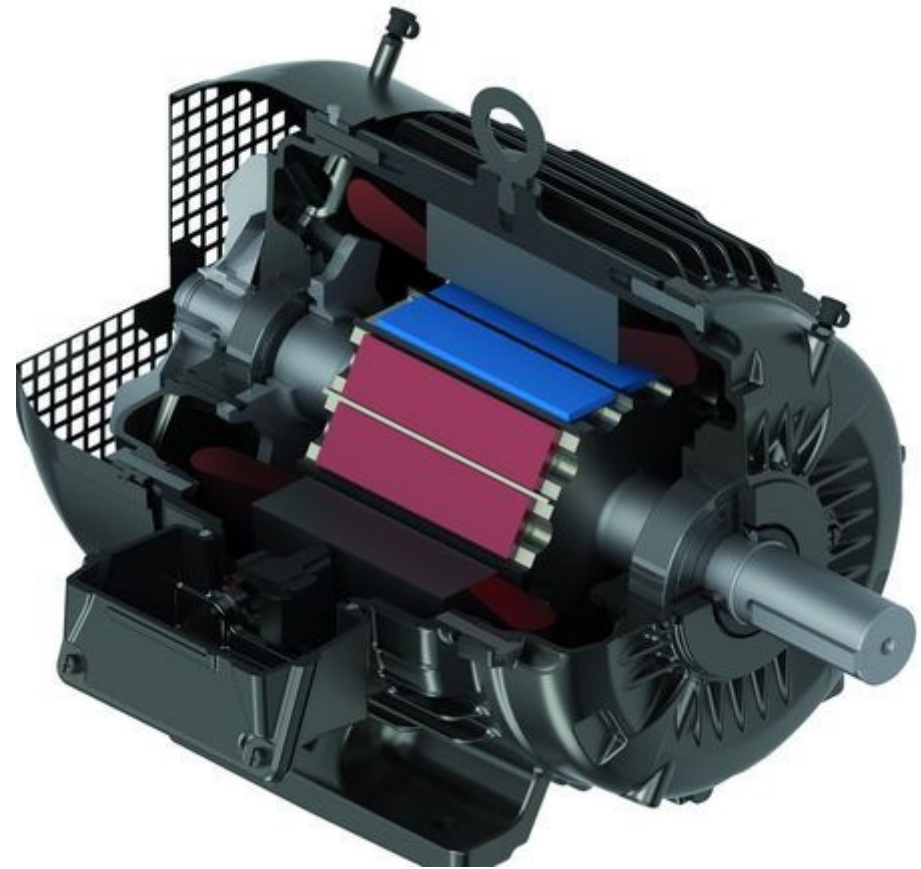


ELECTROTECHNIQUE

Chapitre 6 : Machine synchrone triphasée



Alternateur synchrone triphasé

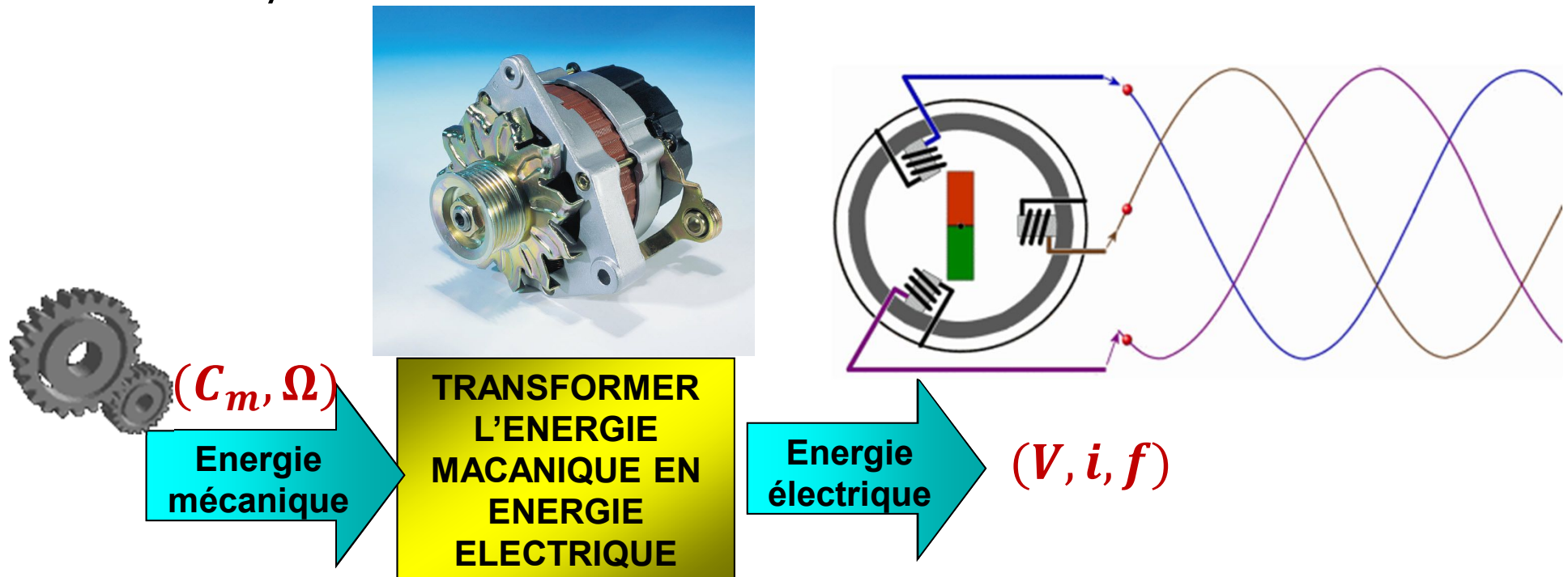


Moteur synchrone triphasé

Machine asynchrone triphasée

Introduction:

- La machine asynchrone est le plus souvent utilisée en génératrice, on l'appelle alors alternateur. Les centrales de production d'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés;
- La machine asynchrone est réversible et peut également fonctionner en moteur asynchrone. Son rendement est excellent.



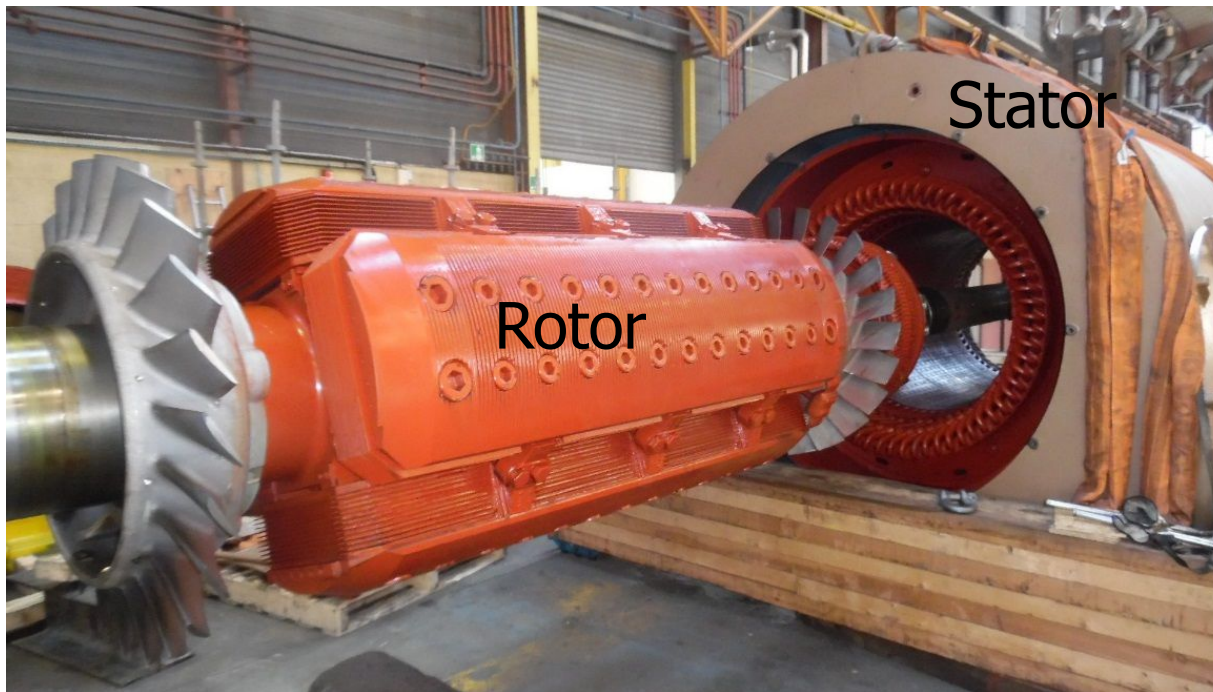
Pertes mécaniques + Pertes Fer + Pertes Joules

Machine asynchrone triphasée

1. Fonctionnement en génératrice: alternateur

1.1. Constituants:

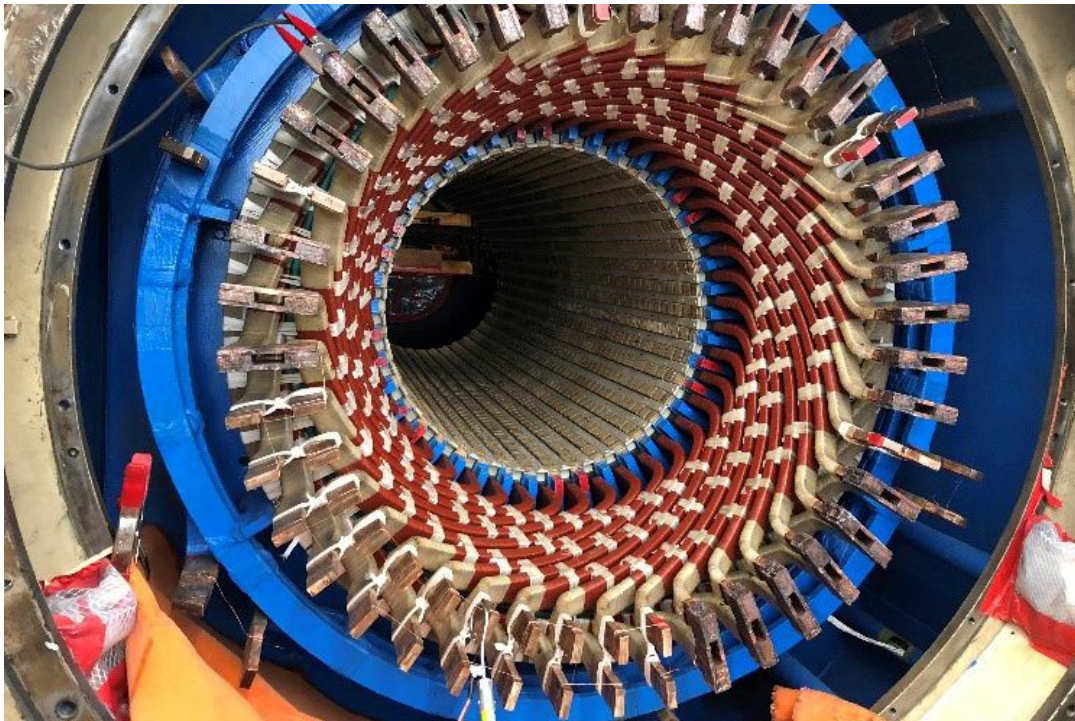
- En fonctionnement génératrice, elle est entraînée par un dispositif mécanique pour produire de l'énergie électrique alternative dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation;
- Une machine synchrone est constituée d'un stator et d'un rotor.



Machine asynchrone triphasée

Le stator ou induit:

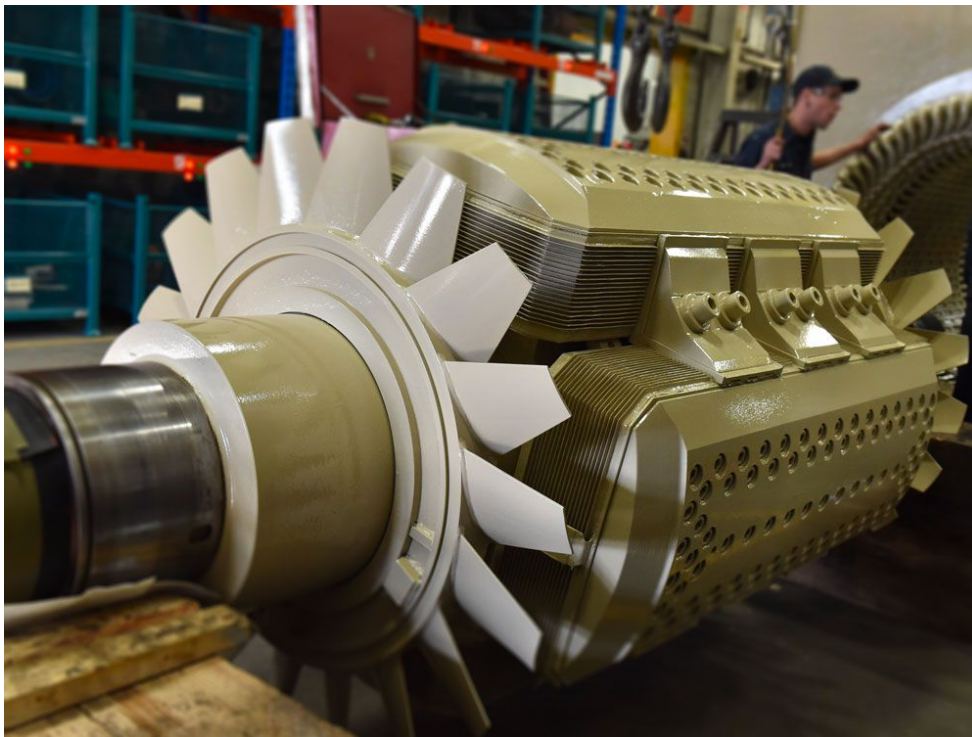
- Formé par un empilage de tôles ferromagnétique feuilleté. La partie interne tournée vers l'entrefer est encochée et porte un bobinage triphasé à $2p$ pôles par phase. C'est dans ce bobinage que sont créés des forces électromotrices induites.
- Le bobinage du stator triphasé comprend trois enroulements décalés l'un par rapport à l'autre de 120° , généralement couplé en étoile.



Machine asynchrone triphasée

Le rotor ou inducteur (roue polaire):

- Porte p pôle nord et p pôle sud (succession de pôles alternativement nord et sud), il est constitué d'un bobinage (électro-aimant) enroulé sur le rotor et alimenté par le courant continu appelé courant inducteur ou courant d'excitation I_e . Le rotor crée le champ magnétique et le flux magnétique inducteur dans le circuit magnétique;

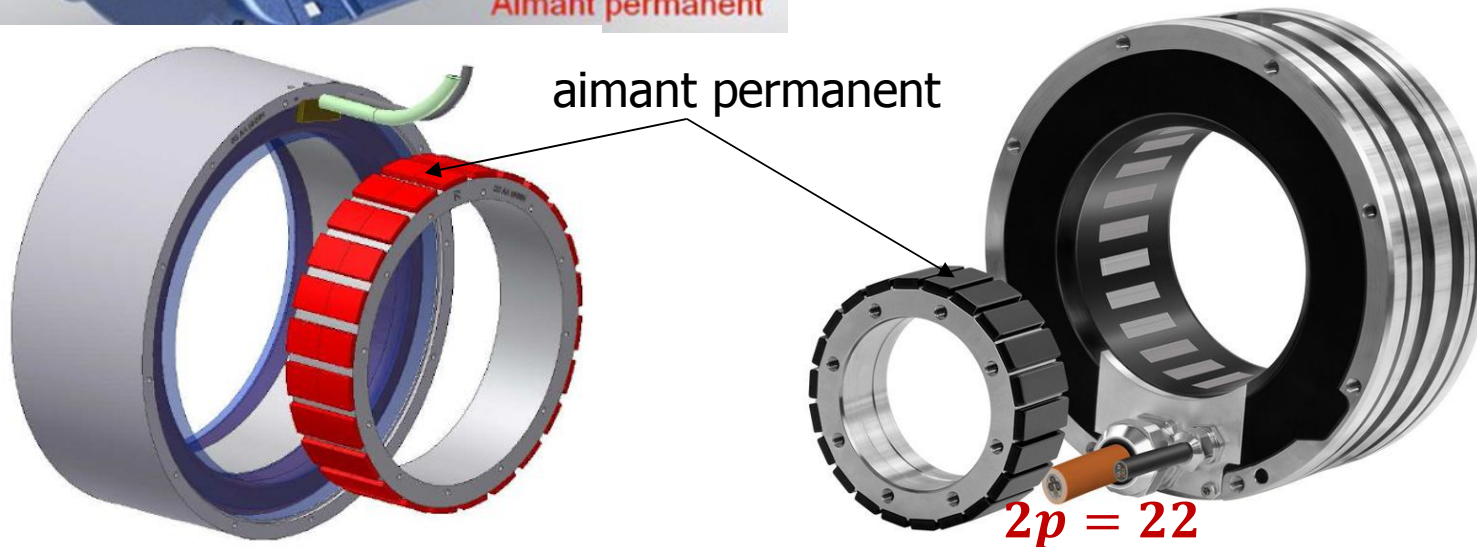
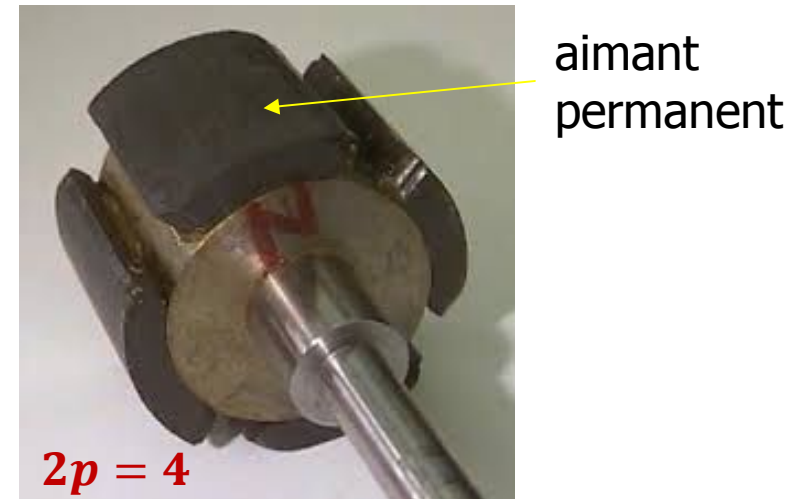
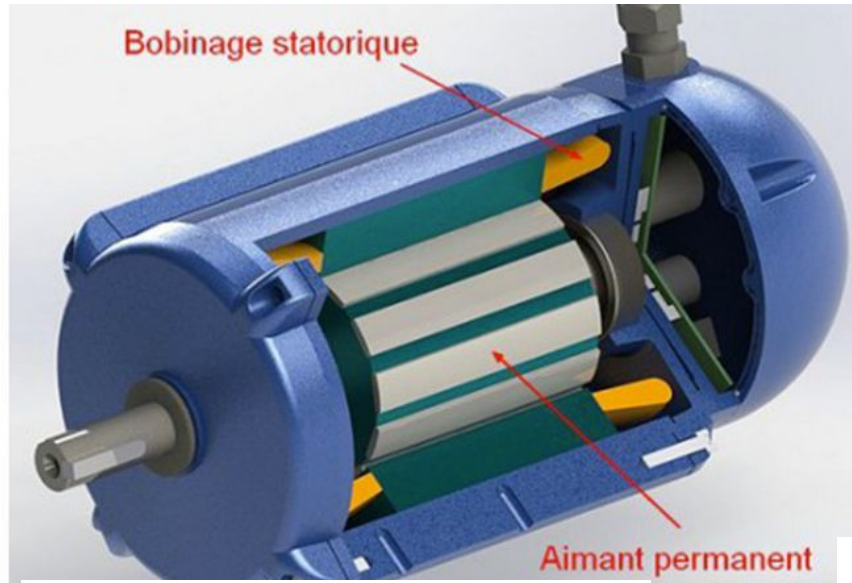


www.shutterstock.com · 1478955608

Rotor à $2p = 4$ pôles magnétiques

Machine asynchrone triphasée

- Ce bobinage est parfois remplacé par des aimants permanents surtout dans le domaine des petites et moyennes puissances.

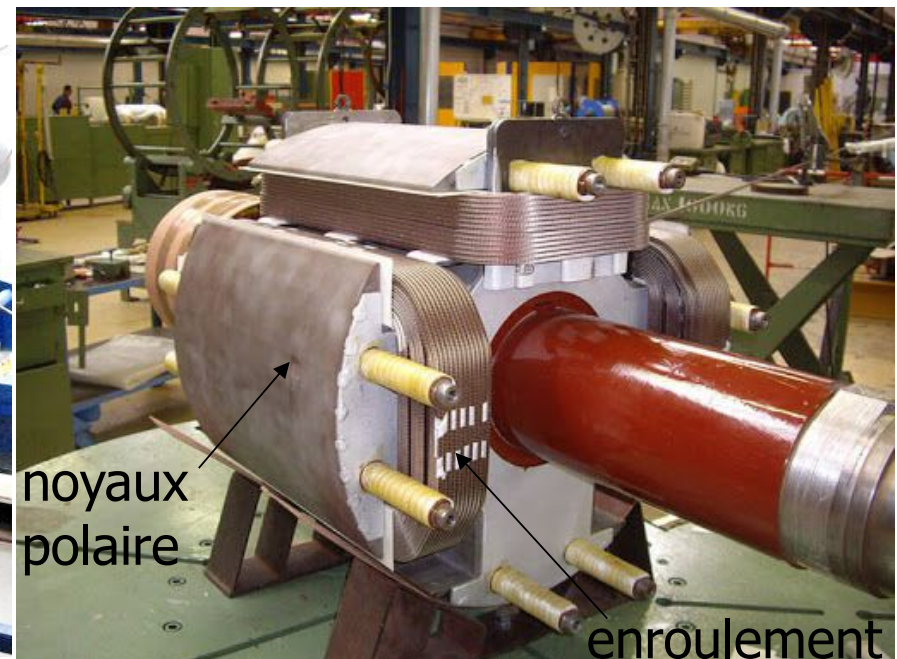
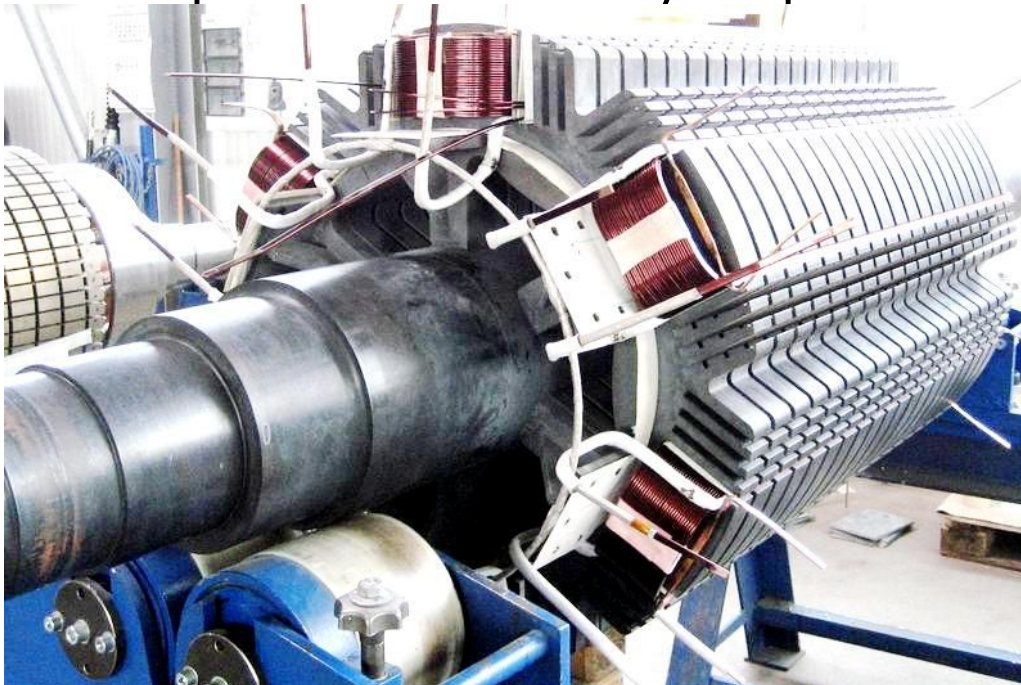


Machine asynchrone triphasée

1.2. Technologie de l'alternateur: Le rotor

Rotor à pôles saillants:

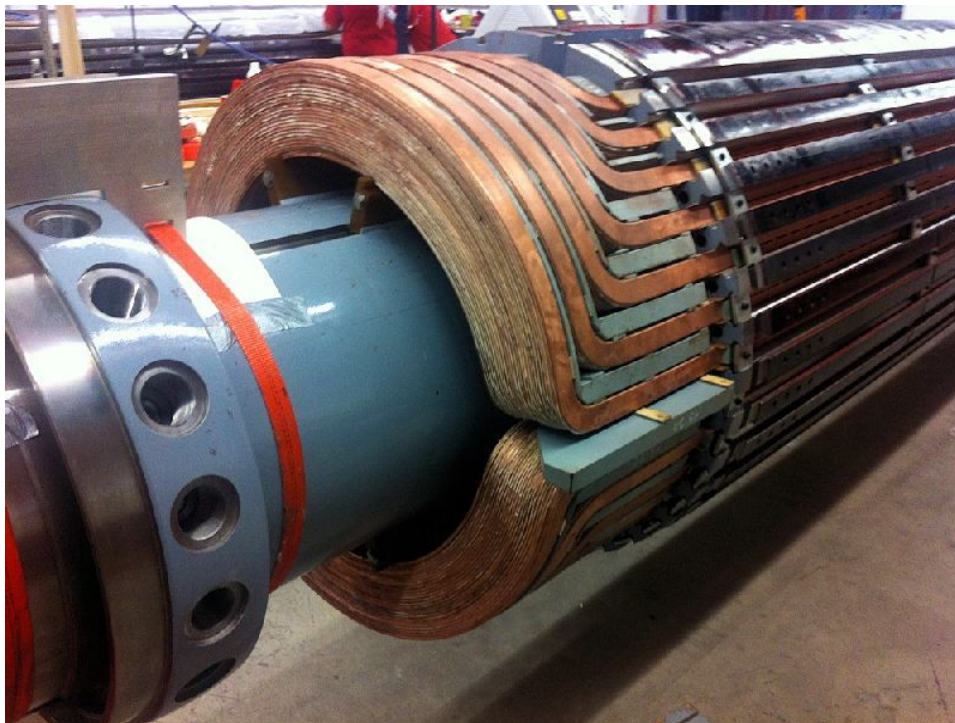
- Une machine à pôles saillants (dont l'entrefer est variable) est utilisée pour les faibles vitesses du rotor, grand couple (centrales hydrauliques); elle a plusieurs paires de pôles correspondants aux différentes vitesses des turbines;
- Les pôles sont solidaires de l'arbre, chaque pôle possède un enroulement est placé autour des noyaux polaires.



Machine asynchrone triphasée

Rotor à pôles lisses:

- Une machine à pôles lisses est utilisée pour les grandes vitesses (turboalternateurs des centrales thermiques ou des centrales nucléaires à 2 ou 4 pôles);
- Le rotor est un cylindre plein (dont l'entrefer est constant), les spires des enroulements sont logées dans des encoches pratiquées sur le rotor.



Machine asynchrone triphasée

Structure d'une machine à 2 paires de pôles au stator et au rotor. Le stator comporte deux bobines par phase et par suite deux paires de pôles par phase.

Exemple:

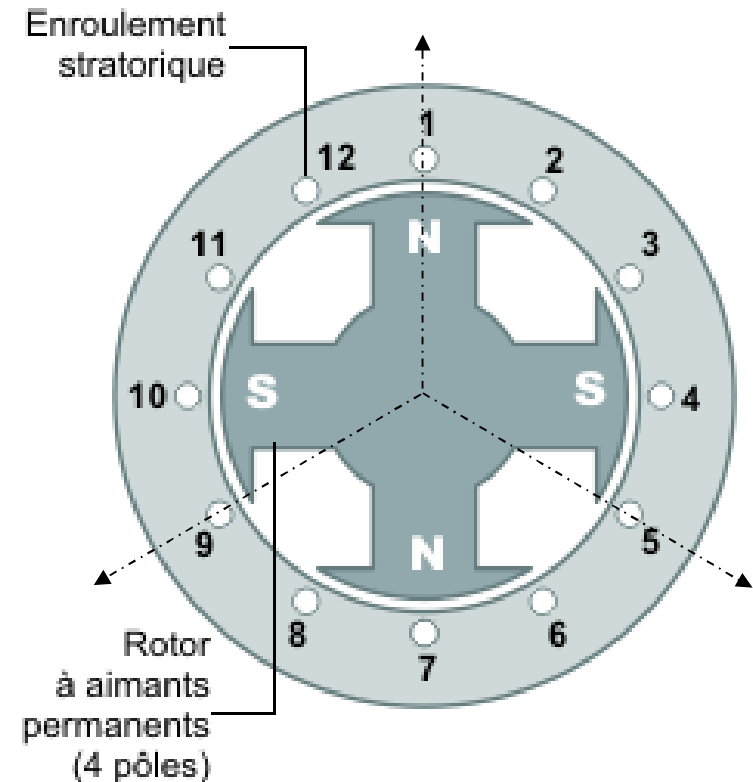
Stator à 12 encoches régulièrement réparties;
On dispose donc de 4 encoches par phase, soit 2 paires d'encoches par phase d'enroulement:

- Phase 1: bobinage diamétral 1-7 en série avec 4-10;
- Phase 2: bobinage diamétral 5-11 en série avec 2-8;
- Phase 3: bobinage diamétral 3-9 en série avec 6-12.

Les enroulements du stator sont décalés de 60° .

Remarque: compte tenu de la puissance, la vitesse de rotation de la turbine impose le nombre de paires de pôles:

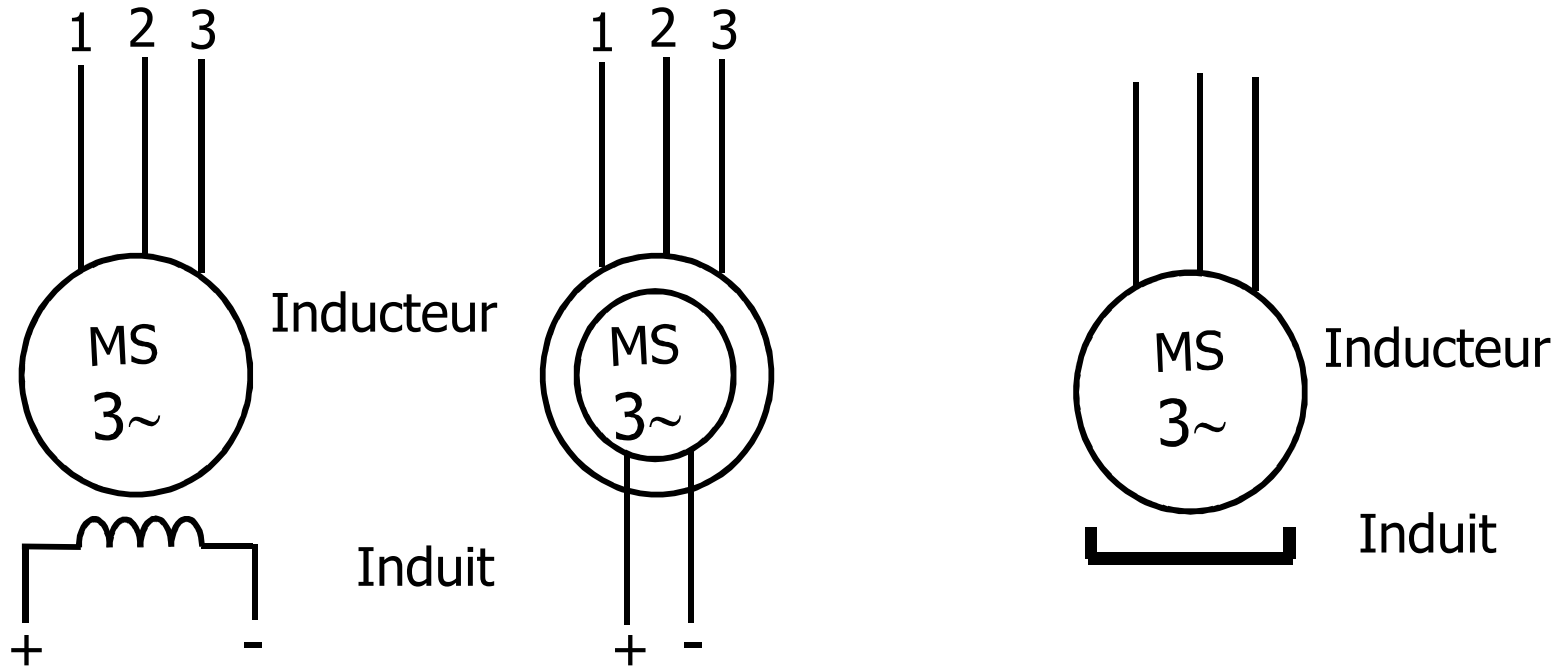
- ✓ Turbines à vapeur, $3000tr/min \Rightarrow p = 1$,
- ✓ Turbines hydrauliques de haute chute, $1000tr/min \Rightarrow p = 3$, au fil de l'eau $300tr/min \Rightarrow p = 10$



Machine asynchrone triphasée

1.3. Symboles de la machine synchrone

Les symboles utilisés pour représenter la machine synchrone, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice



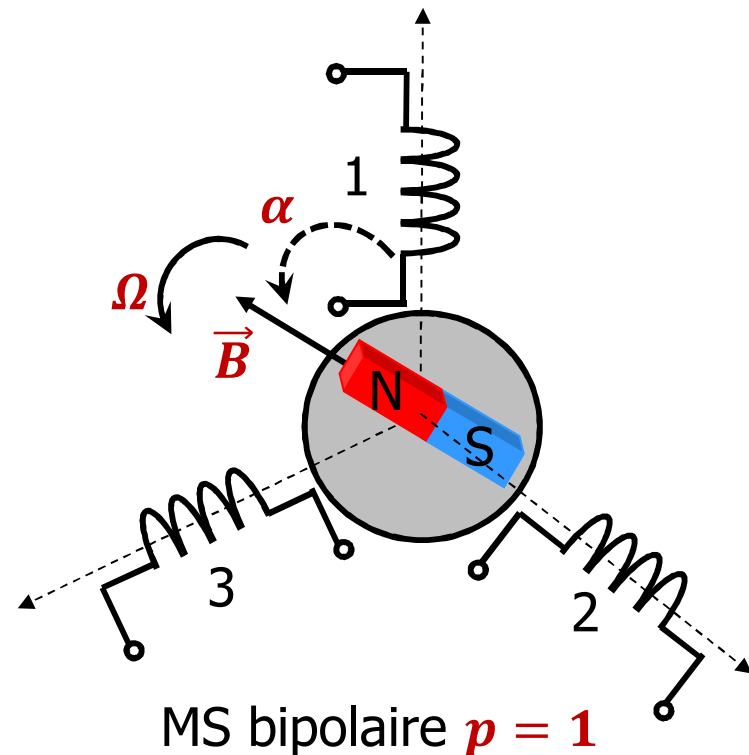
MS à rotor bobiné

MS à aimants permanents

Machine asynchrone triphasée

1.4. Création des forces électromotrices

- Le bobinage du rotor est alimenté par un courant continu (ou à aimant permanent) crée un champ magnétique \vec{B} ;
 - Le rotor est entraîné par une turbine ou un moteur diesel à vitesse constante $\Omega = \frac{d\alpha}{dt}$ (rad/s); produit le champ tournant à la même vitesse;
 - chaque bobine du stator est soumise à un flux magnétique variable et il se crée alors une tension alternative sinusoïdale $e(t)$ aux bornes de chaque enroulement du stator.
-
- Quand le pôle **N** du rotor est face à la bobine de la phase 1 du stator, le flux à travers les spires de cette phase est maximum. Un demi tour plus tard, le pôle **S** est face à cette bobine, le flux est minimum.
 - Le flux à travers la spire passe par son maximum chaque tour;
 - Le flux à travers cette phase est donc alternatif.



Machine asynchrone triphasée

□ Etude de la f.e.m par phase: Alternateur bipolaire

- Soit une bobine statorique comportant N_s spires, on note α l'angle entre l'axe d'un pôle nord du rotor et l'axe de la phase 1 du stator. On prend $\alpha(t = 0) = 0$; donc $\alpha = \Omega t$;
- Si $\Omega = cst$ et si l'induction B est à répartition sinusoïdale dans l'espace;
- Le flux reçu par une spire de la phase 1 est: $\varphi_1(t) = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos(\Omega t)$
- La f.e.m engendrée dans la bobine de la phase 1 du stator est:

$$e_1(t) = -N_s \frac{d\varphi_1(t)}{dt} = N_s BS \Omega \sin(\Omega t)$$

- La f.e.m est sinusoïdale de pulsation égale à la vitesse de rotation du rotor $\omega = \Omega$ et de fréquence f égale à la fréquence de rotation $n = \frac{\Omega}{2\pi}$ (tr/s), de valeur efficace $E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_s f \phi_{max}$; $\phi_{max} = BS$ est le flux maximal;
- La valeur efficace E est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω du rotor et au flux inducteur ϕ_{max} , constant s'il est produit par des aimants, réglable par le courant continu d'excitation I_e si l'inducteur est bobiné;
- Les enroulements des phases 2 et 3 du stator sont identiques à la phase 1 mais décalés de $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$;

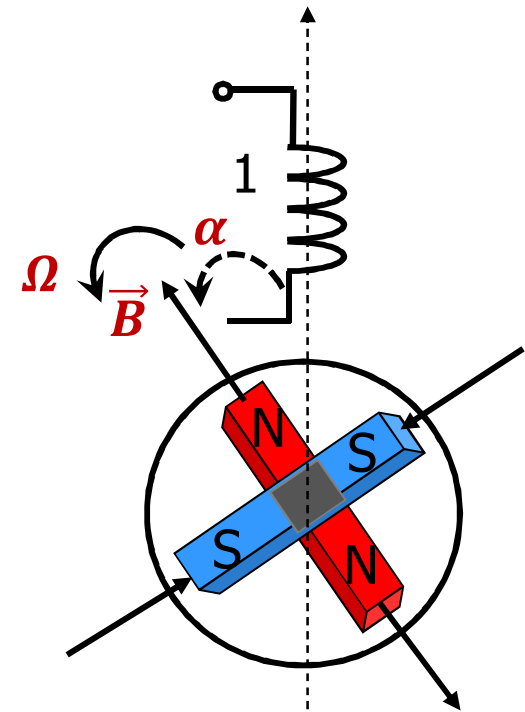
Machine asynchrone triphasée

On obtient donc un système triphasé équilibré de f.e.m:

$$\begin{cases} e_1(t) = E\sqrt{2}\sin(\omega t) \\ e_2(t) = E\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_3(t) = E\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

□ Cas général : Alternateur multipolaire

- Considérons une MS multipolaire à $2p$ pôles, la roue polaire en rotation devant une bobine du stator à la vitesse angulaire de rotation $\Omega = 2\pi n$; n est la fréquence de rotation;
- L'induit est composé de $3p$ bobines chacune décalées entre-elles de $\frac{2\pi}{3p}$;
- Le flux à travers la surface de la spire passe par son maximum chaque demi-tour du rotor;
- La fréquence du flux sera la fréquence de rotation du rotor multipliée par deux (le nombre de paires de pôles p);



Machine tétrapolaire
 $p = 2$

Machine asynchrone triphasée

- La f.e.m induite aux bornes de la phase 1 est toujours sinusoïdale, mais de fréquence $f = pn$, donc de pulsation $\omega = p\Omega$;
- Les enroulements des phases 2 et 3 du stator sont identiques à la phase 1 mais décalés de $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$; on obtient un système triphasé équilibré de f.e.m de fréquence f déphasées entre elle de $\frac{2\pi}{3}$;
- La valeur efficace des forces électromotrices induites est:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_s f \phi_{max} = 4,44 N_s f \phi_{max}$$

□ Effet de la répartition non sinusoïdale du flux

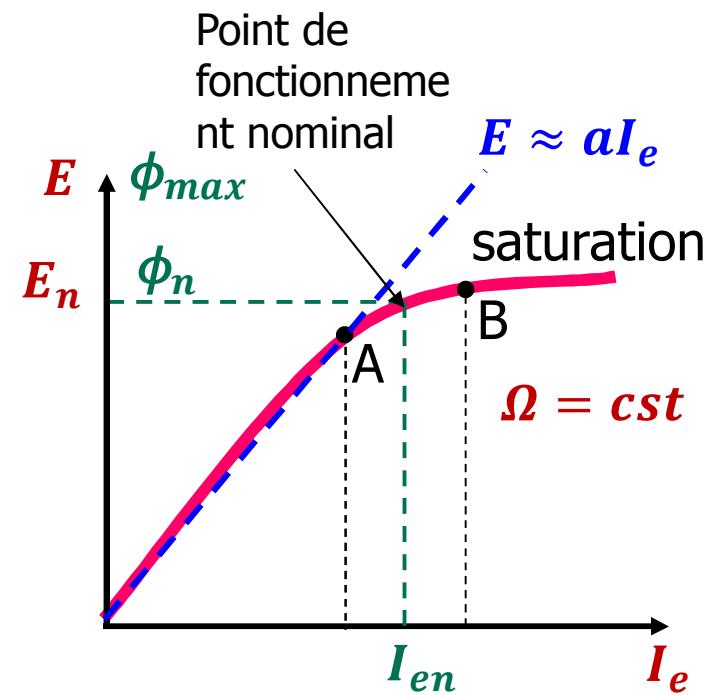
- Pour les machines où le flux inducteur est à pôle saillant. L'induction le long de l'entrefer n'est pas sinusoïdale selon la variation de l'épaisseur de l'entrefer,
- En pratique, la valeur efficace de la tension induite par phase est donnée par: $E = KNf\phi_{max}$
 - ✓ K : est le coefficient de Kapp lié à la construction de la machine (il tient compte à la fois de la répartition non sinusoïdale du flux et la répartition des conducteurs d'une phase à la périphérie du stator), il appartient à l'intervalle $2,20 \text{ } 2.60]$ pour les machines triphasées;
 - ✓ $f = pn$: fréquence des courants statoriques en (Hz);

Machine asynchrone triphasée

- ✓ N : nombre de conducteurs en série d'une phase ($N = N_s/2$);
- ✓ ϕ_{max} : flux utile maximal produit par un pôle de l'inducteur (en Wb).

1.5. Caractéristique à vide: $E = f(I_e)$

- À vide, l'induit ne débite aucun courant; on relève E en faisant varier I_e
- Le rotor est entraîné à la vitesse nominale constante $\Omega = \Omega_n = cst$;
- La valeur efficace E de la f.e.m dépend du flux magnétique ϕ_{max} qui est réglable par le courant continu d'excitation I_e du rotor;
- La caractéristique à vide $E = f(I_e)$ est donc une courbe de magnétisation du matériau ferromagnétique de la machine (avec phénomène de saturation et d'hystérésis);
- Le point de fonctionnement se trouve au coude de saturation (entre A et B), ceci limite aussi les variations de la f.e.m pour une perturbation donnée du courant d'excitation;
- Sous le point A la machine est sous exploitée, au delà du point B, la machine est saturée (augmentation des pertes) et le réglage de la f.e.m est délicat.



Caractéristique interne de la MS

Machine asynchrone triphasée

1.6. Alternateur en charge

□ Synchronisme

- Lorsque l'alternateur est chargé, le stator est le siège de courants induits (courants statoriques). Ces courants à leur tour créent un champ magnétique statorique \vec{B}_s ;
- Le champ rotorique \vec{B} (inducteur) et le champ statorique \vec{B}_s tournent dans le même sens et à la même vitesse appelé vitesse de synchronisme $\Omega = \Omega_s$;

□ Réaction magnétique d'induit (RMI)

- Les courants induits créent un flux supplémentaire appelé réaction d'induit φ_s qui se superpose au flux inducteur φ pour donner un flux résultant φ_r qui crée la force électromotrice résultante E_r différente de la f.e.m à vide E produit par le flux inducteur seul.
- Le flux résultant s'exprime par la relation:

$$\underline{\varphi_r} = \underline{\varphi} + \underline{\varphi_s}$$

- La RMI réduit le flux inducteur et entraîne une diminution de la f.e.m en charge. La f.e.m résultante en charge est donnée par:

$$\underline{E_r} = \underline{E} + \underline{E_s}$$

Machine asynchrone triphasée

- Si la machine n'est pas saturée:

$$\underline{E} = -jN_s\omega\underline{\varphi} = -j\omega\underline{\phi}$$

$$\underline{E}_S = -jN_s\omega\underline{\varphi}_S = -j\omega\underline{\phi}_S$$

$$\underline{E}_r = -jN_s\omega\underline{\varphi}_r = -j\omega\underline{\phi}_r$$

- Le décalage angulaire entre ces deux inductions dépend du déphasage entre la f.é.m induite \underline{E} et le courant d'induit \underline{I} dans une phase.
- Si \underline{E} et \underline{I} sont déphasés de ψ , le décalage, en angle électrique des champs tournants \vec{B}_S et \vec{B} est: $\psi' = \psi + \frac{\pi}{2}$.

Pour chaque phase, on a:

- \underline{E} en retard de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à $\underline{\phi}$;
- \underline{E}_S en retard de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à $\underline{\phi}_S$;
- \underline{E}_r en retard de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à $\underline{\phi}_r$;
- $\underline{\phi}_S$ est en phase avec \underline{I} ;

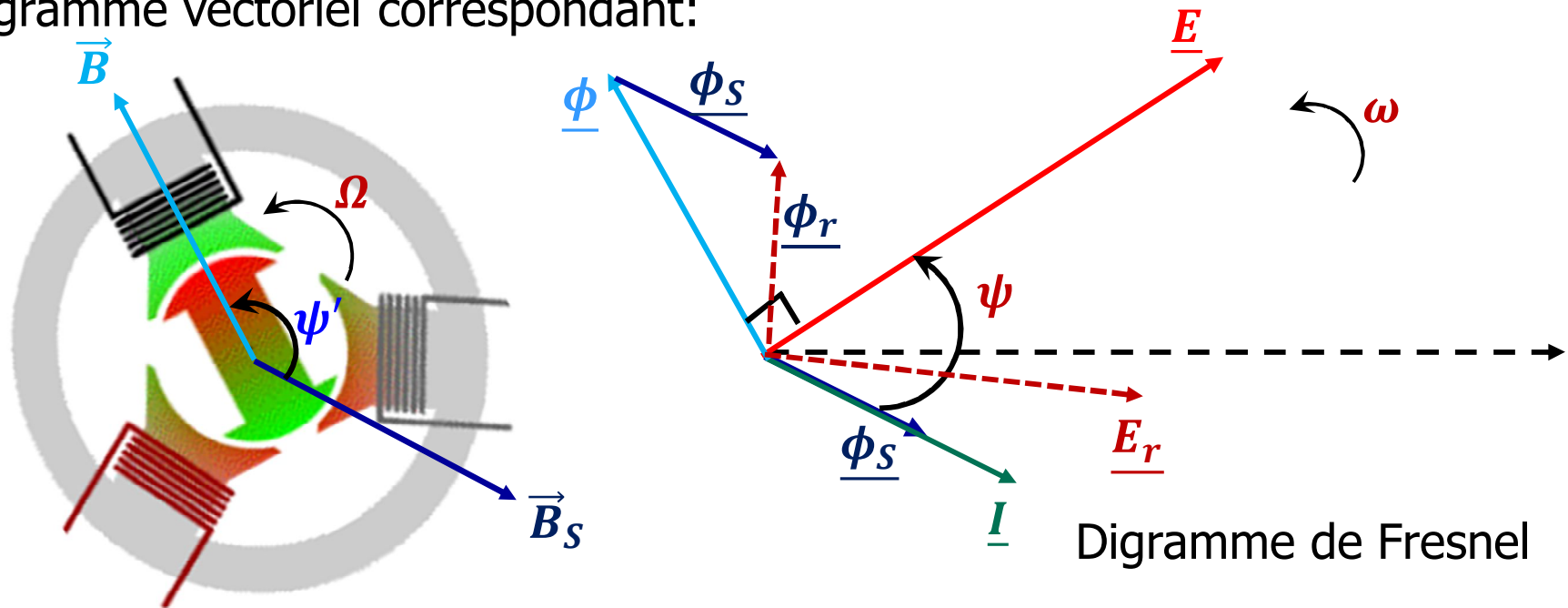
Remarque:

Dans un alternateur multipolaire:

$$\psi'_{\text{électrique}} = p \cdot \psi'_{\text{mécanique}} ; \omega = p\Omega ; f = pn$$

Machine asynchrone triphasée

- Organisation des champs tournants dans un alternateur en charge et le Diagramme vectoriel correspondant:



□ Schéma équivalent d'une phase

Hypothèses:

- La charge est équilibrée,
- Le rotor est à pôles lisses,
- Le circuit magnétique de la machine est non saturé ($E = cst \cdot I_e$),
- Le régime est sinusoïdal: toutes les grandeurs sont sinusoïdales du temps ou de l'espace.

Machine asynchrone triphasée

□ Diagramme de Behn-Eschenburg

Notations:

- ✓ V tension simple entre phase et neutre,
 - ✓ I courant de ligne dans un fil de phase,
 - ✓ φ déphasage entre courant et tension,
 - Le flux d'induit correspond à l'existence d'une inductance synchrone L_s par phase de l'induit;
 - D'autre part, chaque enroulement statorique présente une résistance R_s .
- Pour étudier l'alternateur triphasé, on modélise une phase de l'alternateur par une f.e.m E en série avec une résistance R_s et une réactance $X_s = L_s \omega$, appelée la réactance synchrone.

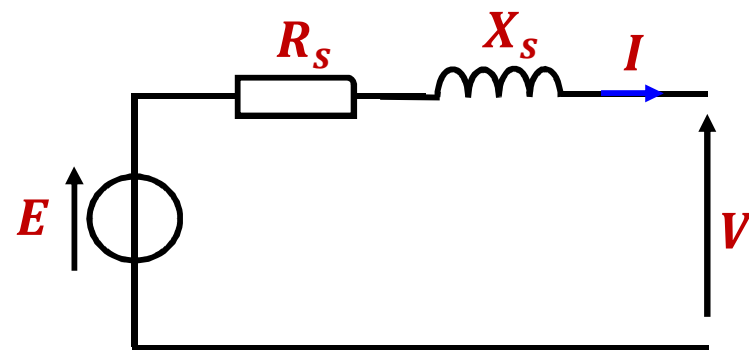
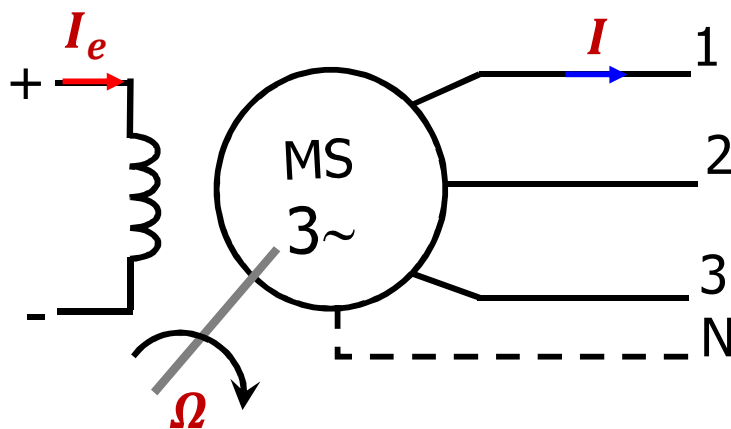


Schéma équivalent d'une phase de la machine

Machine asynchrone triphasée

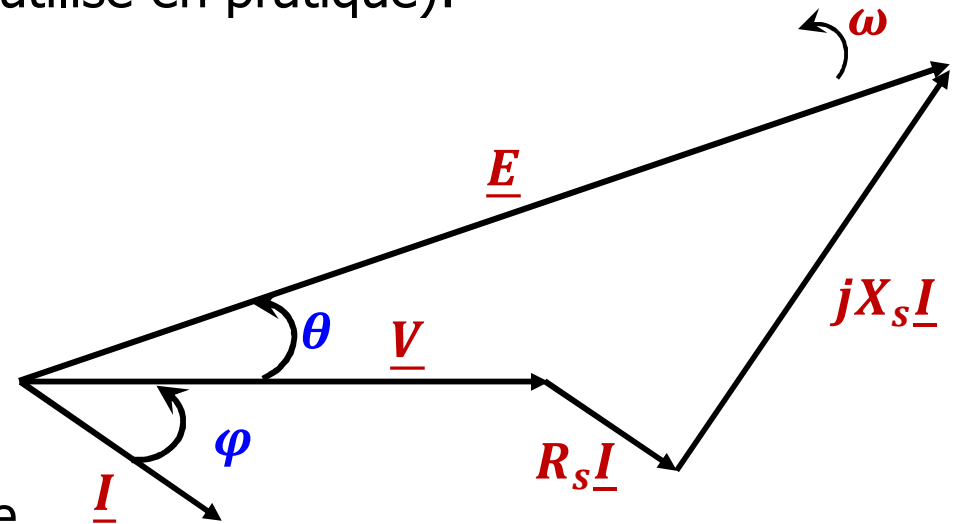
Les équations générales de fonctionnement de la machine synchrone:

$$\underline{E} = \underline{V} + R_s \underline{I} + jX_s \underline{I}$$

Diagramme de Behn-Eschenburg (très utilisé en pratique):

Remarque:

- L'angle θ que fait \underline{E} et \underline{V} est appelé angle interne. Cet angle est caractéristique du mode de fonctionnement de la machine (Moteur ou générateur), ainsi que pour le pilotage de la machine;
- X_s est proportionnelle à la vitesse de rotation ($X_s = L_s \omega = pL_s \Omega$);
- En pratique, on peut négliger R_s devant X_s .

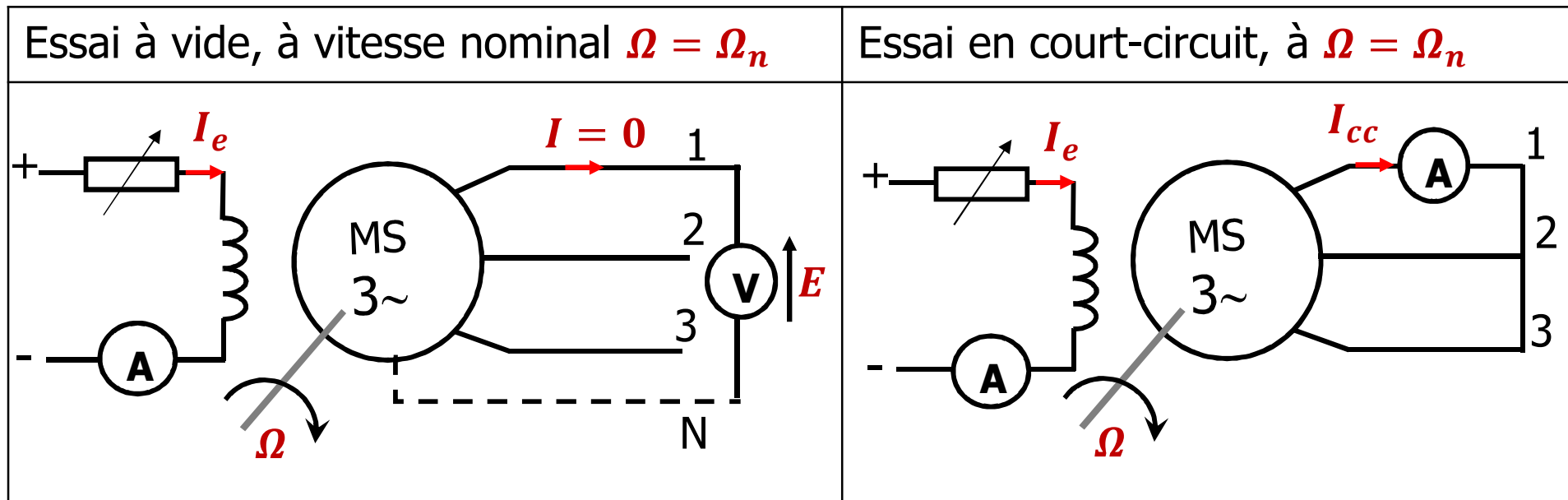


□ Détermination des éléments du diagramme

- La résistance R_s de chaque enroulement statorique se mesure avec la méthode volt-ampèremétrique en courant continu (on suppose que les enroulements du stator sont couplés en étoile, entre deux bornes on mesure $2R_s$);

Machine asynchrone triphasée

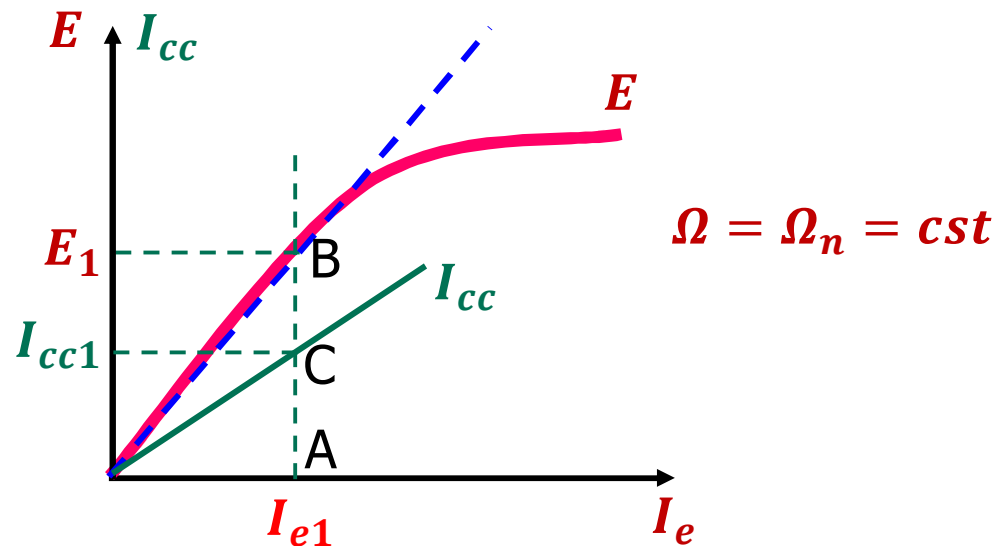
- La réactance synchrone X_s est déterminée avec deux essais, un essai à vide pour mesurer le f.e.m et un essai en court-circuit sous excitation réduite pour mesurer $I_{cc} < I_n$;



- La f.e.m est connue par la caractéristique à vide $E = f(I_e)$ à la vitesse nominale;
- On trace la caractéristique en court-circuit $I_{cc} = f(I_e)$ à la vitesse nominale;
- En court-circuit: $\underline{E} = R_s \underline{I}_{cc} + jX_s \underline{I}_{cc}$; $V = 0$;
- Donc: $\underline{E} = \underline{Z} \underline{I}_{cc}$; $\underline{Z} = R_s + jX_s$; $Z = \sqrt{(R_s)^2 + (X_s)^2}$

Machine asynchrone triphasée

- Si la machine n'est pas saturée:
 - ✓ La caractéristique à vide est linéaire: $E = aI_e$;
 - ✓ La caractéristique en court-circuit est aussi linéaire: $I_{cc} = \frac{E}{Z} = \frac{a}{\sqrt{(R_s)^2 + (X_s)^2}} I_e = bI_e$;
 - ✓ On obtient ainsi l'impédance interne d'une phase de l'alternateur: $Z = \frac{E}{I_{cc}}$;



- Pour le même courant d'excitation I_{e1} on relève E_1 et I_{cc1} ; l'impédance est donc: $Z = \frac{AB}{AC} = \frac{E_1}{I_{cc1}}$; d'où la réactance synchrone $X_s = \sqrt{(Z)^2 - (R_s)^2}$

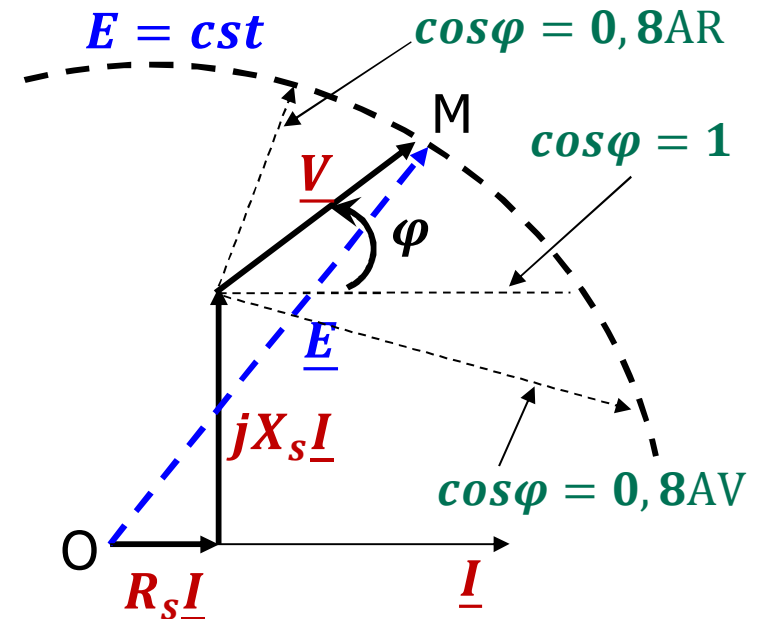
Remarque: $X_s = L_s \omega$ est constante dans la zone non saturée et décroît dans la zone saturée.

Machine asynchrone triphasée

□ Caractéristique électrique en charge: $V = f(I)$

- L'alternateur triphasé est entraîné à vitesse constante $\Omega = \Omega_n$, il alimente une charge équilibrée (alternateur autonome non connecté au réseau);
- L'intensité du courant d'excitation est maintenue constante $I_e = cst$;
- Le déphasage φ de la tension V par rapport au courant I est imposé par la charge;
- Si I_e , donc E , est fixé, le diagramme de Behn-Eschenburg, permet de calculer la tension V obtenue pour un débit I et un facteur de puissance $\cos\varphi$ donnés;
- À partir du point 0, On construit $R_s \underline{I}$ et $jX_s \underline{I}$. On connaît φ et donc la direction de \underline{V} , l'intersection avec le cercle de centre de 0 et de rayon E donne l'extrémité de \underline{V} .

Remarque: Si on veut assurer une tension V imposée, pour un débit I et un déphasage φ donnés, on construit le diagramme qui donne la f.é.m E nécessaire et par suite le courant d'excitation I_e .



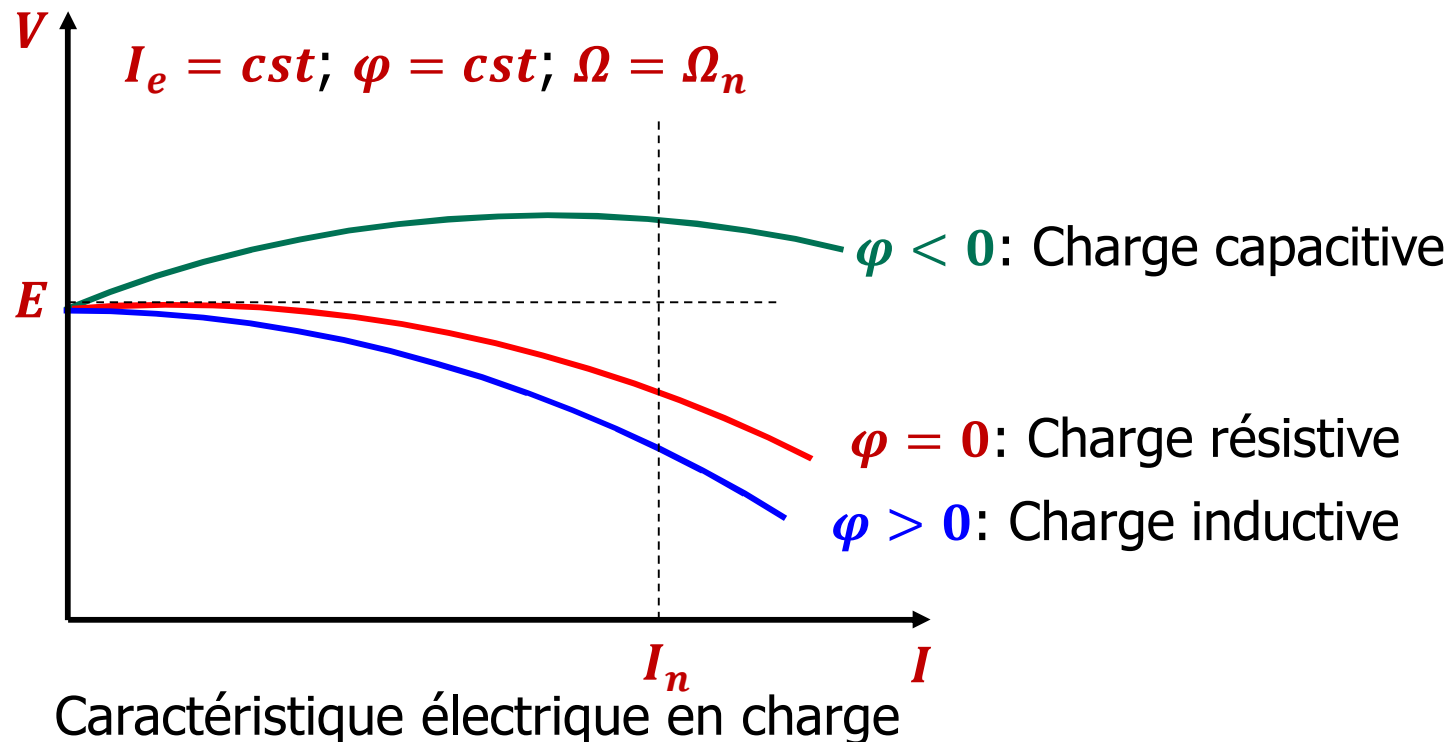
Machine asynchrone triphasée

La caractéristique est différente selon 3 cas:

- Charge résistive: la tension décroît lorsque le courant augmente, la chute de tension en charge est:

$$\Delta V = E - V > 0$$

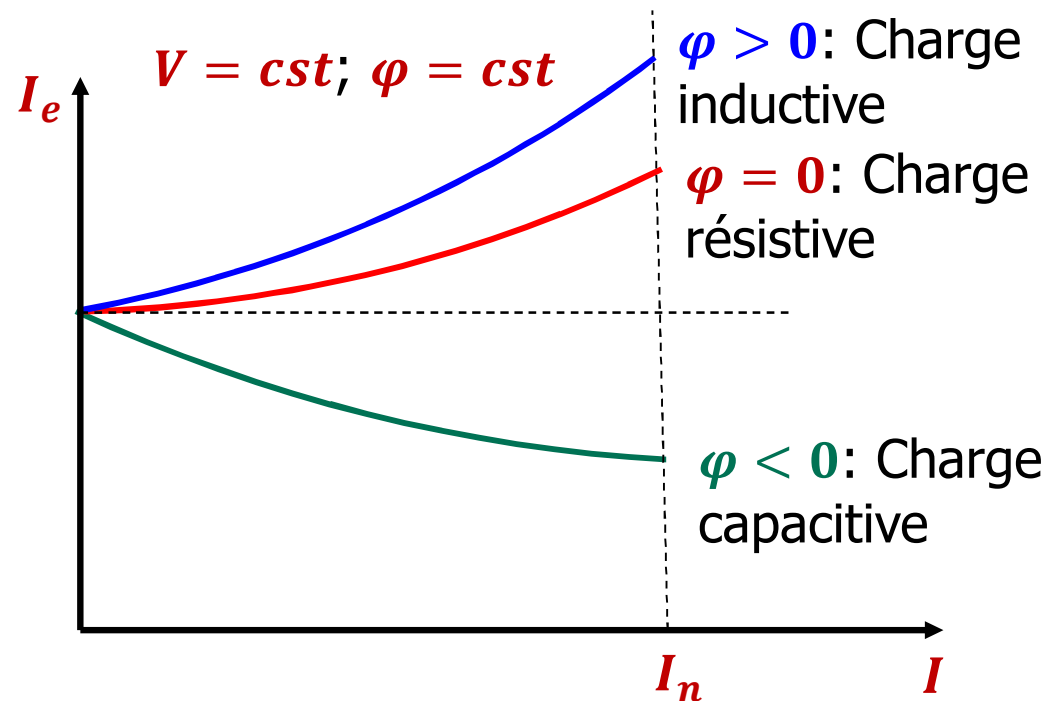
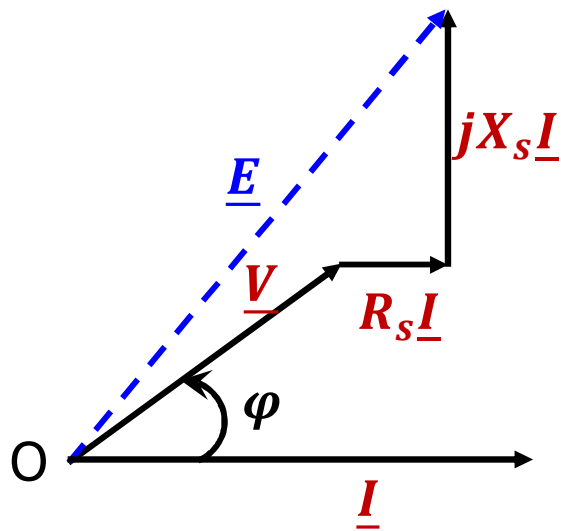
- Charge inductive: la décroissance de la tension est plus forte, $\Delta V > 0$
- Charge capacitif: la tension diminue moins, ou même augmente si la charge est fortement capacitive lorsque le courant augmente $\Delta V < 0$.



Machine asynchrone triphasée

□ Caractéristique de réglage: $I_e = f(I)$

- Pour maintenir une tension imposée $V = V_n = cst$ pour un facteur de puissance donné $\cos\varphi = cst$, il suffit de faire varier la f.e.m E par le réglage du courant d'excitation I_e à la vitesse nominale $\Omega = \Omega_n$;
- Plus la chute de tension est grande plus le courant d'excitation est grand;
- Pour les charges fortement inductives (déphasage arrière fort), le maintien de $V = V_n$ lorsque I augmente jusqu'à I_n , nécessite un courant d'excitation I_e excessif.



Caractéristique de réglage de l'alternateur

Machine asynchrone triphasée

1.7. Bilan de puissance et rendement

□ Puissance absorbée:

- L'alternateur reçoit une puissance mécanique de la turbine ou du moteur auxiliaire qui l'entraîne, notée $P_m = C_m \Omega$; avec C_m est le moment du couple utile exercé sur le rotor [$N.m$] et Ω la vitesse angulaire de l'arbre [rad/s]. Si n la fréquence de rotation exprimée en [tr/s].], alors $\Omega = 2\pi n$, si elle est exprimée en [tr/min] alors $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$.
- L'alimentation de l'excitation de l'inducteur absorbe la puissance électrique $P_e = U_e I_e$, avec U_e est la tension aux bornes de l'inducteur.
- La puissance absorbée est:

$$P_a = C_m \Omega + U_e I_e$$

Remarque:

Si l'alternateur est à aimant permanent, $P_e = 0$.

Puissance utile:

- La puissance électrique utile est celle fournie en sortie de l'alternateur synchrone pour alimenter une charge triphasée équilibrée de facteur de puissance $\cos\varphi$, qui absorbe une intensité I :

$$P_u = 3VI \cos\varphi = \sqrt{3}UI \cos\varphi$$

Machine asynchrone triphasée

Pertes Joule:

- Pertes par effet Joule dans l'inducteur: $P_{Je} = U_e I_e = R_e I_e^2$, avec R_e est la résistance de l'inducteur;
- Pertes par effet Joule dans l'induit: $P_{Js} = 3R_s I^2 = \frac{3}{2} R I^2$, avec R_s est la résistance d'une phase du stator et I l'intensité en ligne, et R est la résistance mesurée entre deux bornes du stator.

Pertes mécaniques:

- Pertes dues aux imperfections des éléments mécaniques: P_{pm} , qui ne dépendent que la fréquence de rotation n ,
 - ✓ Les pertes par ventilation de l'alternateur,
 - ✓ Les pertes par frottement de l'arbre de l'alternateur dans ses paliers,

Pertes ferromagnétiques:

- Pertes dans le circuit magnétique du stator (par hystérésis et par courants de Foucault): P_{fs} ,
- Ces pertes ne dépendent que de la fréquence f des tensions statoriques induites et le flux magnétique maximal ϕ_{max} .

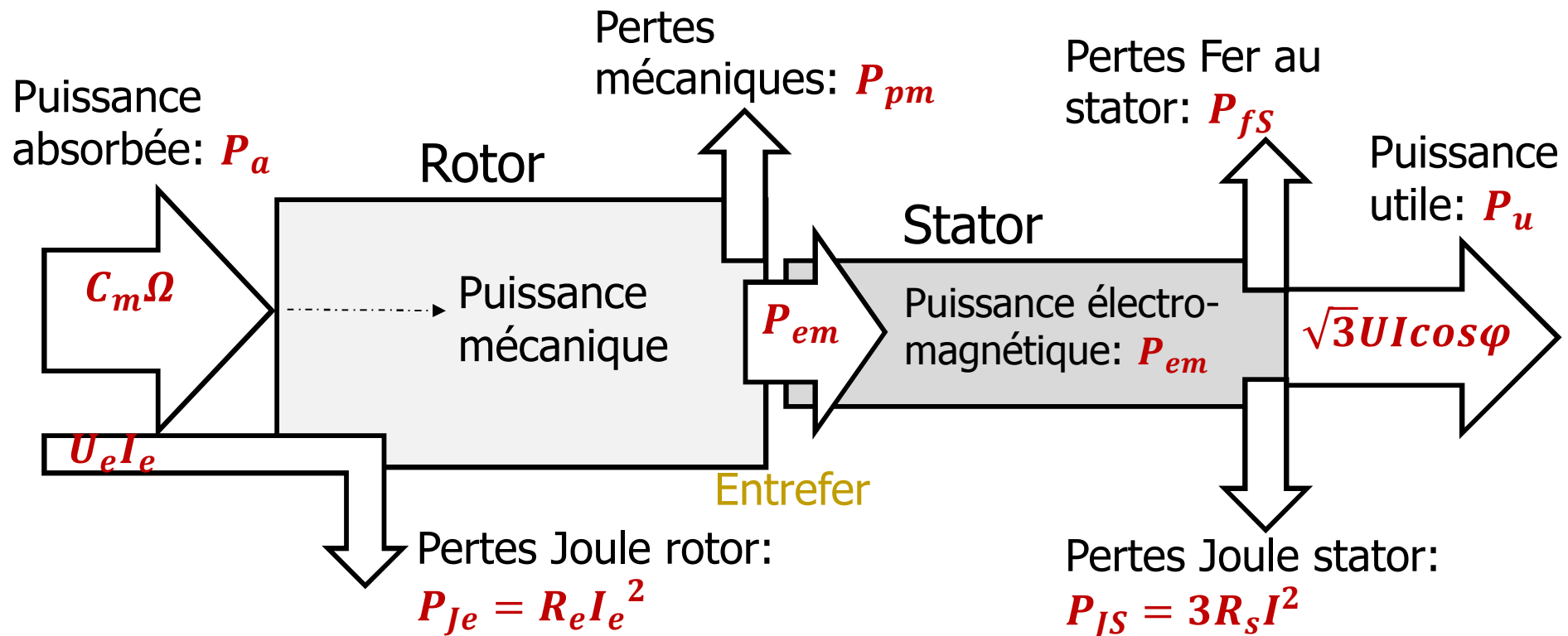
Machine asynchrone triphasée

Pertes collectives « constantes »:

- Représentent les pertes mécaniques et les pertes fer de l'alternateur:

$$P_C = P_{pm} + P_{fs}$$

- Ces pertes sont déterminées par la mesure de la puissance absorbée lors de l'essai à vide pour une vitesse de rotation nominale Ω_n et une tension nominale V_n . Elles sont indépendante de la charge.



Machine asynchrone triphasée

□ Rendement de l'alternateur

- Le rendement est:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI\cos\varphi}{\sqrt{3}UI\cos\varphi + \sum \text{pertes}} = \frac{\sqrt{3}UI\cos\varphi}{\sqrt{3}UI\cos\varphi + P_{Je} + P_{JS} + P_C}$$

Remarque:

Les alternateurs (à excitation bobinée) utilisés dans les centrales électriques peuvent avoir des puissances de l'ordre de 1000 MW. Même avec un rendement de 99% dans les conditions nominales, il reste 10 MW de chaleur à évacuer.

□ Couple électromagnétique

- L'interaction entre le champ rotorique et les courants induits dans le stator engendre un couple électromagnétique C_{em} . Il est facile de calculer son expression à partir du schéma équivalent.
- La puissance électromagnétique P_{em} , correspondant au couple électromagnétique C_{em} s'écrit:

$$P_{em} = P_{JS} + P_{fS} + P_u = P_a - P_{Je} - P_{pm} = C_m\Omega - P_{pm} = C_{em}\Omega$$

- Si on néglige les pertes ($\eta \approx 1$), alors: $P_{em} \approx P_a \approx P_u$

$$P_{em} = C_{em}\Omega \approx 3VI\cos\varphi$$

Machine asynchrone triphasée

- Dans cette hypothèse, le diagramme de Behn-Eschenburg se simplifie ($R_s I$ est négligeable),
- D'après le diagramme, on peut écrire:

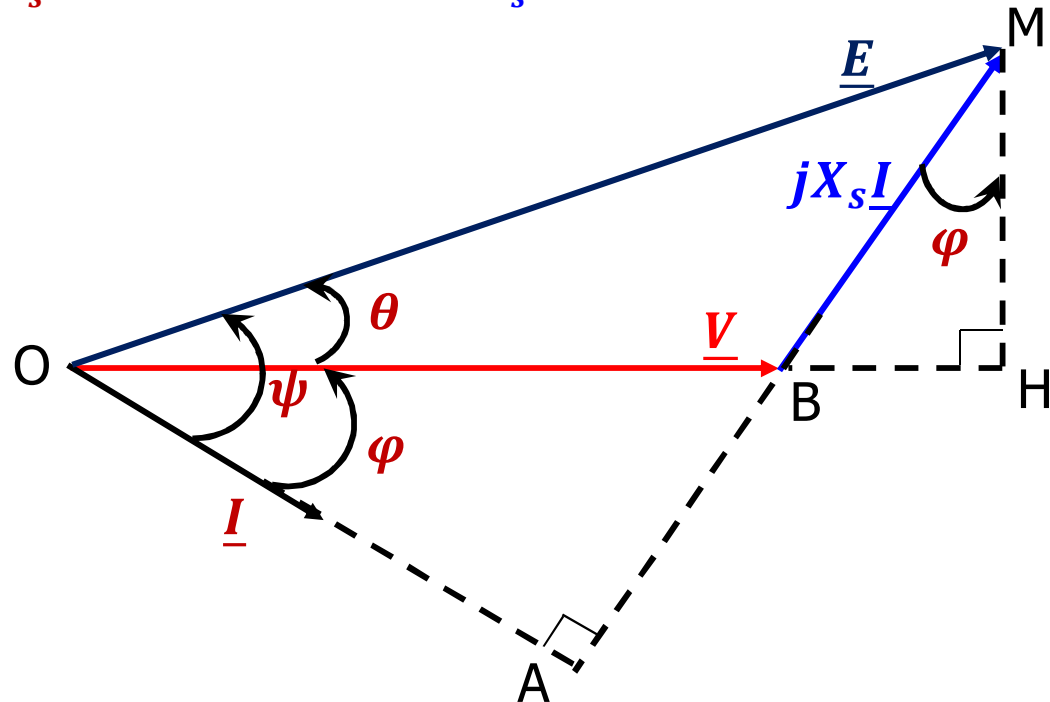
$$HM = X_s I \cos \varphi = E \sin \theta; \quad OA = E \cos \psi = V \cos \varphi$$

- D'où: $P_{em} = 3VI \cos \varphi = 3EI \cos \psi = \frac{3}{X_s} VE \sin \theta$

- Le couple $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$ peut s'écrire par les expressions suivantes:

$$C_{em} = \frac{3}{\Omega X_s} VE \sin \theta = \frac{3p}{L_s \omega^2} VE \sin \theta; \quad C_{em} = \frac{3p}{L_s \omega} EI \cos \psi;$$

En fonctionnement alternatif, le couple électromagnétique est résistant, donc opposé à la vitesse de rotation; le couple est donc maximal lorsque $\psi = 0$. Il faut donc que la f.e.m et le courant en linge soient en phase (ou $\theta = \frac{\pi}{2}$).



Machine asynchrone triphasée

2. Machine synchrone couplée au réseau

On couple une machine synchrone à un réseau triphasé afin, soit:

- de fournir une puissance supplémentaire à ce réseau: la machine synchrone se comporte alors en alternateur ;
- de produire de la puissance mécanique: la machine synchrone se comporte alors en moteur synchrone.

2.1. Conditions de couplage d'un alternateur sur le réseau

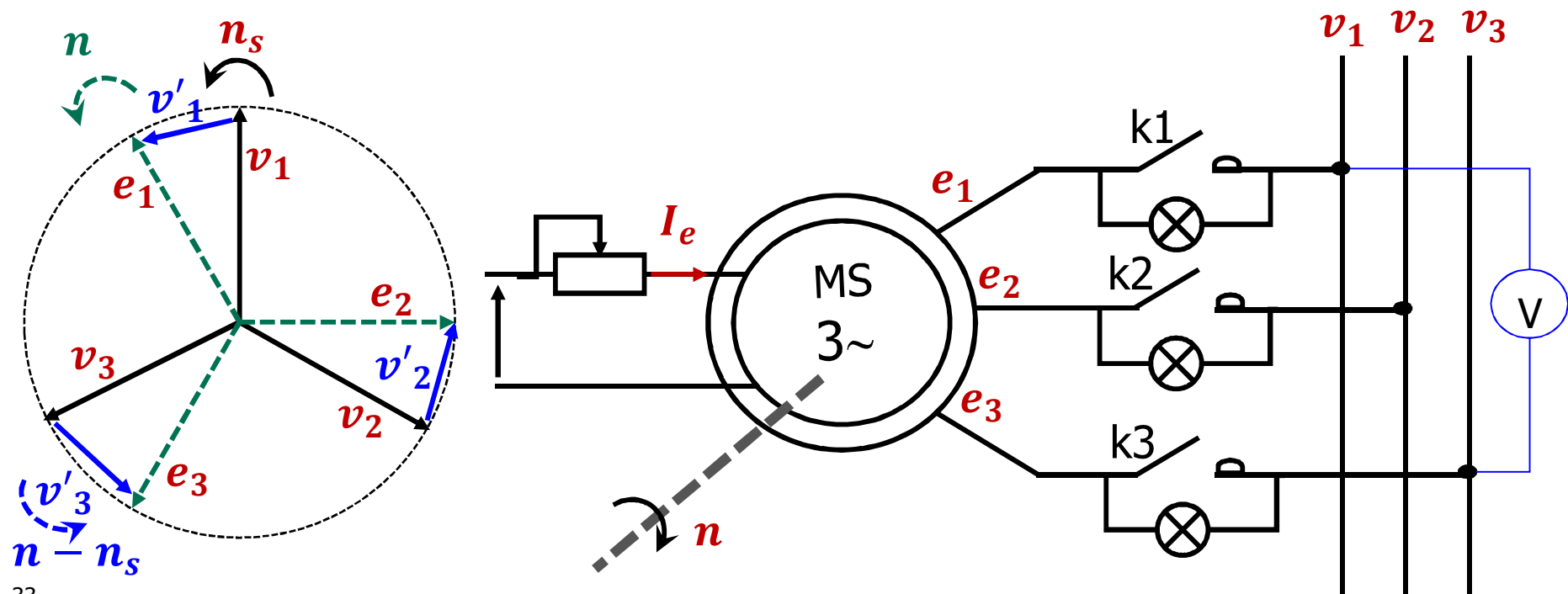
- La valeur efficace des f.e.m induites E dans l'alternateur doit être égale à celle des tensions V du réseau, ce qui est obtenu par le réglage du courant d'excitation I_e ;
- La fréquence des f.e.m induites dans l'alternateur doit être la même que celle des tensions du réseau, ce qui est obtenu par le réglage de la vitesse d'entraînement de la machine;
- Les f.e.m induites dans l'alternateur doivent être en phase avec celle des tensions du réseau;
- La séquence des phases (e_1, e_2, e_3) de l'alternateur doit être la même que celle du réseau (v_1, v_2, v_3).

Si ces conditions sont bien remplies, il ne circule alors aucun courant entre l'alternateur et le réseau, on peut donc coupler l'alternateur.

Machine asynchrone triphasée

□ Synchronisation de l'alternateur au réseau au moyen de lampes

- L'alternateur est entraîné par la turbine ou un moteur auxiliaire (en lui fournissant juste ses pertes à vide) à une vitesse n proche de la vitesse de synchronisme n_s ;
- 3 lampes montées de part et d'autre de l'interrupteur de couplage;
- Ces lampes sont alimentées sous les tensions $v' = e - v$ (ces lampes doivent supporter la tension $2V$);
- En agissant sur I_e , on règle l'égalité $E = V$ à l'aide du voltmètre.



Machine asynchrone triphasée

- Les trois tensions (v'_1, v'_2, v'_3) varient à la fréquence $n - n_s$
- Si l'ordre des phases est correct les trois tensions (v'_1, v'_2, v'_3) varient simultanément et les trois lampes s'allument ou s'éteignent ensemble.
- Si l'ordre des phases est incorrect, les lampes s'allument et s'éteignent les unes à la suite des autres. Il est nécessaire de changer l'ordre des phases au niveau de l'interrupteur de couplage (inverser deux phases).
- On ajuste la vitesse n afin que l'éclat des lampes varie lentement et on couple l'alternateur à l'extinction des lampes, en réglant $n = n_s$.
- À l'accrochage $I = 0$, alors $E = V$.

□ Appareils de synchronisation

Synchronoscope:

- Il est muni d'un moteur asynchrone dont la vitesse de rotation dépend de la différence entre les fréquences du réseau et de l'alternateur
- Le couplage se fait au passage par zéro de l'aiguille (les lampes éteintes), ($n = n_s$).



L'alternateur tourne moins vite: augmenter la vitesse de l'alternateur

L'alternateur tourne plus vite: diminuer la vitesse de l'alternateur

Machine asynchrone triphasée

□ Voltmètre différentiel:

- Mesure la différence des tensions alternateur-réseau;
- Le couplage se fait lorsque l'aiguille passe par zéro, dans ce cas $E = V$.

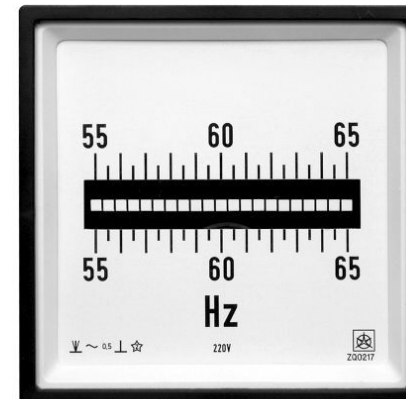
Tension alternateur inférieure à la tension du réseau :
augmenter la tension de l'alternateur



Tension alternateur supérieure à la tension du réseau:
diminuer la tension de l'alternateur

□ Fréquencemètre:

- Deux fréquencemètres permettent de mesurer et de comparer les fréquences du réseau et de l'alternateur.

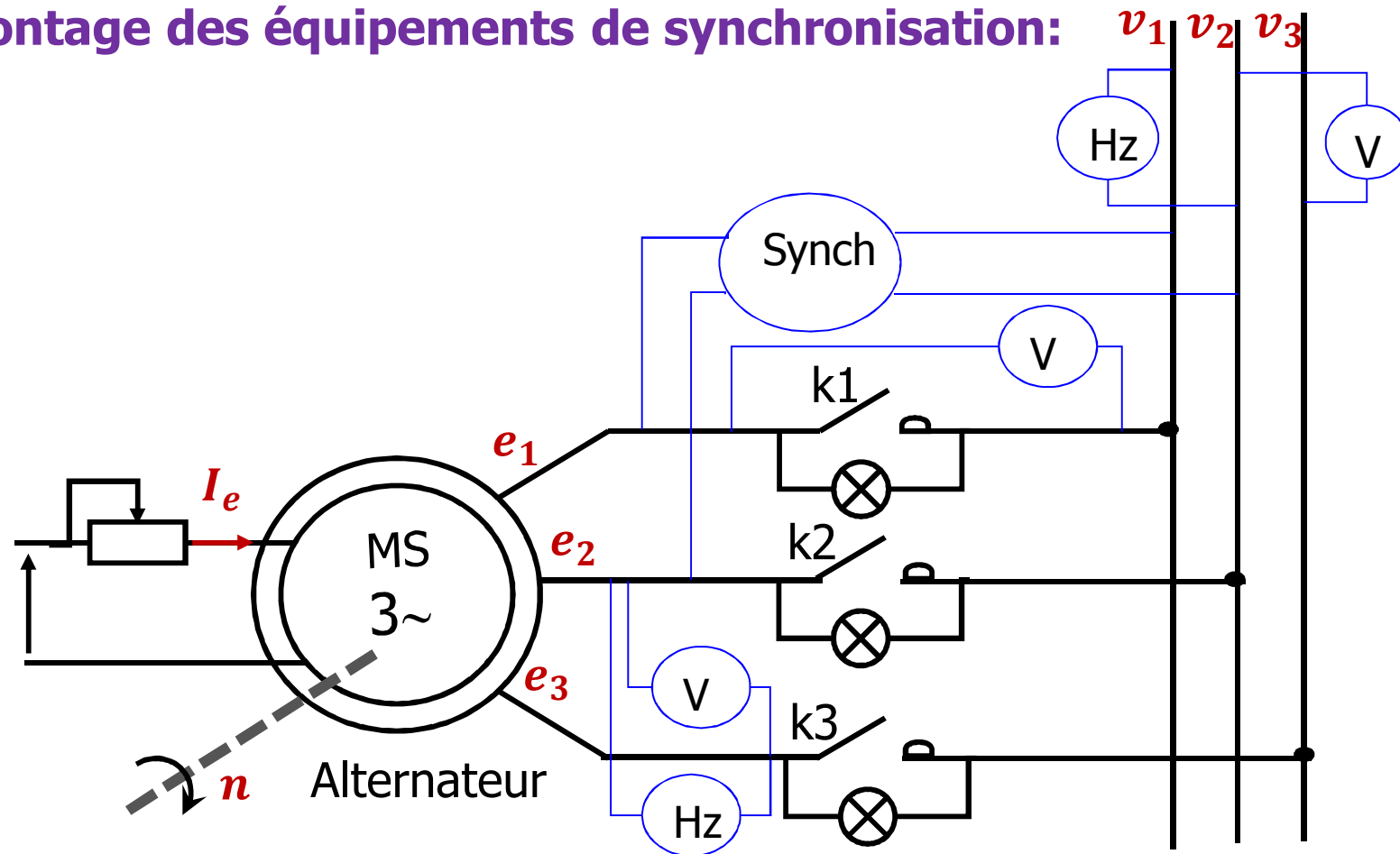


Réseau

Alternateur

Machine asynchrone triphasée

□ Montage des équipements de synchronisation:



Remarque: Dans les centrales modernes, la synchronisation se fait automatiquement (modules de contrôle numérique, qui mesurent les tensions, fréquences et déphasages de l'alternateur et du réseau) au moment précis où les conditions de couplage sont respectées.

Machine asynchrone triphasée

□ Effet du couple appliqué à la machine synchrone

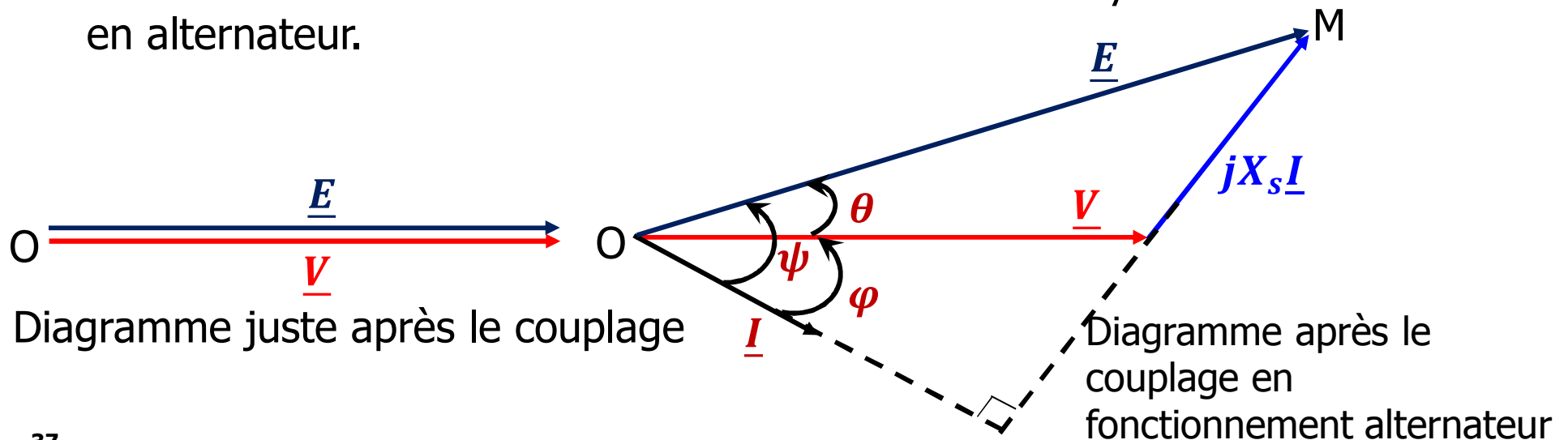
On suppose que le réseau est à tension V et fréquence f constante:

Au moment du couplage:

- Le courant est nul $I = 0$, et si on néglige les pertes, le couple mécanique C_m fourni par la turbine ou le moteur auxiliaire d'entraînement est aussi négligeable, on a donc $\underline{E} = \underline{V}$; donc $\theta = 0$;

Après le couplage:

- Si on augmente le couple mécanique C_m (on ouvre les vannes de la turbine), il apparaît alors des courants triphasés I tels que: $\underline{E} = \underline{V} + jX_s \underline{I}$ (en négligeant RI). La puissance fournie par la turbine ou le moteur d'entraînement est transmise au réseau: la machine synchrone fonctionne en alternateur.



Machine asynchrone triphasée

- L'alternateur absorbe une puissance mécanique $P_m = C_m \Omega > 0$ et débite une puissance active dans le réseau: $P = 3VI \cos \varphi > 0$,
- Les f.é.m \underline{E} sont en avance par rapport aux tensions du réseau \underline{V} .
- Si le couple appliqué est négatif, c'est à dire si on remplace la turbine par une charge mécanique, le couple électromagnétique C_{em} de la machine synchrone devient un couple moteur et change de signe comme θ .
- La machine synchrone fonctionne en moteur synchrone, elle absorbe une puissance active du réseau $P = 3VI' \cos \varphi < 0$, avec $I' = -I$ est le courant absorbé par le moteur. Elle fournit une puissance mécanique $P_m = C_m \Omega < 0$
- Les f.é.m \underline{E} sont en arrière par rapport aux tensions du réseau \underline{V} .

Remarque:

Le fonctionnement alternateur ou moteur dépend uniquement du sens du couple mécanique appliqué.

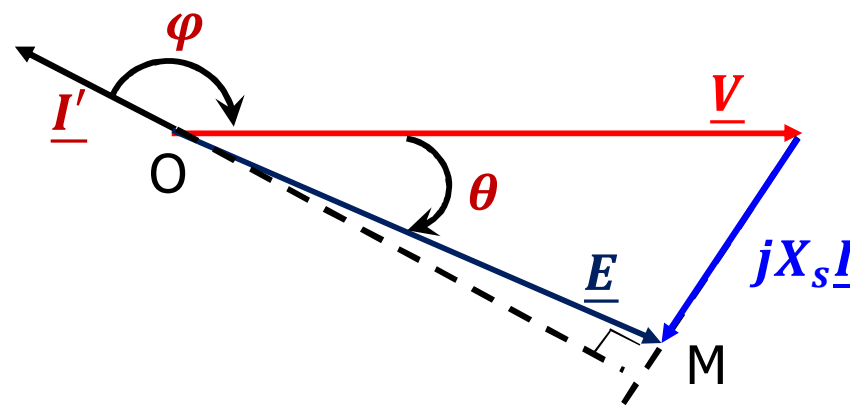
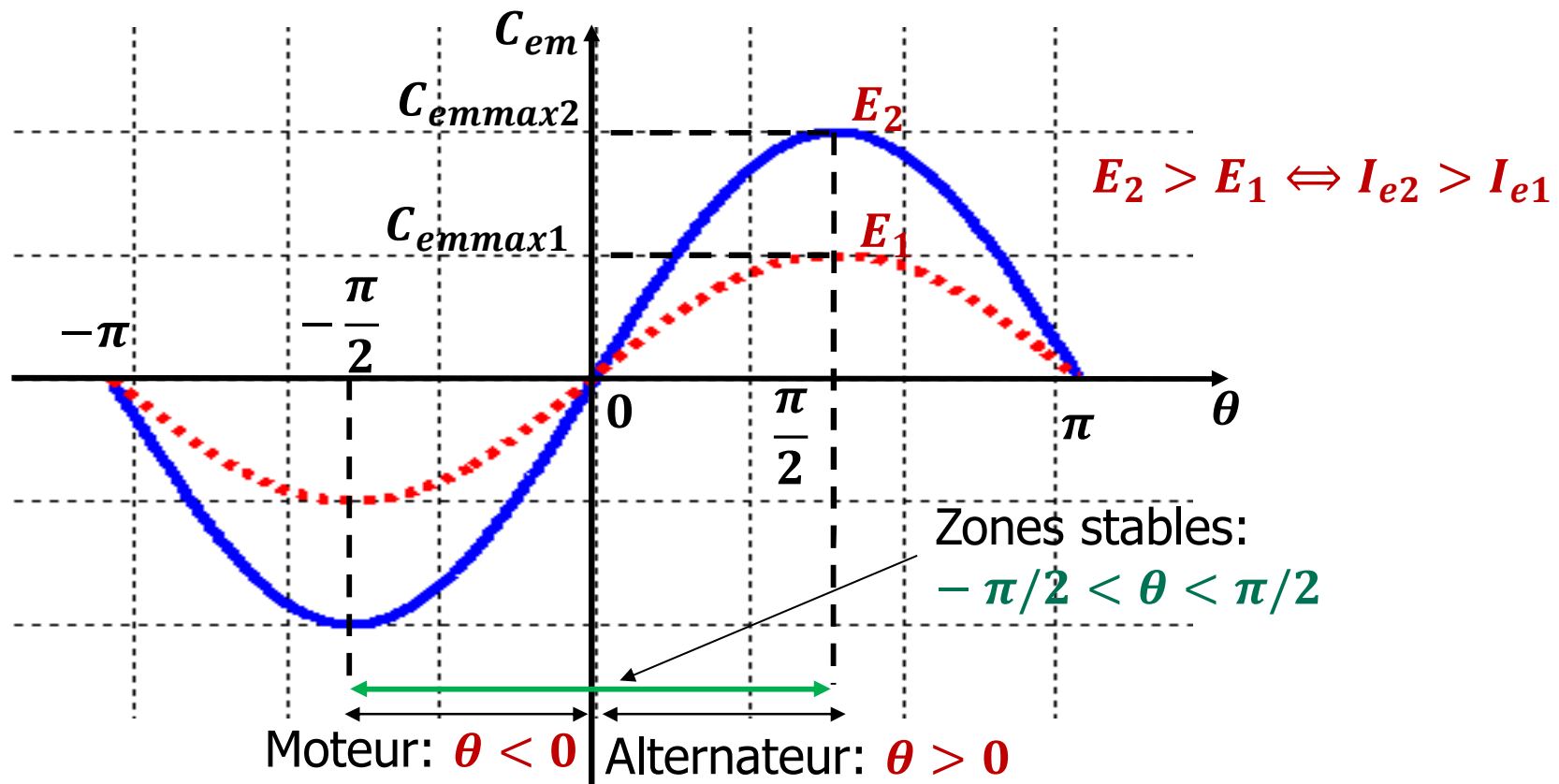


Diagramme en fonctionnement moteur

Machine asynchrone triphasée

□ Puissance active maximale et couple maximum

- Rappelons l'expression de la puissance P active et le couple C_{em} en fonction de l'angle interne θ : $P = \frac{3}{X_s} V E \sin\theta$; $C_{em} = \frac{3p}{L_s \omega^2} V E \sin\theta$
- À excitation constante $I_e = cst$, la puissance maximale et le couple maximum sont obtenus pour $\theta = \frac{\pi}{2}$; donc: $P_{max} = \frac{3}{L_s \omega} V E$; $C_{emax} = \frac{P_{max}}{\Omega} = \frac{3p}{L_s \omega^2} V E$



Machine asynchrone triphasée

- En régime permanent : $J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} = 0$; donc $C_m = C_{em}$
- Si l'alternateur est à vide $C_m = 0$, donc $C_{em} = \frac{3p}{L_s \omega^2} V E \sin \theta = 0$, d'où $\theta = 0$;
- Si C_m augmente, C_{em} augmente et l'angle θ augmente, Si l'on cherche à dépasser la limite $P > P_{max}$ (en augmentant le couple de la turbine $C_m > C_{emax}$), alors C_{em} diminue et l'angle θ dépasse $\pi/2$. À partir de l'équation: $J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em}$; la vitesse Ω augmente et dépasse Ω_s .
- L'alternateur décroche et perd son synchronisme du réseau. Il y a un risque d'emballement.
- Le rotor se met à tourner plus vite que le champ tournant du stator et des courants intenses circuleront dans ce dernier.
- En pratique, cette condition ne se produit jamais car les disjoncteurs de protection s'ouvrent aussitôt si le courant devient très élevé.

Remarque:

- En fonctionnement moteur, si l'on cherche à dépasser la puissance maximale $P > P_{max}$ (en augmentant le couple résistant de la charge entraînée $C_r > C_{emax}$), le moteur perd son synchronisme et décroche. Le couple moteur diminue et le rotor ralentit et se met à tourner moins vite que le champ tournant du stator puis il s'arrête ($J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r$; $C_{em} \searrow \Rightarrow \Omega \searrow$).

Machine asynchrone triphasée

2.2. Diagramme des puissances active et réactive

- La tension V et la fréquence f (la vitesse de rotation $n = f/p$) sont imposées par le réseau;
- Pour simplifier l'étude, on néglige RI ($RI \ll X_s I$).

Lecture des puissances sur le diagramme des tensions:

- Les puissances active et réactive fournies au réseau:

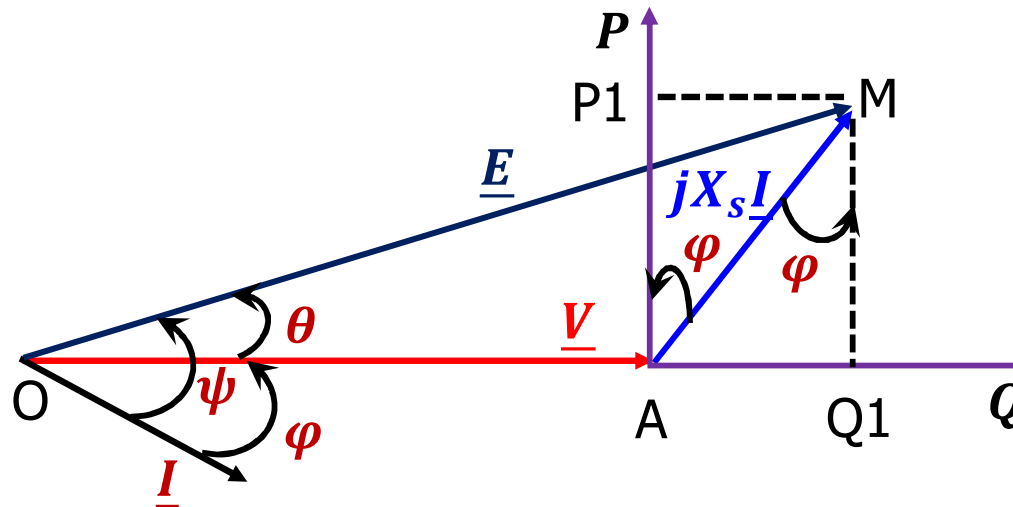
$$P = 3VI \cos \varphi ; Q = 3VI \sin \varphi$$

- La projection de AM sur deux axes orthogonaux donne:

$$AP_1 = X_s I \cos \varphi ; AQ_1 = X_s I \sin \varphi$$

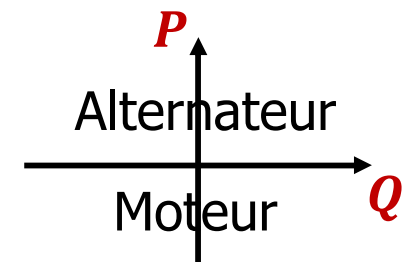
- D'où:

$$AP_1 = \frac{X_s}{3V} P = kP ; AQ_1 = \frac{X_s}{3V} Q = kQ ; k = \frac{X_s}{3V}$$



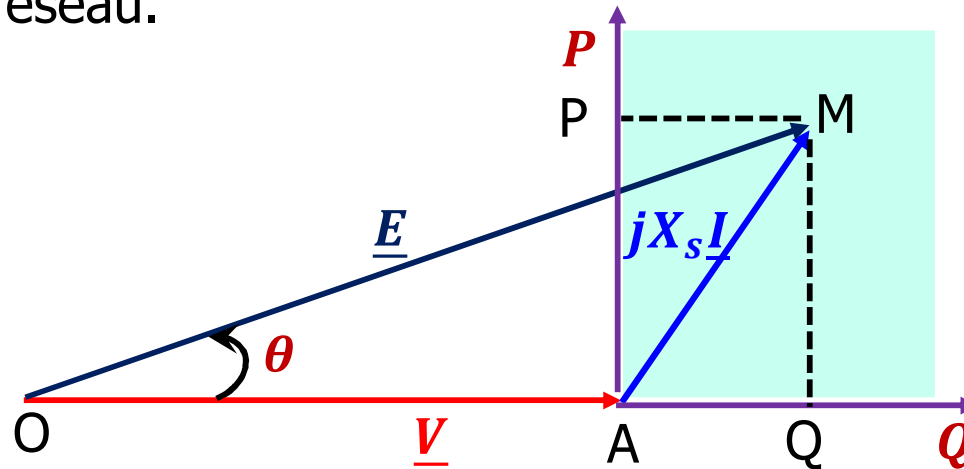
Machine asynchrone triphasée

- Comme $X_s = L_s \omega$ et V sont fixes, les deux axes AP et AQ peuvent être gradués en valeurs de la puissance active et la puissance réactive à un coefficient près $k = \frac{X_s}{3V}$;
- Le point M de coordonnées (P1,Q1) représente le point de fonctionnement, on peut tracer le lieux de M:
 - ✓ À $\varphi = cst$: droite AM;
 - ✓ À $P = cst$: droite P1M;
 - ✓ À $Q = cst$: droite Q1M;
 - ✓ À $I = cst$: cercle de centre A et de rayon AM;
 - ✓ À $E = cst$ ($I_e = cst$): cercle de centre 0 et de rayon OM;
- Le point de fonctionnement peut se situer dans un des quatre quadrants selon le signe des puissances active réactive.
- Il suffit pour cela d'agir sur la valeur efficace de la f.é.m E , c'est à dire sur le courant d'excitation I_e .
- On conserve la convention de signe représentée sur le schéma du modèle équivalent par phase de la machine:
convention générateur
 - ✓ Si $P > 0$, le fonctionnement est alternateur;
 - ✓ si $P < 0$, le fonctionnement est moteur.

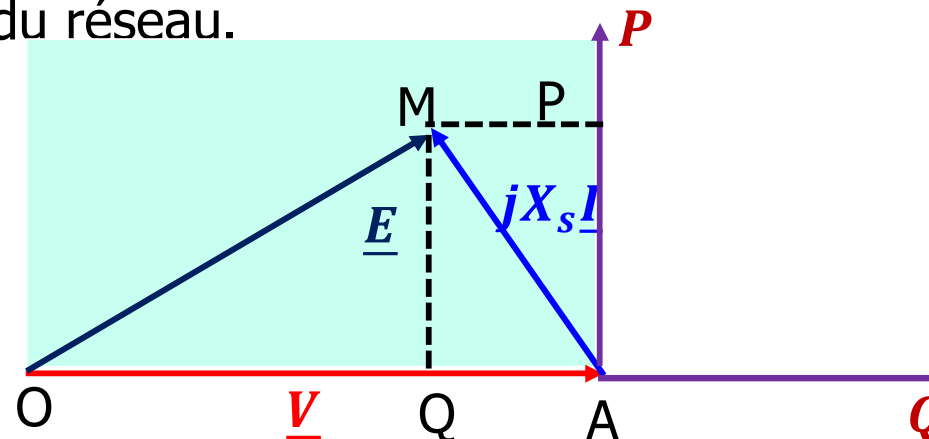


Machine asynchrone triphasée

1^{er} cas: $P > 0$ et $Q > 0$: La machine synchrone fonctionne en alternateur sur-excité ($I_e > I_{en}$): qui fournit une puissance active et une puissance réactive au réseau.



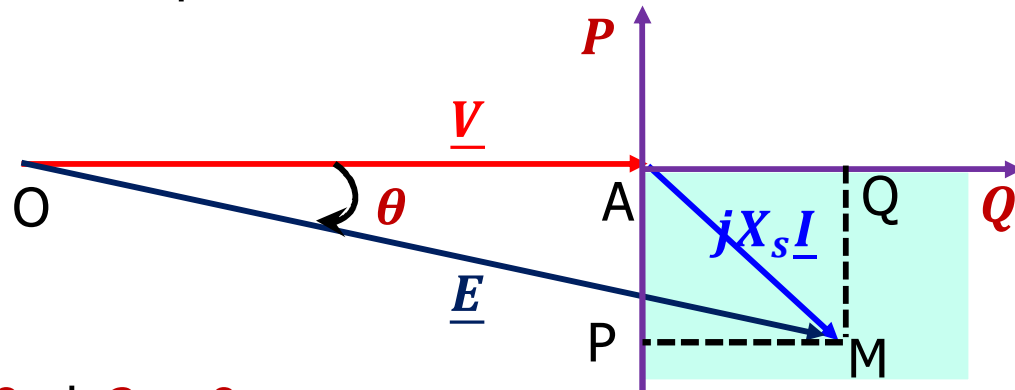
2^{ème} cas: $P > 0$ et $Q < 0$: La machine synchrone fonctionne en alternateur sous-excité ($I_e < I_{en}$): qui fournit une puissance active au réseau et absorbe une puissance réactive du réseau.



Machine asynchrone triphasée

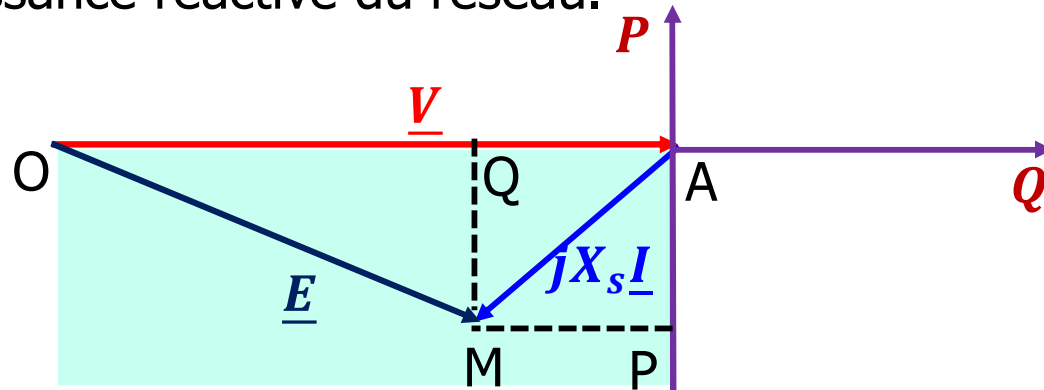
3^{ème} cas: $P < 0$ et $Q > 0$

- La machine synchrone fonctionne en moteur sur-excité:
 - Qui absorbe une puissance active du réseau;
 - Qui fournit une puissance réactive au réseau.



4^{ème} cas: $P < 0$ et $Q < 0$

- La machine synchrone fonctionne en moteur sous-excité:
 - Qui absorbe une puissance active du réseau;
 - Qui absorbe une puissance réactive du réseau.



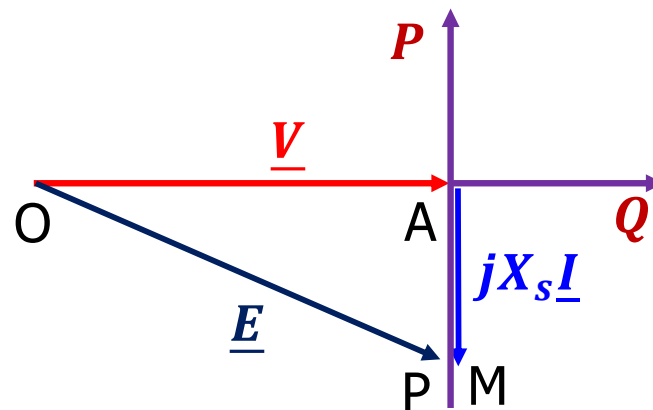
Machine asynchrone triphasée

5^{ème} cas: $P < 0$ et $Q = 0$

- La machine synchrone fonctionne en moteur à l'excitation normale ($I_e = I_{en}$), qui n'absorbe que de la puissance active du réseau;

Remarque 1:

- La machine synchrone est la seule machine qui peut fonctionner en moteur à $\cos\varphi = 1$.
- Le moteur synchrone présente un facteur de puissance réglable;



Compensateur synchrone:

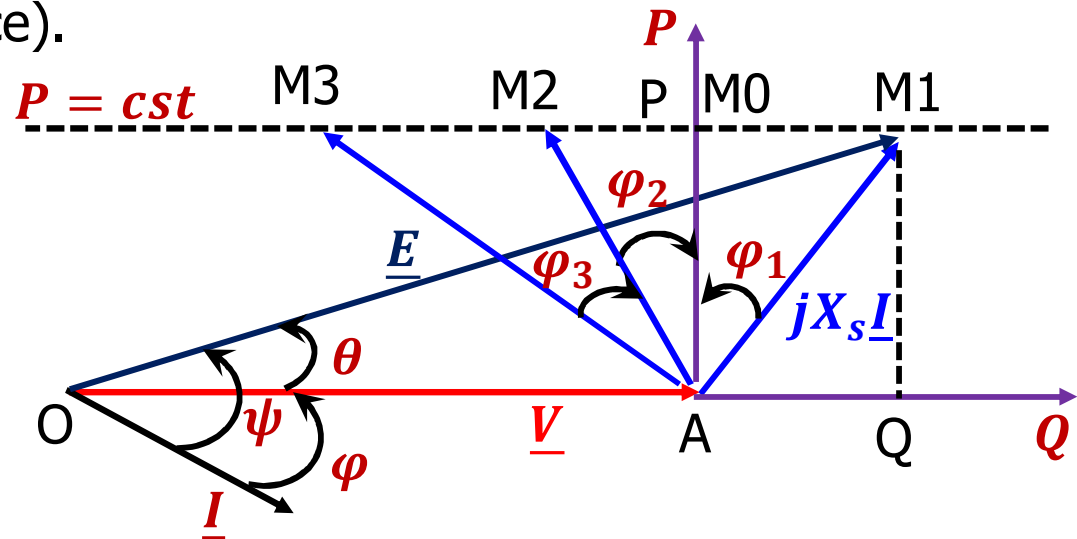
- Un moteur synchrone qui tourne à vide, la puissance active est nulle $P = 0$ (couple résistant nul), et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur le réseau en ajustant l'excitation selon les besoins. Le moteur surexcité (fournit du réactif au réseau) permet d'améliorer le facteur de puissance d'une installation.

Machine asynchrone triphasée

- Le point de fonctionnement se déplace sur l'axe AQ
 - ✓ Sous-excité, il absorbe la puissance réactive et se comporte comme une inductance réglable;
 - ✓ Sur-excité, il fournit la puissance réactive et se comporte comme un condensateur réglable.

2.3. Fonctionnement à puissance active constante

- L'alternateur étant accroché sur le réseau. On règle la turbine pour que le couple mécanique appliqué reste constant $C_m = cst$;
- La machine synchrone fournit au réseau une puissance active constante $P = cst$.
- Si on fait varier I_e , E varie, le point M se déplace sur la droite d'ordonnée $P = cst$ (droite d'équipuissance).
- Si I_e augmente, E croît, le point M se déplace vers la droite. L'alternateur peut fournir ou absorber de la puissance réactive sur le réseau.



Machine asynchrone triphasée

Remarque:

- Le réglage du débit de la turbine fixe le couple mécanique appliqué et détermine la puissance active que peut fournir la machine au réseau;
- Le courant d'excitation détermine la puissance réactive échangée avec le réseau;

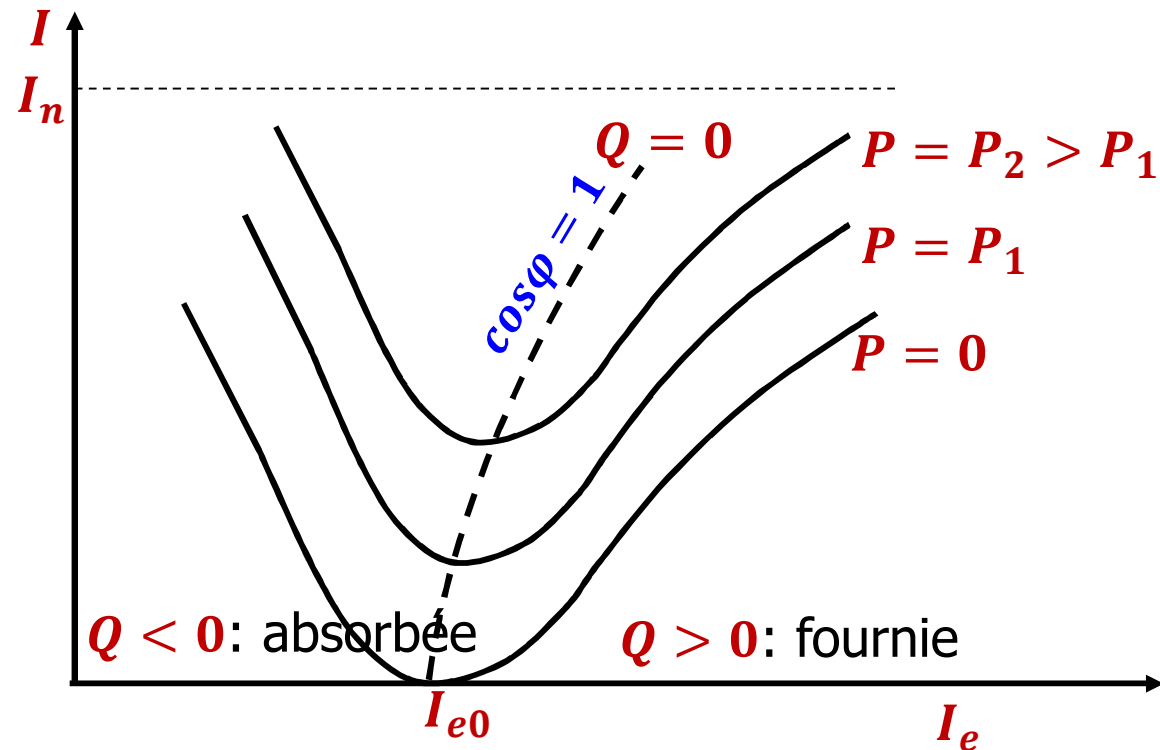
Courbes de Mordey: $I = f(I_e)$

- Le courant d'excitation I_e permet aussi de régler la valeur du facteur de puissance $\cos\varphi$;
- à gauche de l'axe de puissances actives AP ($Q < 0$), si la valeur de I_e augmente, le courant I fournit au réseau diminue;
- sur l'axe de puissances actives AP ($Q = 0, \cos\varphi = 1$), le courant I passe par un minimum;
- à droite de l'axe de puissances actives AP ($Q > 0$), si la valeur de I_e augmente, le courant I augmente;
- On trace les courbes de variation du courant I en fonction du courant d'excitation I_e à $V = cst$, $f = cst$ et $P = cst$, on obtient les courbes de Mordey.

Machine asynchrone triphasée

Remarque:

- Pour le fonctionnement en moteur synchrone, on obtient le même réseau de courbes :



2.3. Limites ou enveloppe de fonctionnement

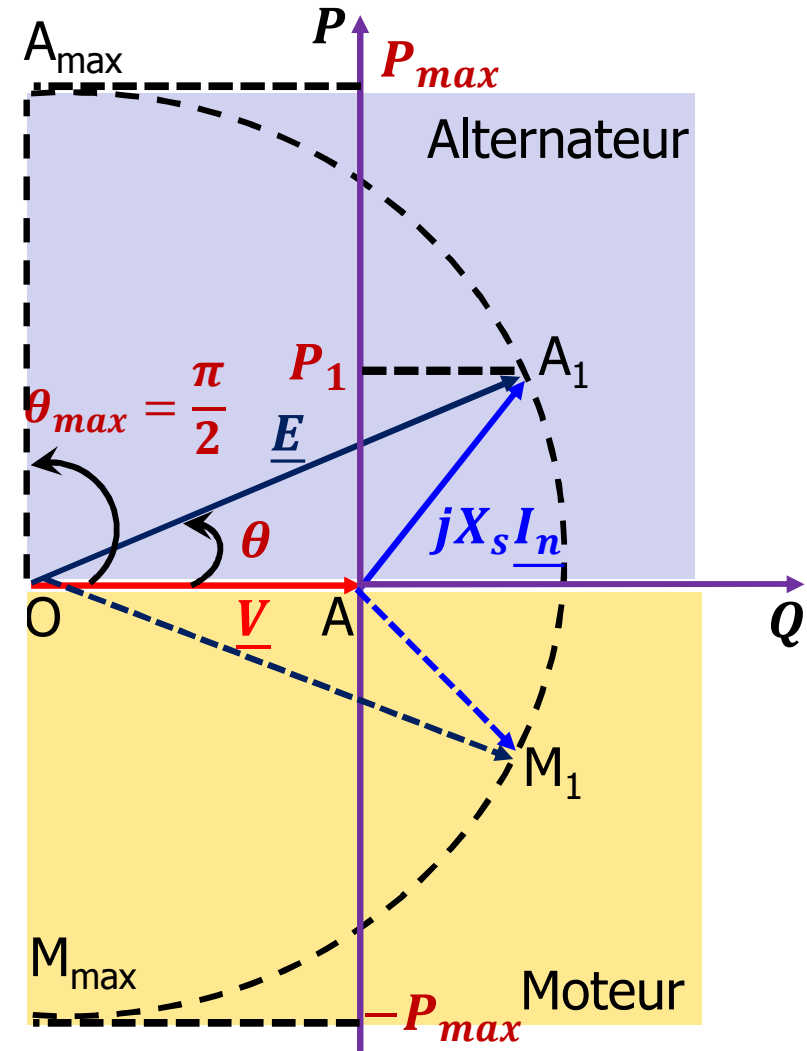
La machine est reliée à un réseau puissant ($V = cst$; $f = cst$). Les limites de la machine sont dans 2 domaines :

- Domaine électrique: $I < I_n$; $I_e < I_{emax} \Leftrightarrow E < E_{max}$; $\theta < \theta_{max}$;
- Domaine mécanique: $C_{em} < C_{max} \Leftrightarrow P < P_{max}$; $\Omega = \Omega_s$;

Machine asynchrone triphasée

Puissance maximum:

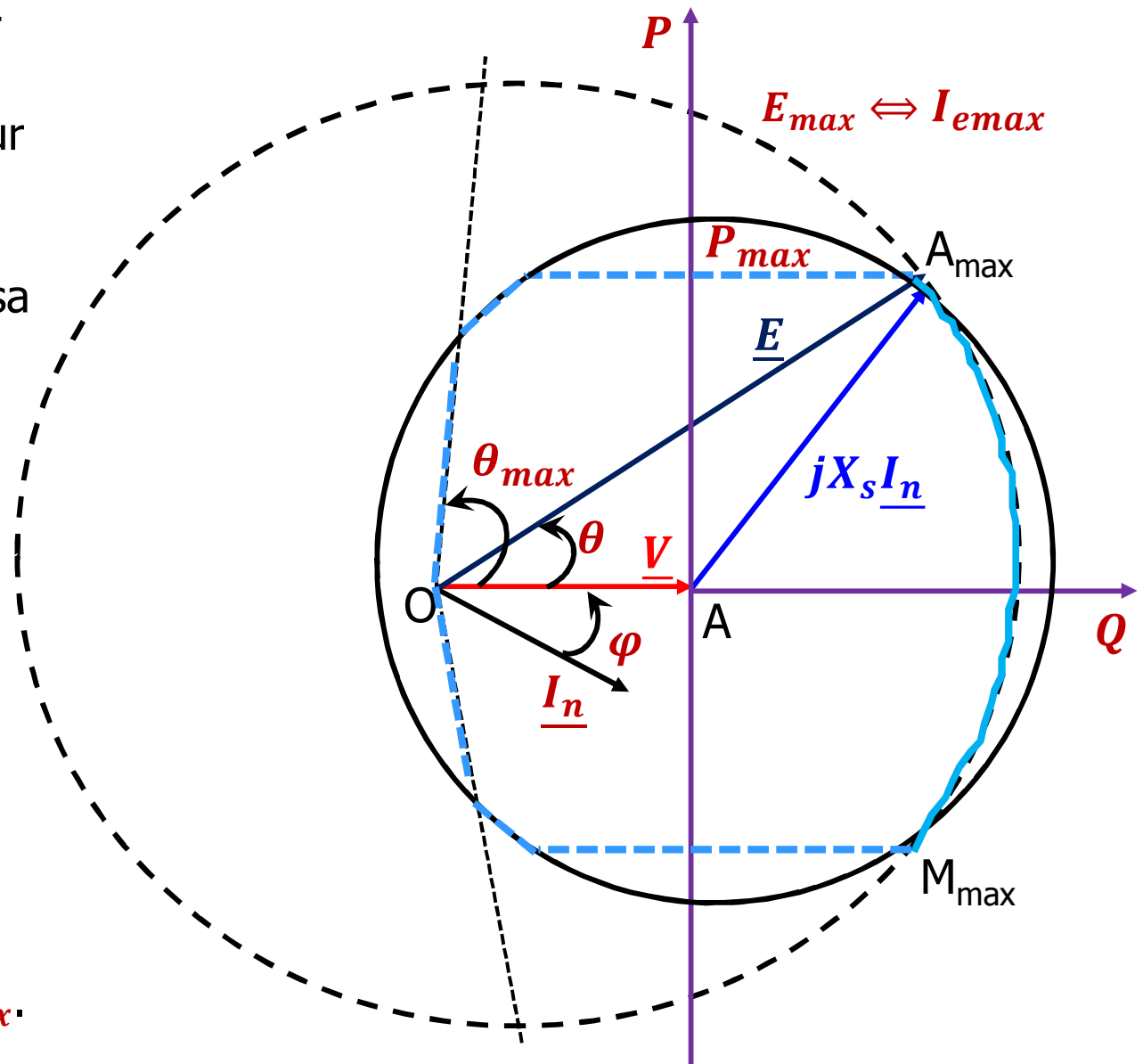
- Pour une excitation constante $I_e = \text{cst}$, la puissance fournie ou absorbée au réseau par la machine est limitée par un maximum P_{max} ;
- Lorsque le couple mécanique sur l'arbre de l'alternateur augmente, la puissance active fournie au réseau augmente;
- le point de fonctionnement se déplace selon un cercle de centre O et de rayon E passant du point A_1 jusqu'à atteindre A_{max} . En dehors de ce point, la puissance active diminue.
- Lorsque le couple résistant sur l'arbre du moteur augmente, la puissance active absorbée du réseau augmente;
- Le point de fonctionnement se déplace selon un cercle de centre O et de rayon E passant du point M_1 jusqu'à atteindre M_{max} . En dehors de ce point, la puissance active diminue.



Machine asynchrone triphasée

Diagramme vectoriel avec limites de fonctionnement (domaine d'exploitation):

- La f.é.m. est limitée, par la saturation du circuit magnétique, à une valeur E_{max} :
- Le courant débité doit être inférieur ou égal à sa valeur nominale I_n : cercle centré en A et de rayon $X_s I_n$;
- L'angle θ doit être inférieur à 90° . Pour conserver une marge de sécurité et éviter le décrochage, on fixe en général une limite inférieure proche de 90° :
 $-\theta_{max} < \theta < \theta_{max}$,
 correspondant à
 $P < P_{max}$ et $C_{em} < C_{max}$.



3. Fonctionnement en moteur synchrone

3.1. Principe de fonctionnement:

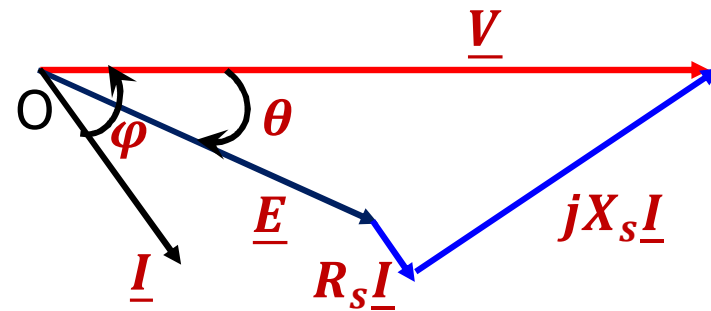
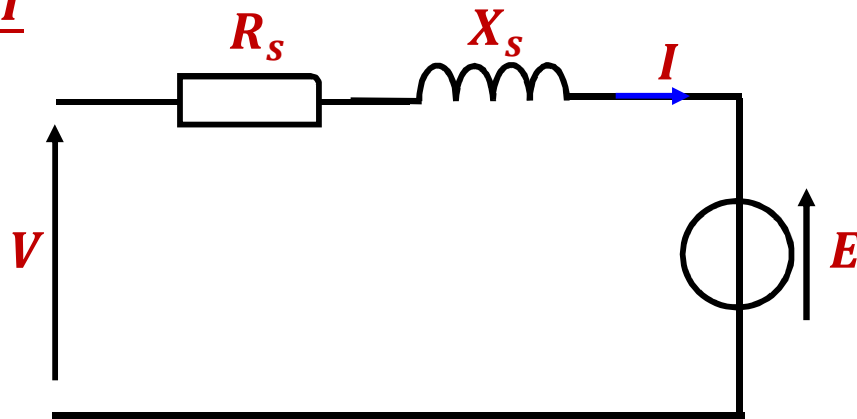
- Le stator alimenté par un système de tensions triphasé (v_1, v_2, v_3) crée un champ tournant dans l'entrefer.
- Ce champ magnétique tourne à la vitesse de rotation $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ en (rad/s),
 $\Omega_s = 2\pi n_s$; $n_s = \frac{f}{p}$ en (tr/s); $\omega = 2\pi f$ avec f la fréquence du réseau d'alimentation des bobinages statoriques, et p le nombre de paires de pôles.
- Le rotor composé de p paires de pôles va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne de manière synchrone à la même vitesse de rotation que le champ tournant du stator. $\Omega = \Omega_s$;
- Cette vitesse est donc liée à la fréquence du réseau, et comme la fréquence du réseau est constante, la vitesse du moteur est rigoureusement constante .
- La vitesse Ω ne varie ni avec la charge (C_r), ni avec la tension d'alimentation du réseau (V).

Machine asynchrone triphasée

3.2. Schéma équivalent d'une phase:

- Lorsque le moteur tourne, le flux créé par le champ tournant du rotor, induit une f.em E dans le stator qui dépend du courant continu d'excitation I_e ;
- Lorsque le moteur tourne à vide, et si on ajuste l'excitation afin que $\underline{E} = \underline{V}$, le courant absorbé par les enroulements du stator est presque nul $\underline{I} \approx \underline{0}$,
- Si on applique une charge au moteur, le courant \underline{I} augmente; \underline{E} se décale en arrière de l'angle θ par rapport à \underline{V} ;

Ce qui donne le schéma équivalent et le diagramme vectoriel: $\underline{V} = \underline{E} + R_s \underline{I} + jX_s \underline{I}$



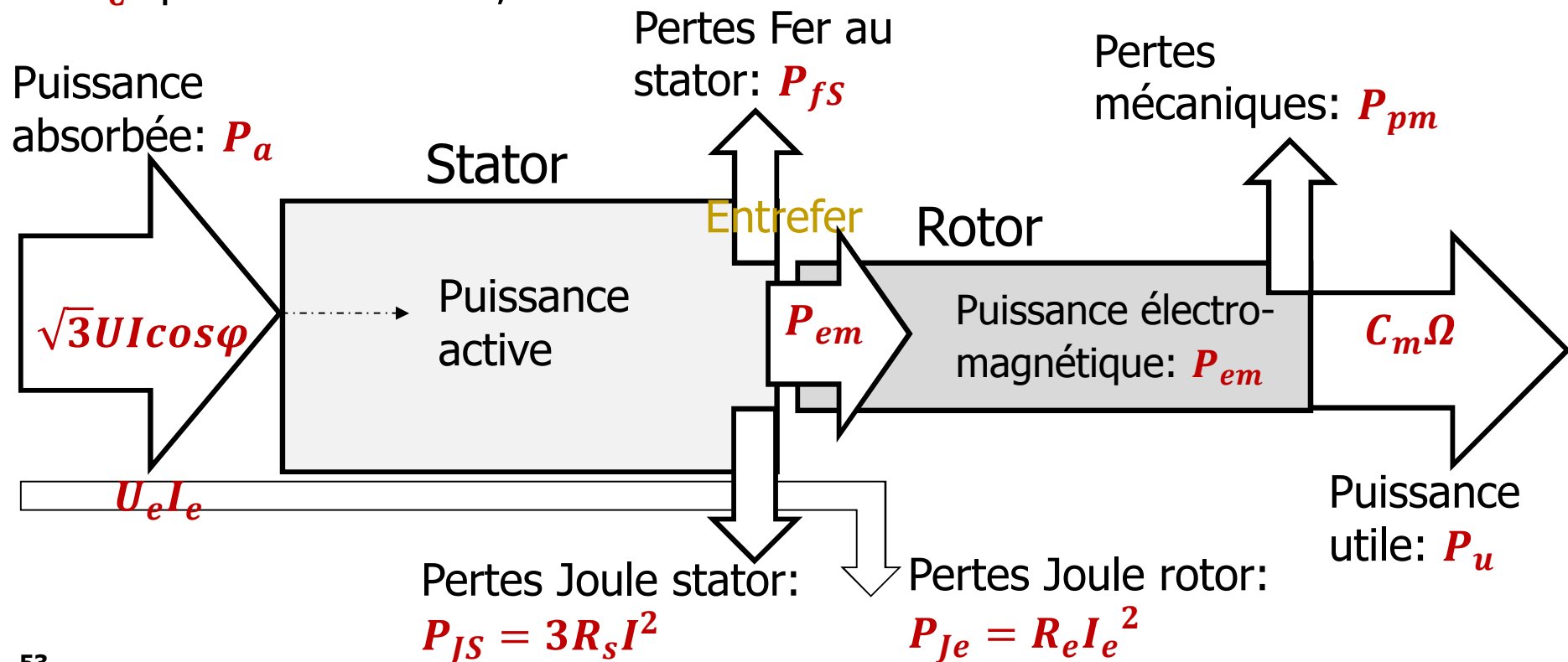
□ Rendement d'un moteur synchrone:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi - \sum \text{pertes}}{\sqrt{3}UI \cos \varphi} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi - (P_{Js} + P_{Je} + P_c)}{\sqrt{3}UI \cos \varphi}$$

Machine asynchrone triphasée

avec:

- $P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi + U_e I_e$: la puissance active absorbée;
- $P_u = C_m \Omega$: la puissance mécanique développée sur l'arbre du moteur et fournie à la charge;
- P_{Je} : pertes Joule dans le rotor;
- P_{Js} : pertes Joule dans le stator;
- P_C : pertes collectives;



Machine asynchrone triphasée

3.3. Démarrage du moteur synchrone

- Un moteur synchrone, alimenté directement par un réseau triphasé de tension d'amplitude et de fréquence constantes, présente un couple de démarrage nul (le rotor a une vitesse nulle au démarrage $\Omega \neq \Omega_s$, ne peut pas accrocher le champ tournant statorique);
- Le moteur synchrone ne peut démarrer seul directement sur le le réseau de fréquence f fixe;
- Le moteur synchrone peut développer un couple élevé au voisinage du synchronisme (il faut l'accrocher au réseau).

On utilise un des trois procédés de démarrage:

□ **Entraînement au voisinage du synchronisme:**

- Pour les grandes puissances, le moteur est démarré comme un alternateur en l'entraînant au voisinage du synchronisme avec un moteur auxiliaire.

□ **Démarrage à fréquence variable:**

- Pour les moyennes puissances, le moteur est généralement alimenté par un variateurs de vitesse (tension et fréquence variable);
- L'autopilotage par une tension à faible fréquence, permettra le démarrage progressif (en commençant par de faibles vitesses) et en imposant un couple important dès le démarrage.

Machine asynchrone triphasée

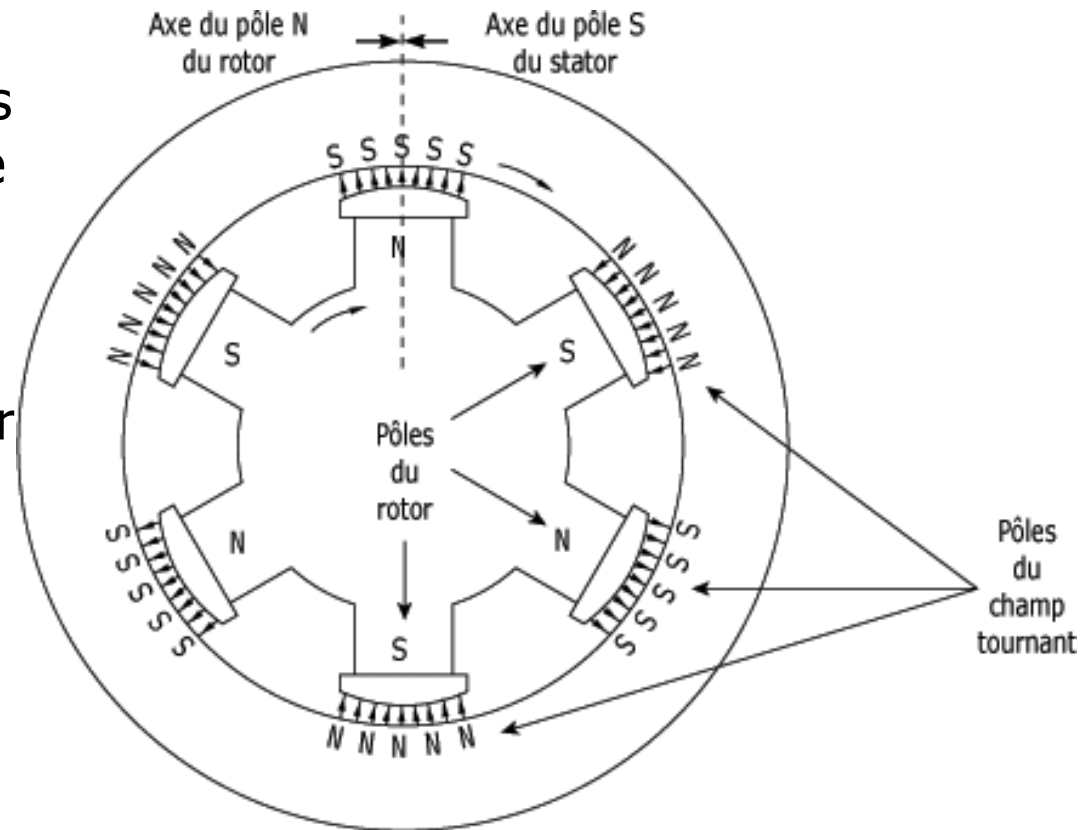
□ Démarrage en moteur asynchrone:

- Pour les faibles puissances, un démarrage en asynchrone est possible ; c'est-à-dire une alimentation directe du stator, le rotor étant non alimenté.
- Les courants induits sur le rotor, assurent le démarrage. La roue polaire est alimentée par l'excitation continue quand sa vitesse est proche du synchronisme.

Le moteur est donc accroché, il tourne à sa vitesse synchrone sous l'effet du changement continu de la polarité des pôles du stator.

Moteur synchrone à vide:

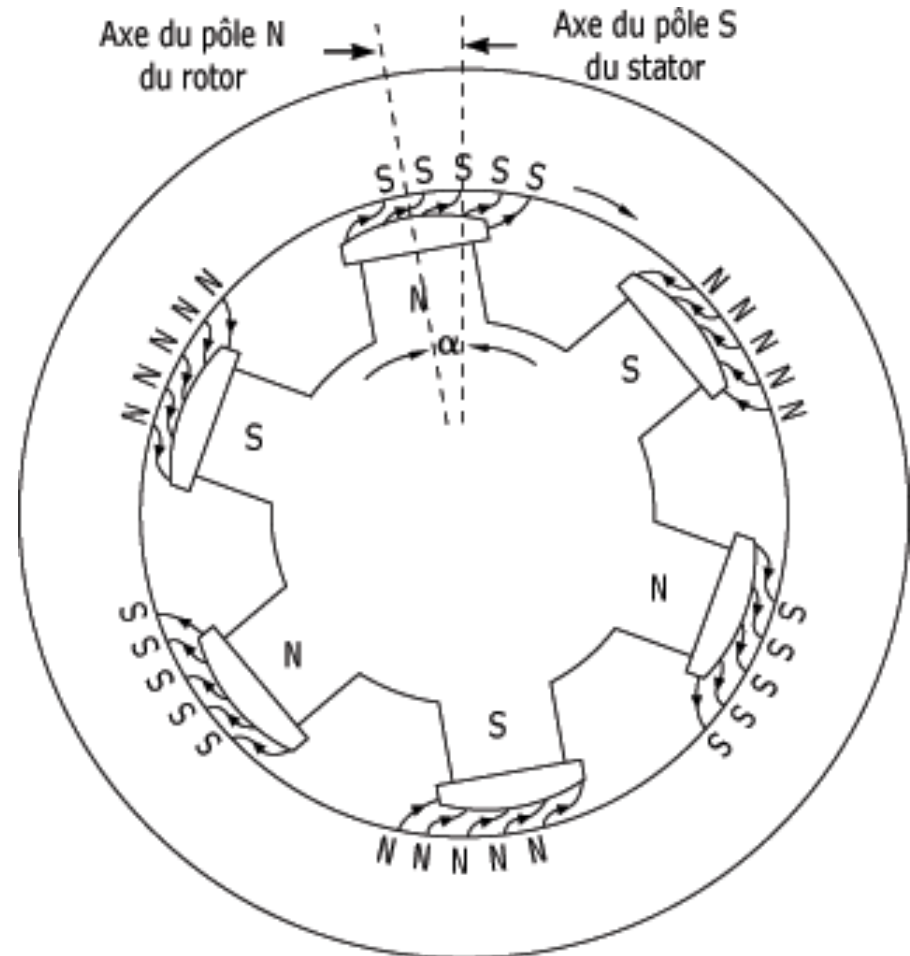
- Lorsque le moteur synchrone tourne à vide, les pôles du rotor sont vis-à-vis des pôles du champ tournant ($\theta = 0$; $C_{em} = 0$);
- Alignement des pôles du rotor et du stator d'un moteur synchrone.



Machine asynchrone triphasée

Moteur synchrone en charge:

- Lorsque la charge mécanique appliquée à l'arbre du moteur augmente, le courant I augmente, les axes de E et V se décalent de l'angle θ ;
- Le rotor a tendance à se décaler arrière de l'axe central du stator ($\theta \nearrow \Rightarrow C_{em} \nearrow$).
- L'angle de décalage entre l'axe des pôles du rotor et l'axe du stator croît à mesure que la charge augmente;
- Si la charge devient trop importante, les pôles du rotor décrochent des pôles du stator, provoquant ainsi l'arrêt du moteur ($\theta > \theta_{max} \Rightarrow C_{em} > C_{max} \Rightarrow \Omega \rightarrow 0$);
- Plus le décalage augmente, plus le courant statorique absorbé par le réseau croît.



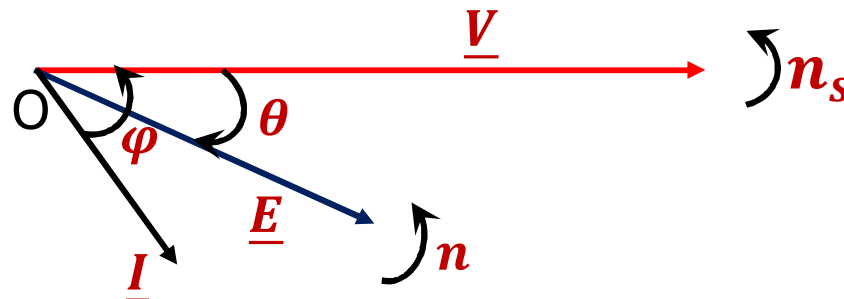
Machine asynchrone triphasée

3.4. Moteur synchrone autopiloté

- Moteur alimenté à fréquence variable par des convertisseurs électroniques de puissance (onduleur). Ceci permet le démarrage et le fonctionnement dans un large domaine de vitesse et de couple, et d'éliminer le risque de décrochage des moteurs synchrones non autopilotés.
- l'autopilotage consiste, grâce à une boucle d'asservissement, à régler l'angle entre les champs statorique et rotorique.

□ **Moteur alimenté en tension et fréquence réglable:** $\frac{V}{f} = cst$

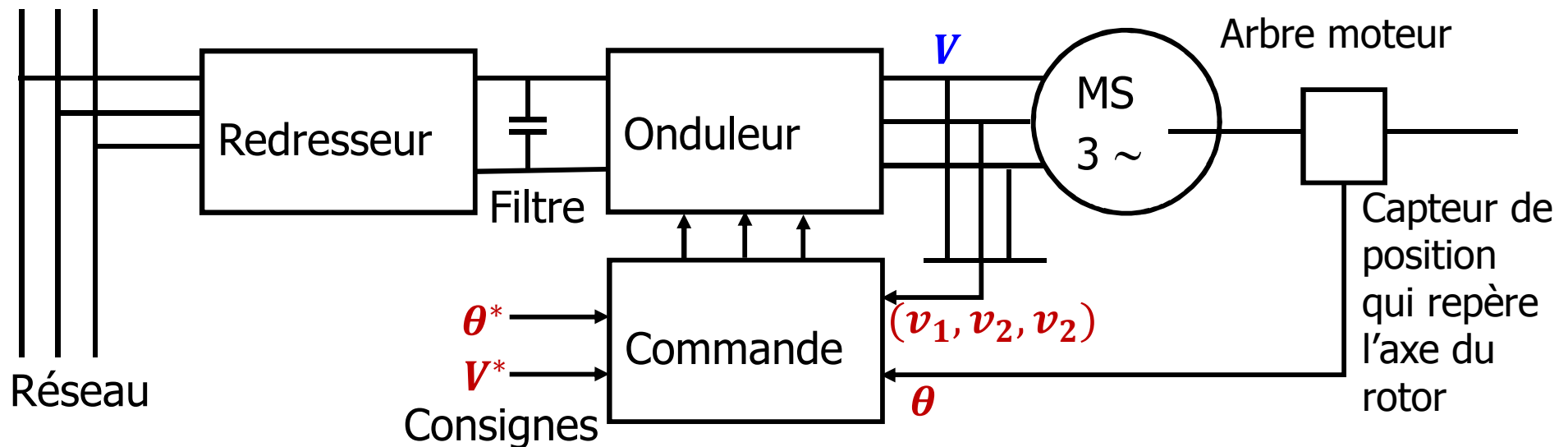
- Les tensions statoriques sont imposées par l'onduleur:
- L'expression de couple électromagnétique est: $C_{em} = \frac{3}{\Omega X_s} V E \sin\theta$
- Au synchronisme $\Omega = \Omega_s$, ainsi $E = k\Omega_s$, pour $I_e = cst$:
- On obtient: $C_{em} = \frac{3pk}{2\pi L_s} \left(\frac{V}{f}\right) \sin\theta$



Machine asynchrone triphasée

- La vitesse de rotation d'un moteur synchrone dépend uniquement de sa fréquence d'alimentation;
- Si f augmente, Ω_s augmente, donc Ω augmente;
- Si θ augmente, C_{em} augmente;
- Si θ dépasse $\frac{\pi}{2}$, C_{em} diminue, si le couple moteur diminue, Ω diminue, il n'y a plus de synchronisme (décrochage).

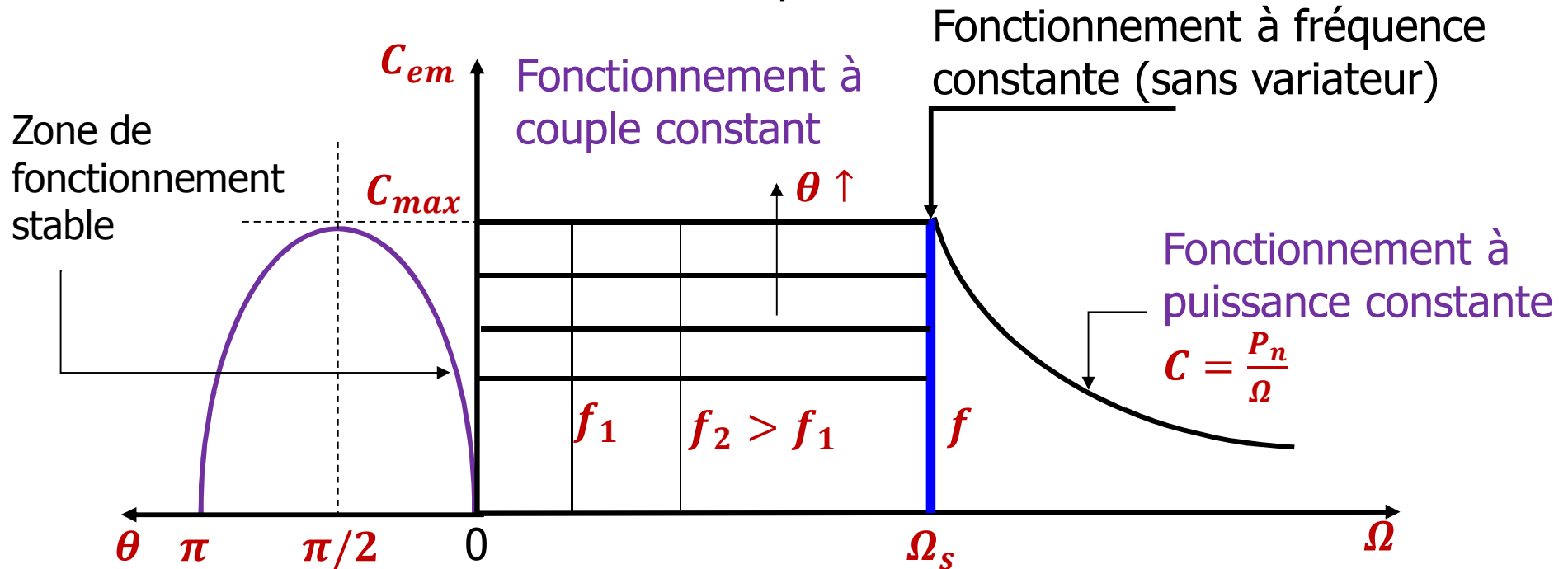
Structure de la commande:



Machine asynchrone triphasée

Caractéristique électromécanique: $C_{em} = f(\Omega)$

Modes de fonctionnement du moteur synchrone:



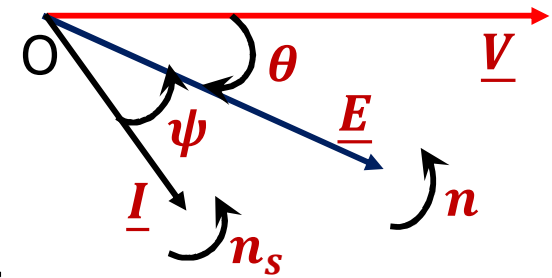
- De 0 à Ω_s , la vitesse est ajustée par la fréquence f , le couple par l'angle interne θ , On maintient $V/f = cst$;
- Au-delà de Ω_s , $V = V_n = cst$, la vitesse peut augmenter, mais la puissance demeure constante à P_n .

Remarque: Pour un moteur raccordée au réseau ($f = cst$), le couple varie par la variation de la charge mécanique.

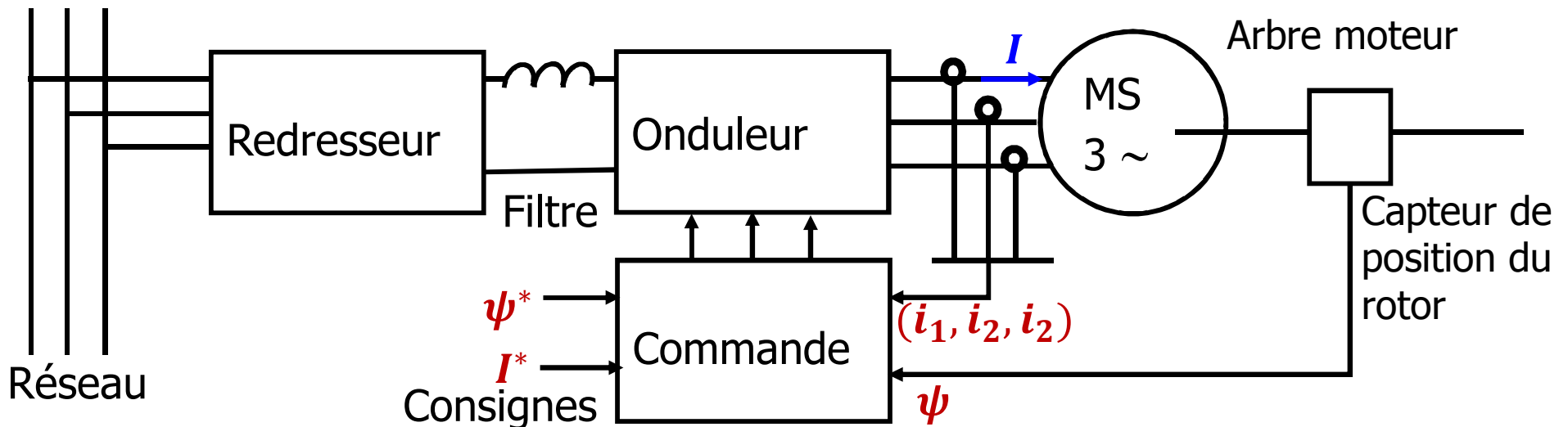
Machine asynchrone triphasée

□ Moteur alimenté en courant et fréquence réglable:

- Les courants statoriques sont imposés par l'onduleur:
- L'expression du couple électromagnétique: $C_{em} = \frac{3}{\Omega} EI \cos \psi = 3kI \cos \psi$
- Si ψ diminue C_{em} augmente; accélération; synchronisation.
- Si ψ augmente C_{em} diminue; Si ψ déplace $\frac{\pi}{2}$ décélération, décrochage.
- La vitesse de rotation fixe la pulsation des courants statoriques et assure le synchronisme des champs.

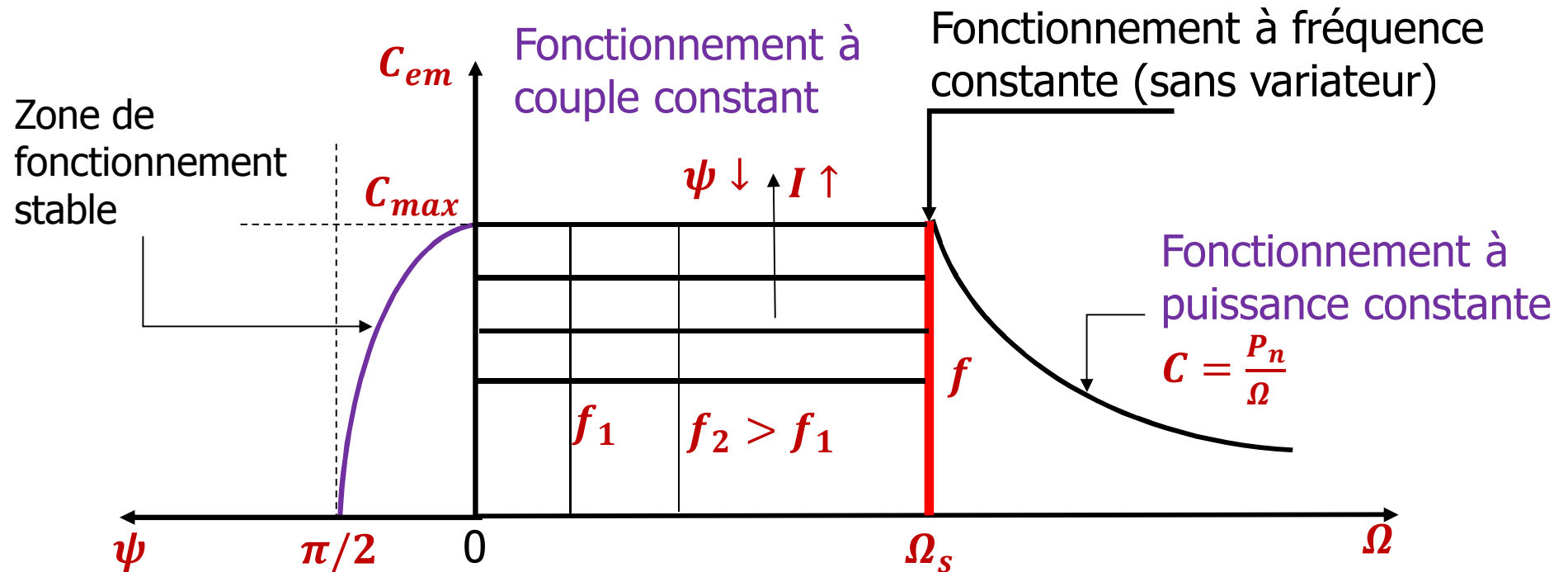


Structure de la commande:



Machine asynchrone triphasée

Caractéristique électromécanique: $C_{em} = f(\Omega)$





Machine asynchrone triphasée

Conclusion:

- Les machines synchrones peuvent fonctionner en alternateur comme en moteur avec un bon rendement.
- Historiquement, ces machines étaient essentiellement utilisées en génératrice,
- Le développement de l'électronique de puissance rend maintenant possible le fonctionnement en moteur.
- Les moteurs synchrones se trouvent dans de nombreuses applications industrielles, pour une large gamme de puissance de quelques watt au gigawatt (drones, robots, véhicules électriques, traction TGV, pompage, compresseurs,...).

Les avantages et inconvénients du moteur synchrone sont repris ci-dessous :

Avantages:

- Il peut travailler avec un facteur de puissance proche de 1 ($\cos\phi \approx 1$). Il contribue donc à régler le facteur de puissance global de l'installation électrique.
- la vitesse du moteur est constante quelle que soit la charge.
- La puissance massique est grande.



Machine asynchrone triphasée

Inconvénients:

- S'il n'est pas associé à un variateur de vitesse, il a des difficultés à démarrer.
- Il peut décrocher en cas de forte charge.
- Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.