

Questionnaire à choix multiple : Fonctionnement en moteur ou en générateur de la machine asynchrone

Corrigé

1. Dans une machine asynchrone, le couple électromagnétique est un couple de type électrodynamique.
 - vrai
 - faux
2. La vitesse nominale de rotation d'une machine asynchrone dépend principalement de son nombre de paires de pôles et de la fréquence du réseau d'alimentation.
 - vrai
 - faux
3. D'un point de vue électrique, la cage du rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil à simple cage peut être assimilée à un système triphasé d'enroulement mis en court circuit.
 - vrai
 - faux
4. La zone normale d'utilisation d'une machine asynchrone est située aux environs de la vitesse de synchronisme :
 - car c'est ce n'est qu'entre la vitesse correspondant au couple maximum et la vitesse de synchronisme qu'on peut avoir un point de fonctionnement stable.
 - vrai
 - faux
 - car c'est dans cette zone que la machine à le meilleur rendement.
 - vrai
 - faux

5. Dans la zone utile de fonctionnement, le facteur de puissance ($\cos \varphi$) d'une machine asynchrone est d'autant plus mauvais qu'elle est faiblement chargée.

- vrai
- faux

6. À fréquences statorique et rotorique constantes, le couple que développe une machine asynchrone est proportionnel à la tension d'alimentation.

- vrai
- faux

À fréquence rotorique constante, le couple n'est en revanche que peu affecté par une variation de la tension d'alimentation pour autant que le rapport entre celle-ci et la fréquence statorique soit maintenu constant.

- vrai
- faux

7. À tension et fréquence d'alimentation données, la valeur maximale du couple dépend principalement :

- de la valeur des inductances de fuite ℓ_{cs} et ℓ'_{cr} .
- de la résistance des enroulements rotoriques R'_r .
- de la résistance des enroulements statoriques R_s .
- de la valeur de l'inductance de magnétisation L_μ .

(plusieurs réponses possibles)

La valeur du glissement pour laquelle ce couple maximum est atteint dépend lui principalement :

- de la valeur des inductances de fuite ℓ_{cs} et ℓ'_{cr} .
- de la résistance des enroulements rotoriques R'_r .
- de la résistance des enroulements statoriques R_s .
- de la valeur de l'inductance de magnétisation L_μ .

(plusieurs réponses possibles)

Enfin, la pente de la caractéristique couple-vitesse dans la zone utile de fonctionnement dépend principalement :

- de la valeur des inductances de fuite ℓ_{cs} et ℓ'_{cr} .
- de la résistance des enroulements rotoriques R'_r .
- de la résistance des enroulements statoriques R_s .
- de la valeur de l'inductance de magnétisation L_μ .

(plusieurs réponses possibles)

8. Dans le cas d'une machine asynchrone à rotor bobiné, lors de démarrage direct à partir du réseau, on relie les enroulements rotoriques à une résistance triphasée qu'on court-circuite progressivement :

- pour augmenter le couple durant la phase initiale de démarrage (c'est-à-dire lorsque la vitesse de rotation est faible).

- vrai
- faux

- pour limiter le courant absorbé au réseau durant la phase initiale de démarrage.

- vrai
- faux

- pour réduire l'énergie dissipée au rotor durant la phase initiale de démarrage.

- vrai
- faux

9. La machine asynchrone fonctionne en moteur, c'est à dire qu'elle absorbe de la puissance électrique au réseau auquel elle est connectée et fournit une puissance mécanique à la charge qu'elle entraîne lorsque son glissement est...

- ... négatif ($\gamma < 0$).
- ... compris entre 0 et 1 ($0 < \gamma < 1$).
- ... supérieur à 1 ($\gamma > 1$).

(plusieurs réponses possibles)

Elle fonctionne en générateur, c'est à dire qu'elle absorbe de la puissance au système mécanique auquel elle est reliée et fournit une puissance électrique au réseau auquel elle est connectée lorsque son glissement est...

- ... négatif ($\gamma < 0$).
- ... compris entre 0 et 1 ($0 < \gamma < 1$).
- ... supérieur à 1 ($\gamma > 1$).

(plusieurs réponses possibles)

10. Pour que dans la zone utile de fonctionnement, un moteur asynchrone ait un bon rendement, il faut que la résistance des enroulements rotoriques (ou de la cage) soit faible.

- vrai
- faux

Il serait maximum, si on pouvait construire une machine à induction avec des enroulements rotoriques supraconducteurs ($R'_r = 0$).

- vrai
- faux

Justifications

1. *Pas de justification.*
2. *Pas de justification.*
3. *Pas de justification.*
4. Comme cela est indiqué au §4.2.7 du chapitre 4 du [livre](#) (lien cliquable), de la puissance transféré au rotor seule une fraction $(1 - \gamma)$ est transformé en puissance mécanique. Le reste est transformé en pertes par effet Joule dans la résistance du rotor.

A ces pertes s'ajoute les pertes magnétiques (quasiment constantes) et les pertes par effet Joule au stator qui sont d'autant plus élevées que le courant statorique est important. Or une valeur élevée de γ correspond une faible valeur de l'impédance équivalente du rotor (égale à $(j\omega_\infty \ell'_{cr} + R'_r/\gamma)$) et donc à une valeur élevée de ce courant.

On privilégiera donc comme zone utile de fonctionnement la partie de la caractéristique située aux environs de la vitesse de synchronisme car c'est dans cette zone que les pertes cuivre tant au rotor qu'au stator sont minimales.

En revanche, la stabilité du point de fonctionnement d'un système électromécanique dépend l'allure des caractéristiques couple-vitesse tant du moteur que de la charge qu'il entraîne.

Il est donc *a priori* impossible d'affirmer qu'on ne peut avoir de point de fonctionnement stable en dehors de la zone de la caractéristique couple-vitesse du moteur asynchrone située entre la vitesse correspondant au couple maximum et la vitesse de synchronisme.

À titre d'illustration, on peut considérer les quatre exemples suivants.

- ◇ Dans le cas du système électromécanique représenté sur la figure 1, le couple de charge C_r est proportionnel au carré de la vitesse (comme dans le cas d'un système de pompe ou de ventilation). La caractéristique couple-vitesse de la charge coupe celle du moteur au point A qui est donc le point de fonctionnement du système en régime permanent.

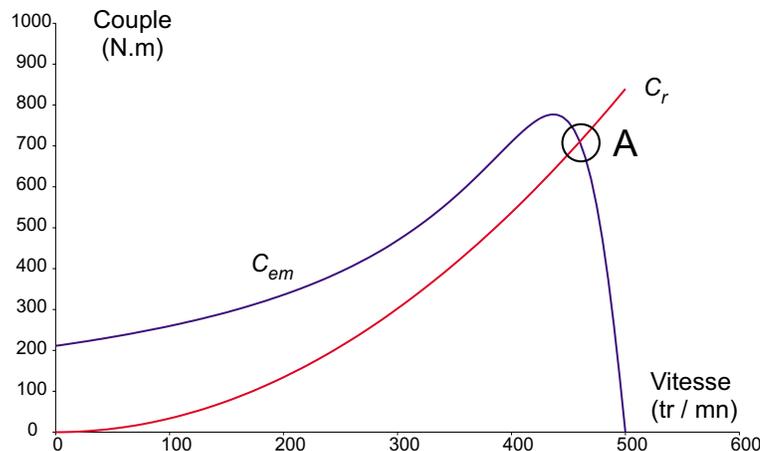


FIG. 1 – Exemple de système à un point de fonctionnement stable

Sur base de l'hypothèse d'un quasi-régime électrique lors des transitoires mécaniques

(voir §4.1.2 du chapitre 4 du [livre](#) (lien cliquable)), ce point de fonctionnement est stable car la dérivée du couple de charge en fonction de la vitesse ($dC_r/d\omega_m$) y est supérieure à celle du couple moteur ($dC_{em}/d\omega_m$) : la première est d'ailleurs positive et la seconde négative. Cela signifie que toute augmentation pour une raison ou une autre de la vitesse conduit à une augmentation du couple résistant supérieure à l'augmentation du couple moteur (ici on a même une diminution du couple moteur). Compte tenu de l'équation de la dynamique mécanique du système :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em} - C_r,$$

il en résulte une diminution de la vitesse de rotation et un retour à la vitesse d'équilibre.

Réciproquement, si la vitesse devient inférieure à la vitesse du point de fonctionnement, on assistera à une réduction du couple résistant supérieure à la réduction correspondante du couple moteur (qui ici est même en augmentation) et donc à une augmentation de la vitesse pour un retour à la vitesse d'équilibre.

- ◊ Dans le cas du système électromécanique représenté sur la figure 2, le couple de charge C_r est constant, quelque soit la vitesse de rotation. Cela peut correspondre à une application de type treuil, engin de levage, ascenseur... La caractéristique couple-vitesse de la charge coupe celle du moteur aux points A et B.

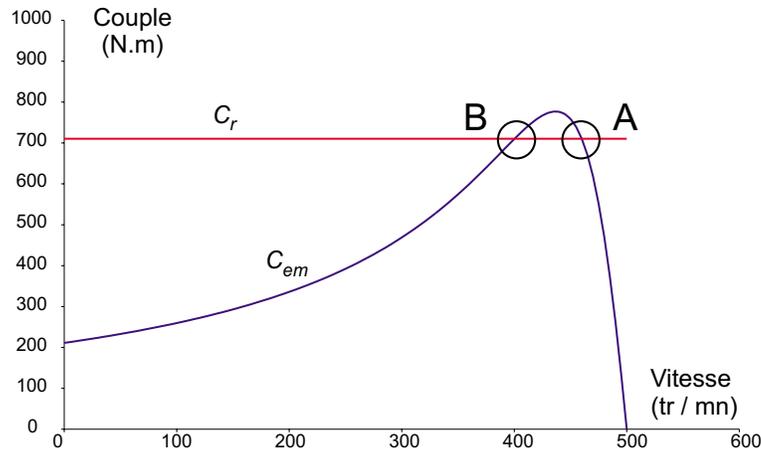


FIG. 2 – Exemple de système à un point de fonctionnement stable et un point de fonctionnement instable

Le point de fonctionnement A qui est situé entre la vitesse pour laquelle le couple est maximum et la vitesse de synchronisme est un point stable. La dérivée du couple résistant (qui est nulle) est supérieure à celle du couple moteur (qui est négative). Ce n'est pas le cas du point B, où la dérivée du couple moteur est positive et donc supérieure à celle du couple résistant.

Cela signifie que si, à partir de cette valeur d'équilibre, la vitesse augmente (même de manière infime) pour une raison ou pour une autre, le moteur continuera à accélérer pour atteindre finalement le point A.

Par contre, si la vitesse est, à un moment donné et quelle qu'en soit encore une fois la raison, inférieure à celle du point d'équilibre B, elle diminuera de plus en plus pour

tendre même théoriquement vers moins l'infini : c'est en particulier le cas lorsqu'on part de la vitesse est nulle. Un tel système ne peut donc démarrer seul : il nécessite l'emploi d'un dispositif auxiliaire (rhéostat de démarrage, variateur électronique...). Ce dispositif devra être réactivé chaque fois que la vitesse passe en dessous d'un certain seuil critique, par exemple la vitesse correspondant au couple maximum que la machine peut développer.

- ◇ Le système dont les caractéristiques couple-vitesse sont donnés sur la figure 3 présente trois points de fonctionnement possibles dont deux stables : les points A et C.

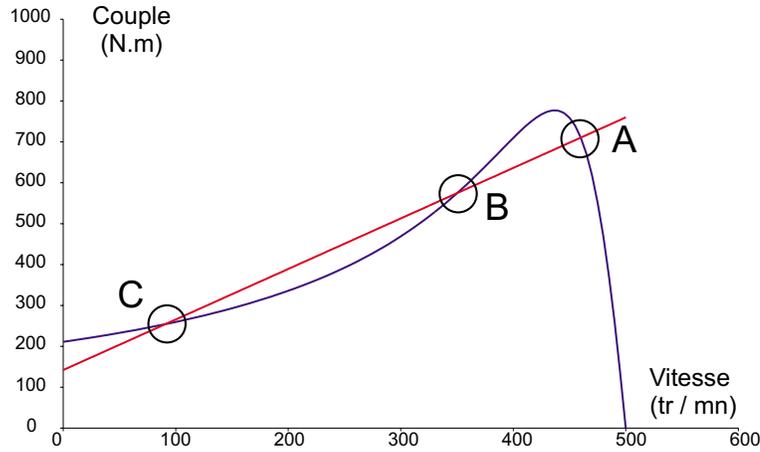


FIG. 3 – Exemple de système à deux points de fonctionnement stables et un point de fonctionnement instable

On notera que le point C ne se situe pas dans la partie de la caractéristique couple-vitesse du moteur située entre la vitesse pour laquelle le couple est maximum et la vitesse de synchronisme.

Si on n'utilise pas de dispositif auxiliaire lors du démarrage, c'est d'ailleurs à ce point C que le système se stabilisera. Il s'agit toutefois d'un point pour lequel le rendement de conversion électromécanique est extrêmement mauvais.

La puissance électrique convertie en puissance mécanique peut être en effet alors représentée par la surface d'aire $C_{em}\omega_m$ (figure 4). Cette puissance ne correspond qu'à une fraction $(1 - \gamma)$ de la puissance transmise au rotor. Cette dernière peut donc être représentée par la surface d'aire $C_{em}\omega_\infty$, la différence entre ces deux surfaces représentant les pertes par effet Joule au rotor.

Si l'on parvient à stabiliser le système autour de son autre point de fonctionnement stable, on constate que le rapport entre la puissance convertie en puissance mécanique et les pertes est beaucoup favorable (figure 5).

5. La zone utile de fonctionnement se situe dans la partie de la caractéristique couple-vitesse comprise entre la vitesse de synchronisme et la vitesse pour laquelle le couple est maximum (figure 6). Elle est caractérisée par une puissance mécanique d'autant plus importante que le glissement est élevé.

Une machine faiblement chargée dans la zone utile de fonctionnement présentera donc un glissement faible, et aura en conséquence une impédance équivalente au rotor (égale à $(j\omega_\infty(\ell_{cs}\ell'_{cr}) + R_s + R'_r/\gamma)$ élevée d'où un courant rotorique de faible amplitude (figure 7).

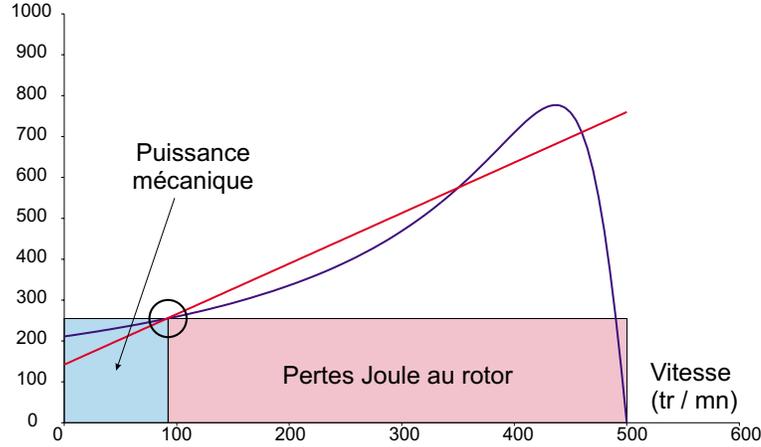


FIG. 4 – Visualisation du poids relatif de la puissance convertie en puissance mécanique et des pertes par effet Joule au rotor - Cas du point de fonctionnement C

Le courant statorique est la somme du courant rotorique et du courant magnétisant I_μ . Ce dernier est constant, quelque soit l'état de charge de la machine (du moins si on raisonne sur la base du schéma équivalent monophasé simplifié). Si la machine est faiblement chargée, la composante réactive du courant statorique sera donc d'autant plus importante et le facteur de puissance d'autant plus mauvais.

On trouvera une illustration chiffrée de cette dégradation du facteur de puissance dans la partie 4 du [laboratoire virtuel sur la machine asynchrone](#) (lien cliquable).

6. \diamond Sur la base du schéma équivalent monophasé simplifié, on peut calculer le couple que développe une machine asynchrone comme étant égal à :

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega_\infty} \gamma R'_r \frac{V_\infty^2}{(\gamma R_s + R'_r)^2 + [\gamma \omega_\infty (\ell_{cs} + \ell'_{cr})]^2}. \quad (1)$$

(voir §4.2.4 du chapitre 4 du [livre](#)) (lien cliquable) À fréquences statorique et rotorique constantes (et donc à glissement constant), et aux approximations près qu'induisent l'emploi du schéma équivalent simplifié, le couple évolue donc non pas comme la tension d'alimentation de la machine mais comme le carré de celle-ci.

- \diamond Si la résistance statorique peut être négligée, en multipliant numérateur et dénominateur de l'équation (1) par $\omega_r = \gamma \omega_\infty$, on obtient :

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega_\infty^2} \omega_r R'_r \frac{V_\infty^2}{R_r'^2 + [\omega_r (\ell_{cs} + \ell'_{cr})]^2}. \quad (2)$$

À fréquence rotorique constante, le couple est donc resté constant si le rapport V_∞/ω_∞ est maintenu constant.

C'est d'ailleurs cette propriété qu'exploitent les commandes à U/f imposé décrites au §5.3.5 du chapitre 5 du [livre](#). (lien cliquable)

7. Sur la base du schéma équivalent monophasé simplifié, on peut calculer le couple que développe une machine asynchrone comme étant égal à :

$$C_{em} = \frac{3p}{\omega_\infty} \gamma R'_r \frac{V_\infty^2}{(\gamma R_s + R'_r)^2 + [\gamma \omega_\infty (\ell_{cs} + \ell'_{cr})]^2}.$$

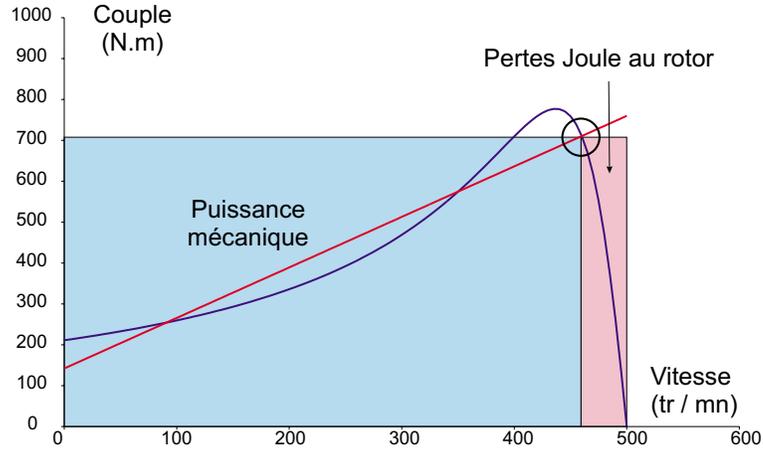


FIG. 5 – Visualisation du poids relatif de la puissance convertie en puissance mécanique et des pertes par effet Joule au rotor - Cas du point de fonctionnement A

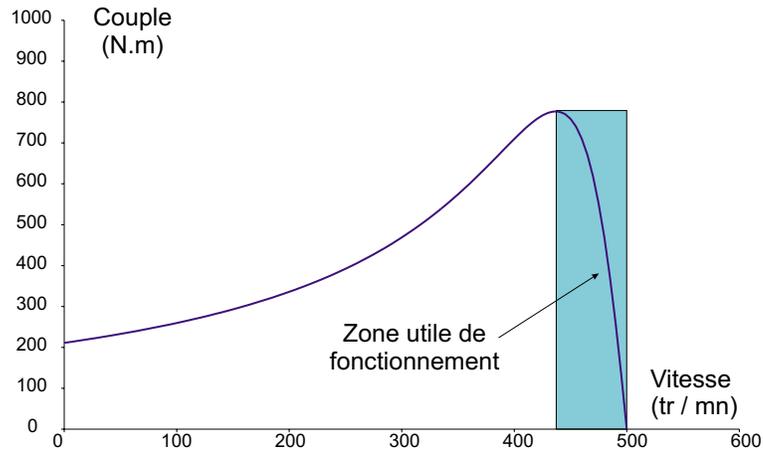


FIG. 6 – Zone utile de fonctionnement

(voir §4.2.4 du chapitre 4 du [livre](#)) (lien cliquable)

Si les effets de la résistance des enroulements du stator peut être négligée (ce qui est le cas pour les faibles valeur de γ) cette équation peut encore être mise sous la forme :

$$C_{em} = \frac{2C_m}{\frac{\gamma_m}{\gamma} + \frac{\gamma}{\gamma_m}},$$

avec

$$C_m = \frac{3pV_\infty^2}{2\omega_\infty^2(\ell_{cs} + \ell'_{cr})} \quad \text{et} \quad \gamma_m = \frac{R'_r}{(\ell_{cs} + \ell'_{cr})\omega_\infty^2}.$$

On montre que la dérivée de cette fonction de γ s'annule pour $\gamma = \gamma_m$, ce qui correspond à l'existence d'un maximum de couple égal à C_m .

À tension et fréquence d'alimentation donnée, la valeur maximale C_m du couple dépend donc principalement de la valeur des inductances de fuite ℓ_{cs} et ℓ'_{cr} .

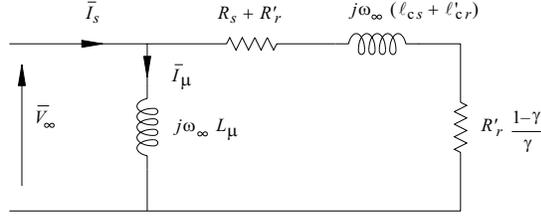


FIG. 7 – Schéma équivalent monophasé simplifié du moteur asynchrone

La valeur γ_m du glissement pour laquelle ce couple maximum est atteint dépend elle tant de la valeur des inductances de fuite que de celle de la résistance du rotor.

La pente de la caractéristique couple-vitesse dans la zone utile de fonctionnement peut être assimilée à sa tangente autour du point $\gamma = 0$. Elle est donc égale à $2C_m/\gamma_m$ et ne dépend en définitive que de R'_r .

8. En augmentant la valeur de la résistance rotorique, on augmente l'impédance équivalente du rotor et donc on diminue la valeur du courant absorbé.

Si la résistance est bien calculée, il est possible d'augmenter fortement le couple de démarrage. En effet, à tension et fréquence d'alimentation donnée, la valeur maximale du couple dépend peu de la valeur de la résistance du rotor tandis que la valeur du glissement pour laquelle cette valeur maximale est atteinte est directement proportionnelle à celle ci :

$$\gamma_m = \frac{R'_r}{(\ell_{cs} + \ell'_{cr})\omega_\infty^2}.$$

(voir justification question 7) (lien cliquable).

En choisissant une résistance de démarrage R_d telle que $k^2 R_d + R'_r = (\ell_{cs} + \ell'_{cr})\omega_\infty^2$, où k est le rapport de transformation interne à la machine (voir §3.5 du chapitre 3 du livre), on peut obtenir un couple de démarrage (c'est à dire pour un glissement proche de l'unité) quasiment maximum (figure 8). Dans la pratique on choisit souvent une valeur de résistance de démarrage encore plus élevée, l'inconvénient de la diminution du couple qui en résulte étant largement compensée par une diminution encore plus grande de la valeur du courant absorbé.

L'introduction d'une résistance triphasée limitant l'amplitude du courant rotorique I'_r durant la phase de démarrage, la puissance $3R'_r I_r'^2$ dissipée dans le rotor s'en trouve également réduite. Le couple de démarrage étant par ailleurs plus élevé, la machine atteint plus rapidement sa vitesse de régime. Moins de puissance dissipée au rotor pendant moins de temps signifie que la quantité d'énergie dissipée au rotor durant la phase de démarrage est significativement réduite.

9. La puissance transmise du stator au rotor est égale à $3R'_r I_r'^2 / \gamma$. Cette puissance correspond aux pertes statoriques près (pertes cuivre dans les enroulements du stator, pertes fer dans le circuit magnétique), à la puissance prélevée au réseau auquel la machine est connectée. De la puissance au rotor, seule une fraction $3R'_r I_r'^2 (1 - \gamma) / \gamma$ est transformée en puissance mécanique et, aux pertes mécaniques internes près, fournie à la charge mécanique entraînée, le reste ($3R'_r I_r'^2$) étant dissipé sous forme de pertes Joule dans la résistance du rotor (Figure 9).

♦ **Pour γ compris entre 0 et 1**, tant la puissance transmise au rotor (et donc la puissance prélevée au réseau) que la puissance transformée en puissance mécanique

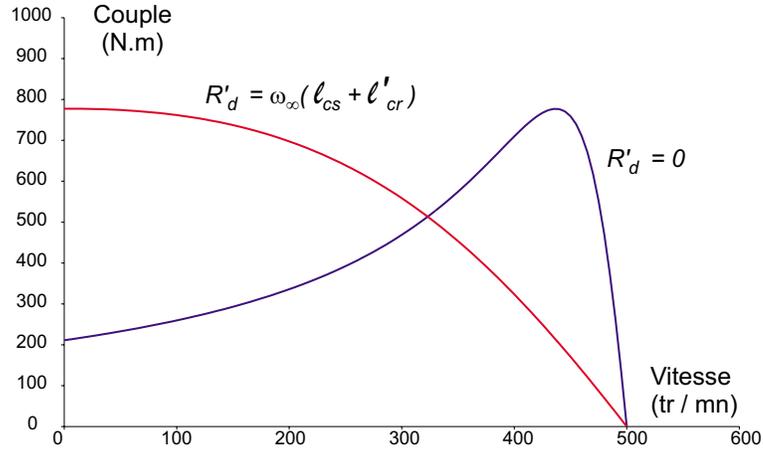


FIG. 8 – Caractéristique couple-vitesse de la machine asynchrone avec et sans résistance de démarrage

(et donc la puissance fournie à la charge mécanique) sont positives. On a donc un **fonctionnement moteur** (Figure 9).

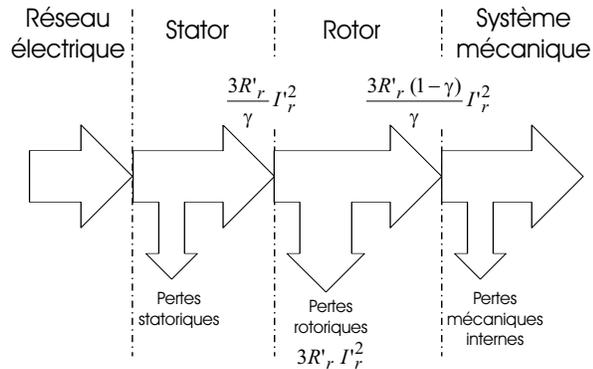


FIG. 9 – Bilan de puissance pour $0 < \gamma < 1$

- ◇ **Pour γ négatif**, tant la puissance transmise au rotor que la puissance transformée en puissance mécanique sont négatives. On a donc un transfert de puissance de la charge mécanique vers le rotor et du rotor vers le stator et finalement vers le réseau électrique. Cela correspond à un **fonctionnement générateur** (Figure 10).
- ◇ **Pour γ supérieur à 1**, la puissance transformée en puissance mécanique est négative tandis que la puissance transmise au rotor est positive. Tant le réseau que le système mécanique auxquels est relié le convertisseur lui fournissent donc de l'énergie qu'il transforme en chaleur au travers principalement de la résistance des enroulements rotoriques (Figure 11).

Ce fonctionnement est dangereux du point de vue thermique et n'est en pratique jamais rencontré sauf de manière très brève lorsqu'on assure un **freinage** rapide de la machine par un croisement de connexions de deux phases qui entraîne une

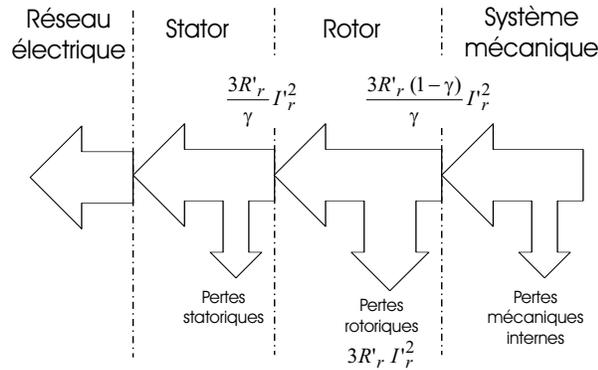


FIG. 10 – Bilan de puissance pour $\gamma < 0$

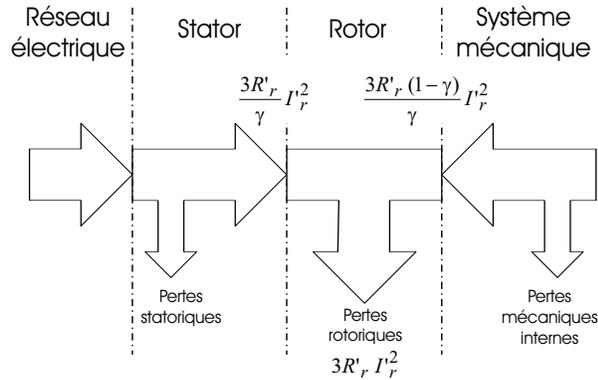


FIG. 11 – Bilan de puissance pour $\gamma > 1$

inversion du sens de rotation du champ tournant.

10. La pente de la caractéristique couple-vitesse dans la zone utile de fonctionnement est d'autant plus raide que la résistance rotorique est faible. La valeur maximale du couple que peut délivrer la machine est en revanche peu influencé par la valeur de cette résistance (voir [justification question 7](#)) (lien cliquable).

A couple égal, le glissement sera donc plus faible si la résistance rotorique peu élevée et le rendement en sera donc meilleur (voir [justification question 4](#)) (lien cliquable).

On ne peut en revanche extrapoler ce résultat pour en conclure qu'une machine à rendement optimal serait une machine à résistance rotorique nulle. Une telle machine ne serait en effet tout simplement pas capable de produire un couple moteur.

On montre en effet au §4.2.4 du chapitre 4, que le couple est égal à :

$$C_{em} = 3pL_{\mu}I'_r I_{\mu} \cos \psi$$

où ψ est l'angle entre la phaseur représentatif des courants rotoriques \vec{I}'_r et $\vec{E} = jL_{\mu}\omega_{\infty}\vec{I}_{\mu}$.

Si la résistance rotorique est nulle, le courant \bar{I}'_r et \bar{E} sont en quadrature l'un par rapport à l'autre et le couple est nul. En d'autres mots, la présence d'une composante résistive dans la branche rotorique est nécessaire pour introduire un déphasage entre le courant magnétisant \bar{I}_μ et le courant rotorique \bar{I}'_r , déphasage qui est nécessaire à la production d'un couple moteur.