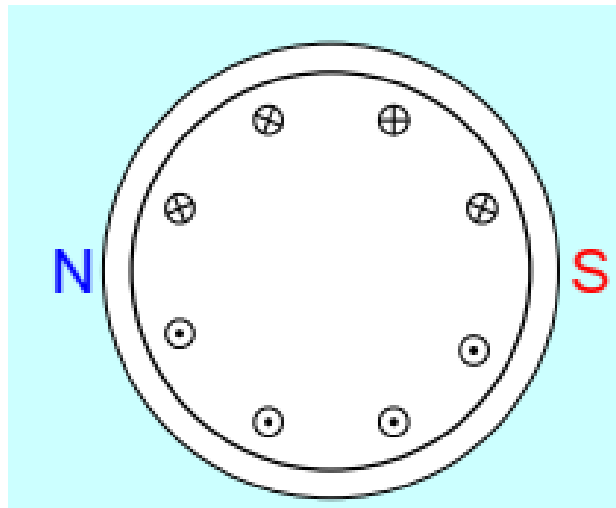


$p = 2$ (4 pôles)



- **Machines à pôles lisses**

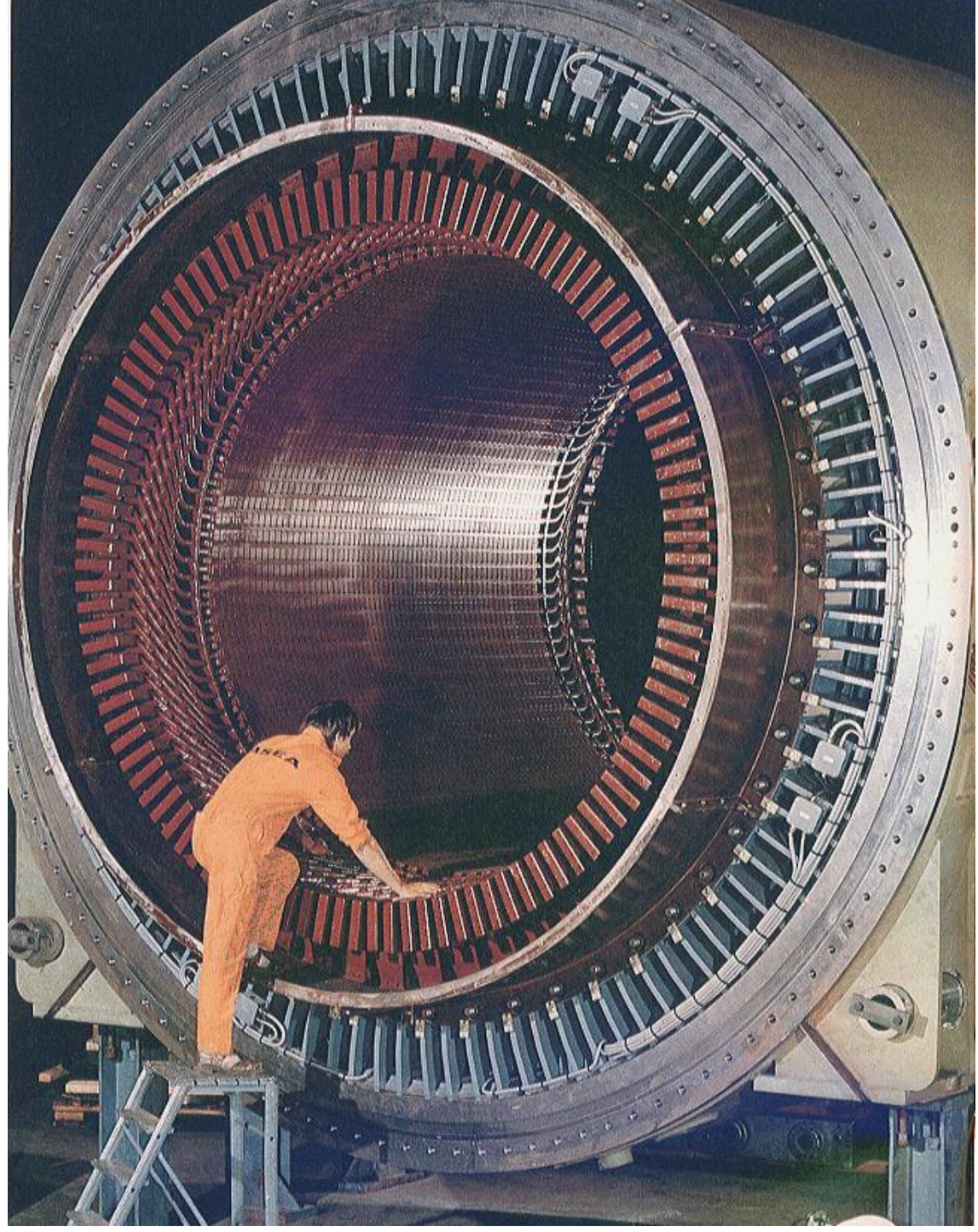
$p = 1$ (2 pôles)



STATOR

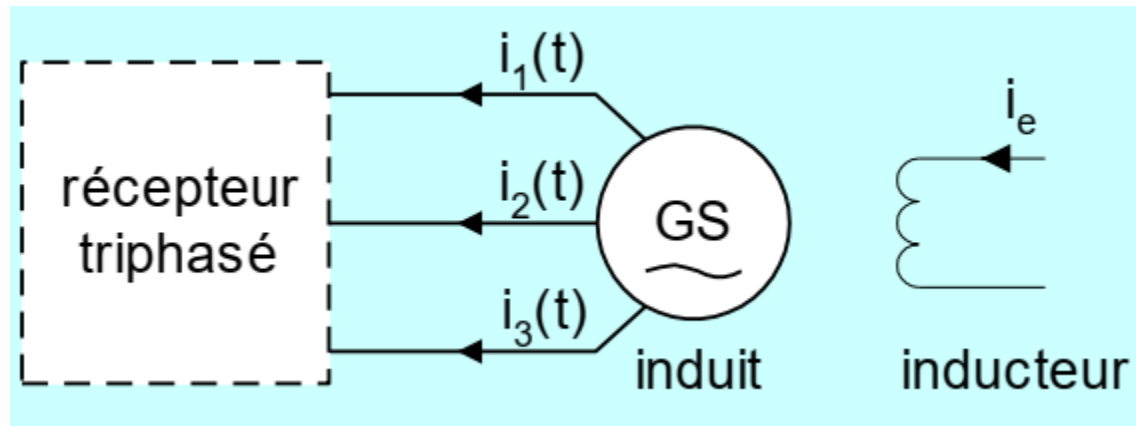
- Au stator, nous avons l'induit (circuit de puissance).

Ce sont trois enroulements décalés de 120°



Fonctionnement en génératrice : alternateur

- La *génératrice synchrone* est plus connue sous le nom d'*alternateur*.



- Un système mécanique entraîne le rotor.
- Il y a création d'un système de tensions triphasées dans les enroulements du stator

Relation entre vitesse de rotation et fréquence des tensions et courants

$$f = \frac{p \times n}{60}$$

avec :

f : fréquence (en Hz)

n : vitesse de rotation (en tr/min)

p : nombre de paires de pôles (nombre de pôles /2)

Pour avoir 50 Hz

p	n (tr/s)	n (tr/min)	Ω (rad/s)
1	50	3000	314
2	25	1500	157
3	16,7	1000	105
4	12,5	750	79
25	2	120	12,6
50	1	60	6,3

Remarques

La production de l'énergie électrique se fait avec des alternateurs de grandes puissances (jusqu'à 1450 MW) :

- **turboalternateurs** de centrales thermiques
(à pôles lisses : $p = 2$ ou 1)
- **hydroalternateurs** de barrages hydrauliques
(à pôles saillants : $p \gg 1$)

Ex. pour avoir $f = 50$ Hz :

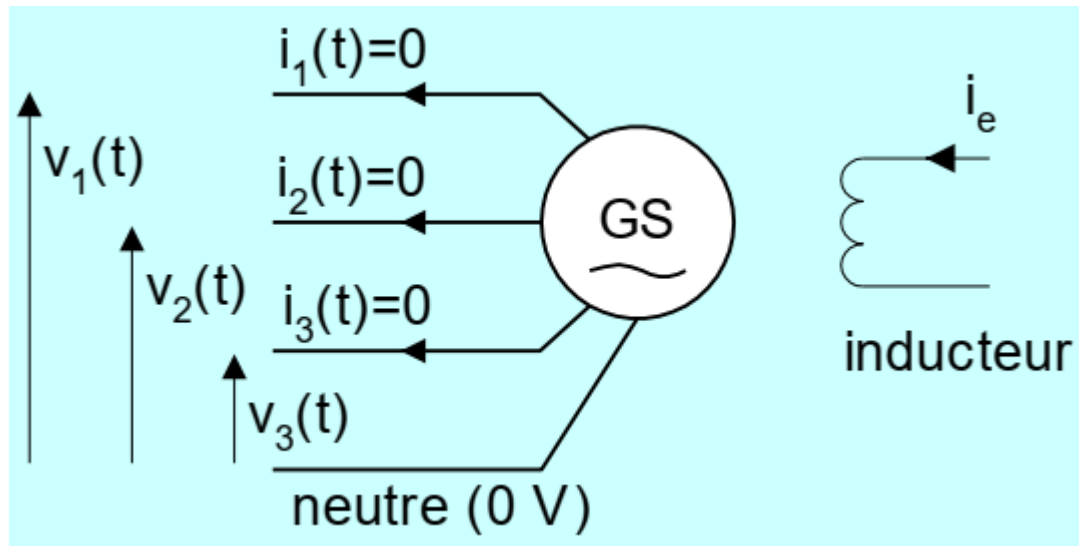
- turboalternateur ($p = 2$) à 1500 tr/min
- hydroalternateur ($p = 40$) à 75 tr/min

Etude de l'alternateur

- **Fonctionnement à vide**

- A vide, les tensions générées correspondent aux **fém.** induites dans les bobinages du stator par le champ tournant du rotor :

$$V_i(t) = e_i(t)$$



- Valeur efficace des *fém.* induites

$$E = K N f \Phi$$

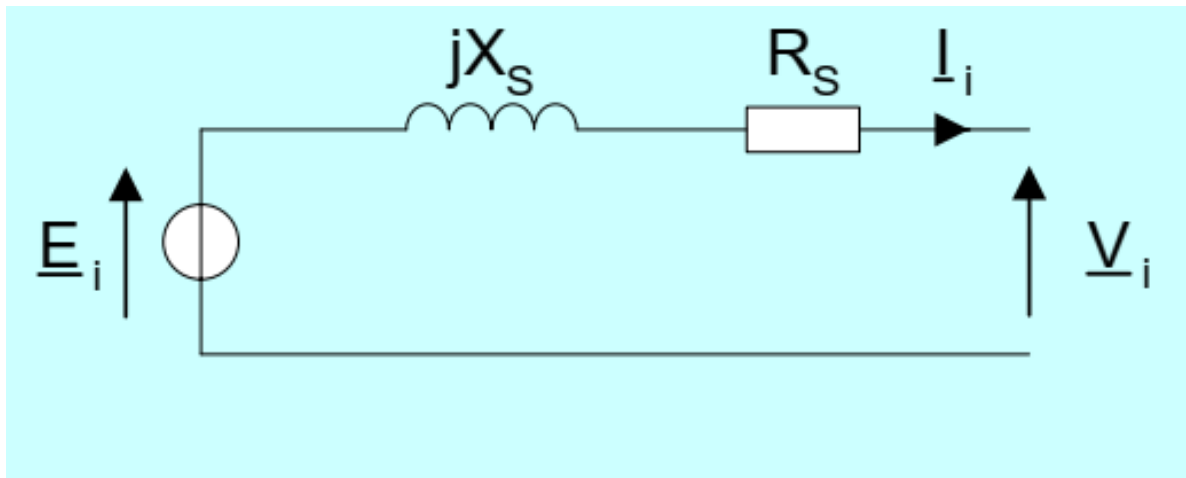
- E : *fem* en volts (aux bornes d'un enroulement statorique)
- Φ : flux produit par un pôle de l'inducteur (en Wb)
- N : nombre de conducteurs d'un enroulement statorique
- K : coefficient de Kapp (environ 2,22)
- Quand le circuit magnétique n'est pas saturé, Φ est proportionnel au courant inducteur i_e

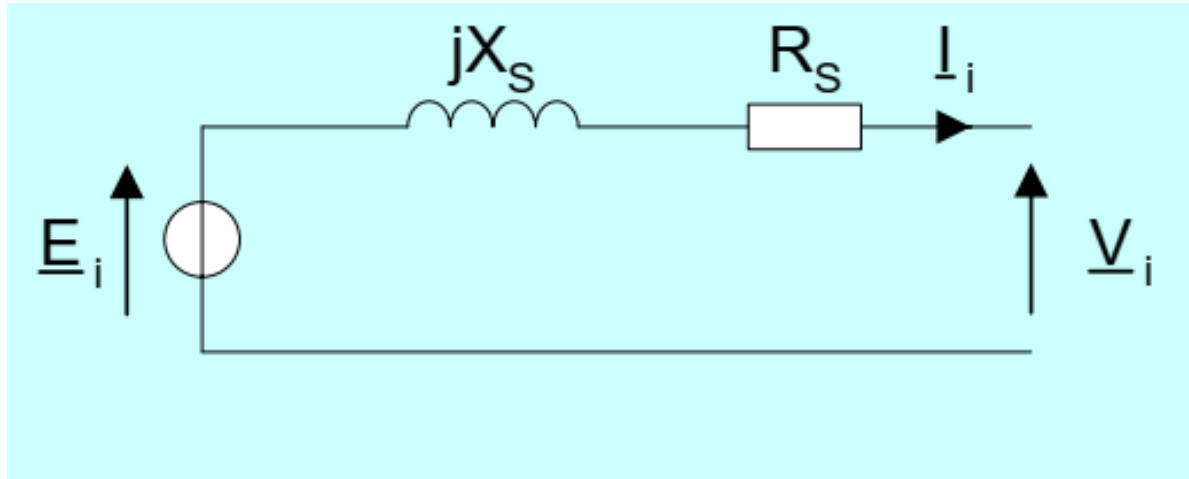
Fonctionnement en charge

Modèle électrique équivalent

Hypothèse :

- circuit magnétique non saturé.
- Au stator, le régime est sinusoïdal.
- On utilise la notation complexe ou les vecteurs de Fresnel.
Pour la phase i :





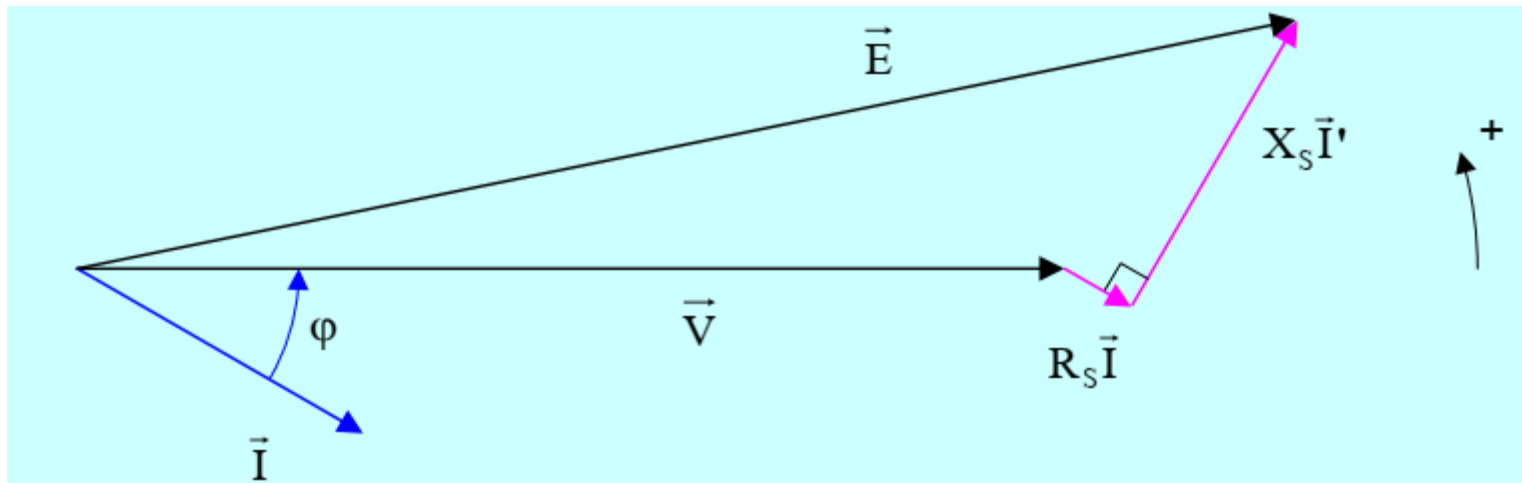
- \underline{E} : fém. induite (ou ***fém. synchrone***)
- \underline{I} : courant de ligne
- \underline{V} : tension simple
- R_s : résistance d'un enroulement statorique (couplage Y)
- $X_s = L_s \times \omega$: réactance ***synchrone*** d'un enroulement statorique

- **Remarques**

X_s est proportionnelle à la vitesse de rotation.

En pratique, on peut négliger R_s devant X_s

Représentation vectorielle : diagramme de Behn-Eschenburg



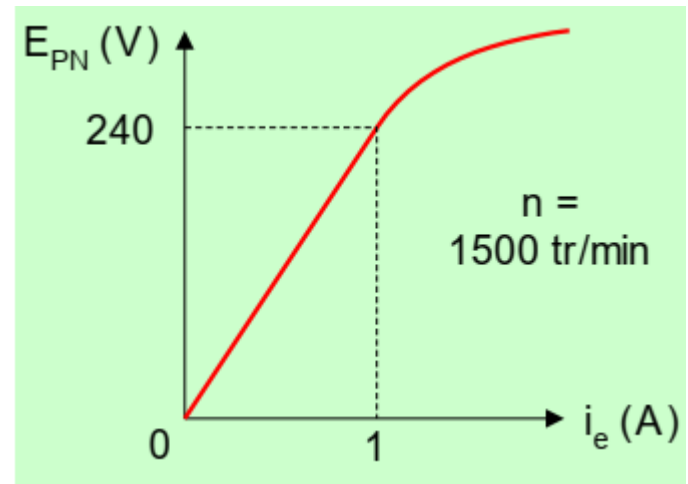
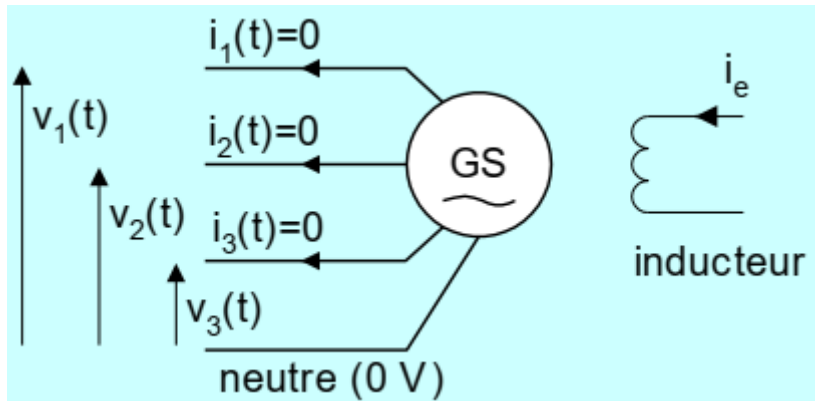
$$\vec{V} = \vec{E} - (R_s \vec{I} + X_s \vec{I}')$$

- Chute de tension en charge : $\Delta V = E - V$

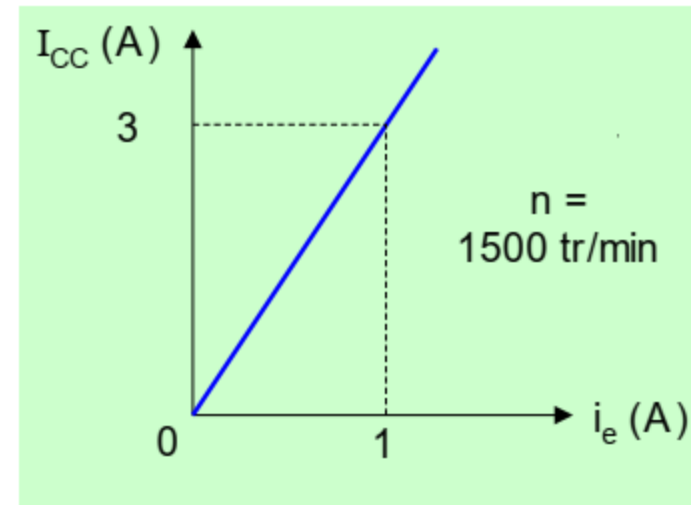
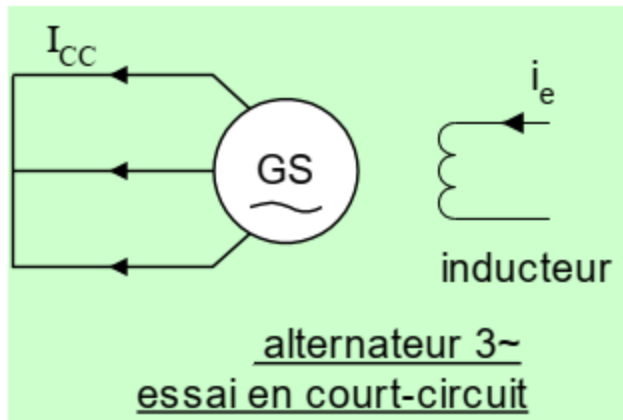
Détermination expérimentale des éléments du modèle équivalent

- **R_s** se mesure avec la méthode voltampéremétrique (à chaud) en courant continu.

- **Essai à vide**



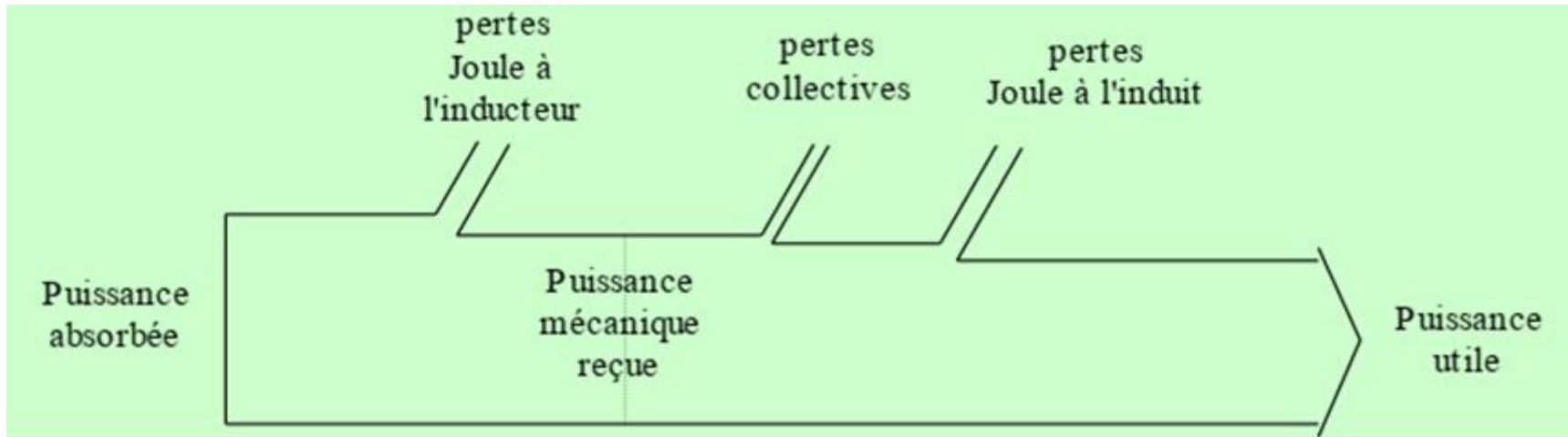
• Essai en court-circuit



$$X_s = \frac{E_{PN}}{I_{CC}}$$

- E_{PN} : fém à partir de la caractéristique à vide $E(i)$
- I_{CC} : courant de court-circuit dans l'induit de l'alternateur correspond au même I de E_{PN} à $n = \text{cst}$

Bilan de puissance de l'alternateur



- **Puissance absorbée = puissance mécanique reçue + puissance électrique consommée par l'inducteur**
- **Puissance utile = puissance électrique fournie à la charge triphasée**

- **Pertes Joule**

- *dans l'induit*: $3R_s \times I^2$ (R_s résistance d'une phase de l'induit)

- $\frac{3}{2}R_s \times I^2$ (R_s résistance mesurée entre 2 bornes de l'induit)

- *dans l'inducteur*: $u \times i = r \times i^2$

- r : résistance de l'inducteur

- u : tension de l'inducteur et i : courant de l'inducteur

- **Les pertes constantes (collectives) :**

- Ces pertes sont déterminées lors de l'essai à vide et représentent les pertes mécaniques et magnétiques de l'alternateur.

- **Rendement**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi + \sum \text{pertes}}$$

LE MOTEUR SYNCHROME

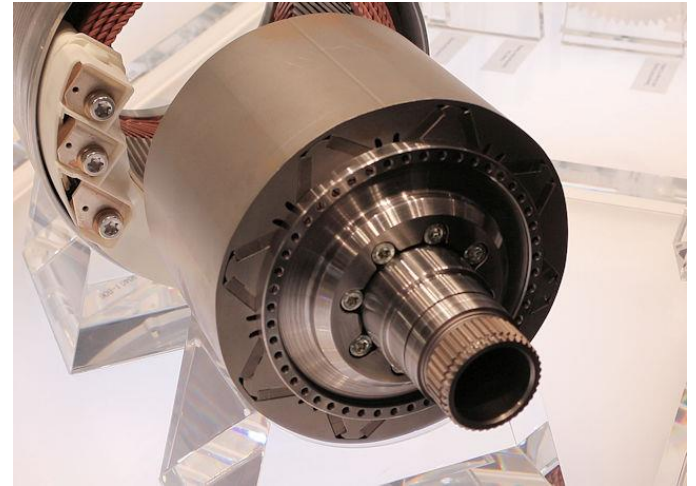
- Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor.
- *Après le démarrage*, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge. On notera aussi que :
 - ✓ La charge ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
 - ✓ Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes.



On distingue donc deux types de moteurs :

- **Rotor à aimant permanent**

Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple).



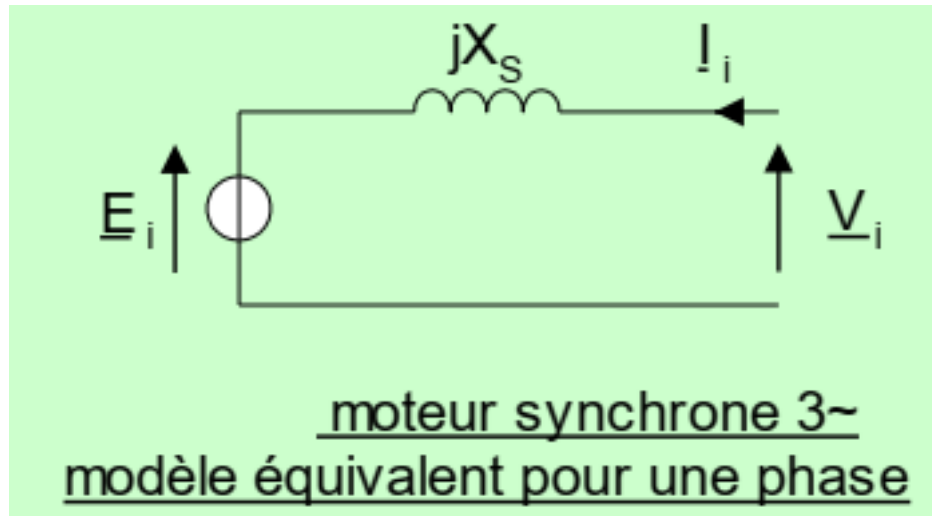
- **Rotor bobiné**

Ce type de machines est réversible car elles peuvent fonctionner en régime moteur comme en régime alternateur. Pour les moyennes et grosses puissances, les moteurs synchrones à rotor bobiné, associé avec un variateur de vitesse, sont des machines performantes.



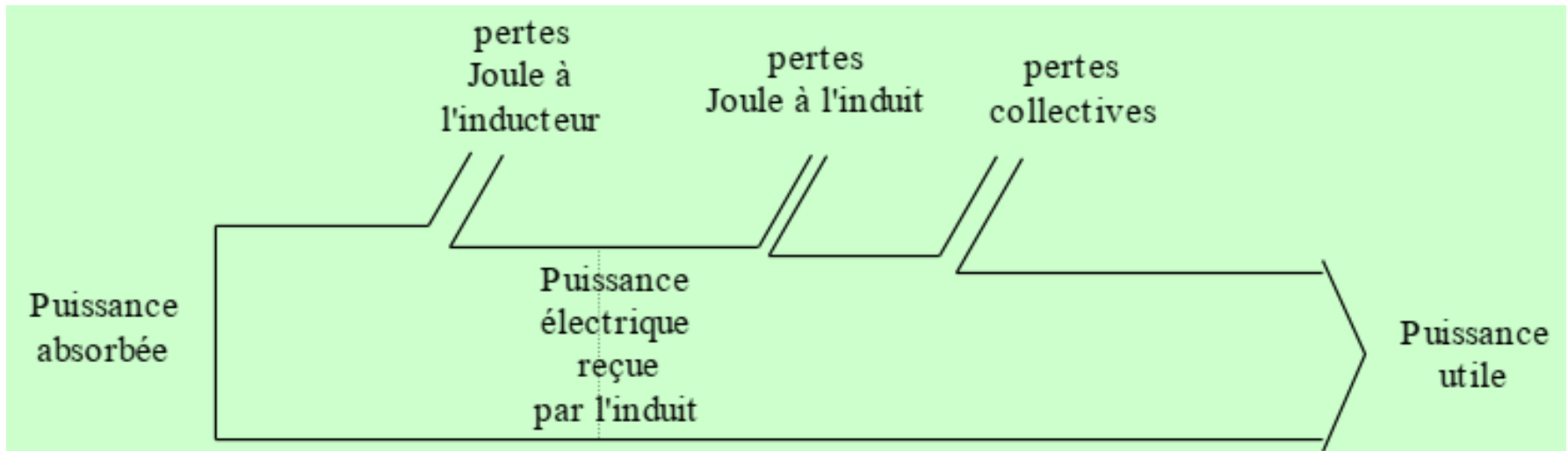
Modélisation du moteur synchrone triphasé

- La machine synchrone est réversible.
 - Modèle équivalent (en négligeant R_s)



$$\vec{V} = \vec{E} + X_s \vec{I}'$$

Bilan de puissance du moteur synchrone triphasé



$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{T_u \cdot \Omega \text{ (puissance mécanique)}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi + \text{pertes Joule inducteur}}$$

❑ Régulation de fréquence

- Le pilotage de la vitesse des moteurs synchrones se fait électroniquement grâce à des **variateurs de vitesse**. Vu la nécessité pour un moteur synchrone d'être démarré avec un système auxiliaire (le rotor ne peut pas "accrocher" un champ tournant statorique trop rapide de 3000 [tr/min]), le variateur de fréquence associé au moteur synchrone permet de le démarrer avec une fréquence statorique faible voire nulle.
- Sans perte de puissance, on peut piloter la vitesse de rotation du moteur en faisant varier la fréquence et la tension car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change.
- A remarquer que le couple d'un moteur synchrone ne change pas en fonction de la vitesse puisqu'il n'y a pas de glissement.
- Le pilotage du moteur synchrone par un variateur de fréquence montre des intérêts certains; à savoir principalement :
 - ✓ La limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal),
 - ✓ Un couple constant quelle que soit la vitesse du moteur.

Références

1. Champ magnétique tournant, Fabrice Sincère, IUT QLIO.
2. <https://www.youtube.com/user/LearnEngineeringTeam>
3. La machine synchrone triphasée, Fabrice Sincère, terminale STI.
4. <https://sites.uclouvain.be/energie-plus/index.php?id=11531#c6748+c6749+c6750+c6751>