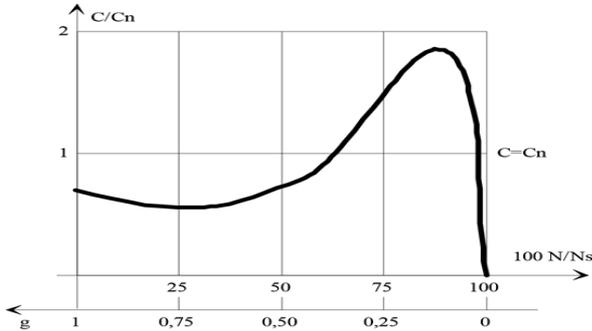




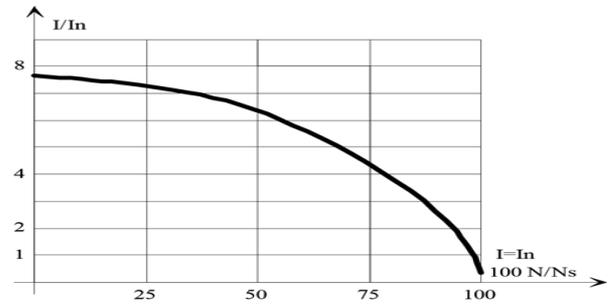
Chapitre 3 Machine asynchrone

1. Introduction :

Le **moteur asynchrone** est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa (facilité de mise en œuvre, faible encombrement, bon rendement et excellente fiabilité). Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les **machines triphasées**, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications ; supplantant les



machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice. Les **caractéristiques** de courant absorbé et de couple de cette machine sont bien connues (voir courbes types ci-joint). Elles font apparaître très clairement une **pointe d'intensité** de 5 à 10 fois I_n ainsi qu'un **à-coup de couple** au démarrage.



La **pointe d'intensité** est nuisible pour le réseau d'alimentation et il *sera quelquefois nécessaire de la réduire*. L'**à-coup de couple** est gênant pour la mécanique entraînée (couple) il peut même avoir *des conséquences destructives*.

Elles font apparaître très clairement une **pointe d'intensité** de 5 à 10 fois I_n ainsi qu'un **à-coup de couple** au démarrage.

2. Organisation de la machine

Tension maximum entre l'extrémité d'un enroulement et le neutre

Tension maximum aux bornes d'un enroulement

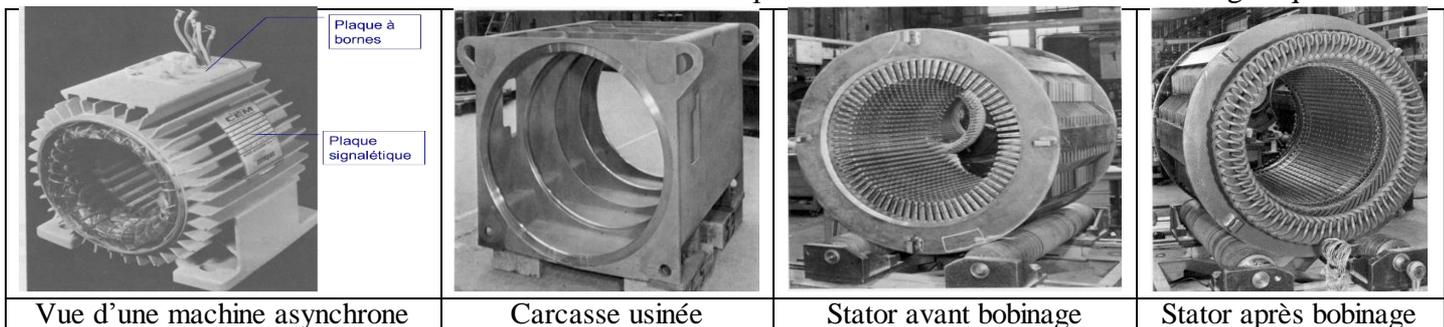
cos φ	0.82	ΔV	220	A	7,5
Rendement	rd ^t %	YV	380	A	4,3
Puissance nominale	kW	1,8	isol ^t classe	F	amb ^{ce} °C
vitesse	tr/min	1410	ph	3	S ^{ce} S1
Fréquence des courants statoriques	Hz	50	Made in FRANCE		
Nombre de phases					

Labels on the left: Rendement, Puissance nominale, vitesse, Fréquence des courants statoriques, Nombre de phases.

Labels on the right: Intensité normale absorbée sur les lignes pour un couplage triangle, Intensité normale absorbée sur les lignes pour un couplage étoile, Température maximale d'utilisation, Classe de l'isolement, Service continu.

2.1. Stator

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique.

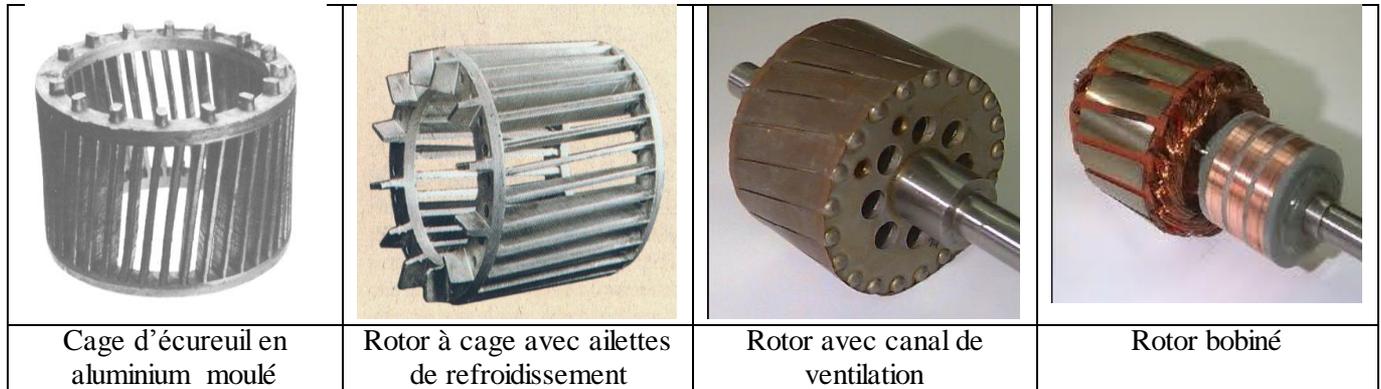




Ce circuit magnétique est constitué d'un *empilage de tôles* dans lesquelles sont *découpées des encoches* parallèles à l'axe de la machine. Ce stator, alimenté par des courants triphasés, produit un champ magnétique tournant.

2.2. Rotor

Deux type du rotor son distingué bobiné et à cage.



2.2.1. Rotor bobiné

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de *disques en tôle empilés* sur l'arbre de la machine. Cet *enroulement est obligatoirement polyphasé*, même si le moteur est *monophasé*, et, en pratique, *toujours triphasé à couplage en étoile*. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement *inclinées* par rapport à l'axe de la machine de façon à *réduire les variations de réluctance* liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont reliées à *des bagues* montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des *balais en carbone*. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des *réglages de la caractéristique couple/vitesse*. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les *démarrages sont difficiles et/ou nombreux*; en effet les pertes rotor pendant la phase de démarrage valant approximativement $\frac{1}{2} J\omega^2$ ne sont pas toujours supportées par les cages.

2.2.2. Rotor à cage

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques (*anneaux de court-circuit*), le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil.

Les barres sont faites en *cuivre, en bronze ou en aluminium*, suivant les caractéristiques *mécaniques et électriques* recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par *coulée et centrifugation d'aluminium*.

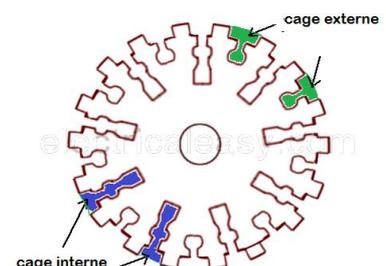
On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique, $N_b \geq 8xp$), la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate.

Ce type de moteur, beaucoup plus (*aisé à construire, un prix inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande*) que le moteur à rotor bobiné. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. En revanche, son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

2.2.3. Rotor à double cage

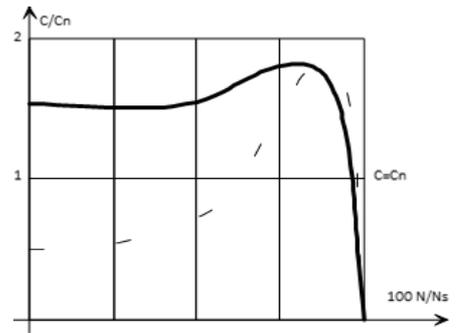
Le rotor comporte deux cages coaxiales. L'une (fréquemment réalisée en *laiton* ou en *bronze*), externe, à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer, L'autre (en *cuivre*), interne, de plus faible résistance, est noyée dans le fer.

Au démarrage, le courant rotorique, de fréquence égale à la fréquence f du réseau d'alimentation, se situe essentiellement dans la cage externe, du fait de la faible pénétration des courants dans l'épaisseur du rotor (effet de peau). Sa *relativement forte résistance* réduit l'appel de courant



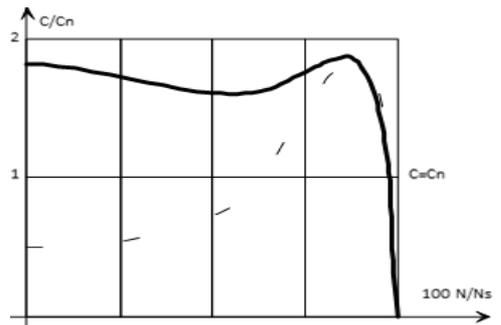


et accroît le *couple de démarrage*. Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal, normalement caractérisé par un *faible glissement g* donc une fréquence *rotorique basse*, la cage interne de faible résistance est parcourue par la presque totalité du courant rotorique ce qui réduit le glissement donc les *pertes rotoriques*. On peut ainsi, obtenir des couples de démarrage C_d de deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage *sans trop augmenter le glissement nominal*.



3. Rotor à encoches profondes

Le rotor à *double cage* est beaucoup plus difficile à construire que le rotor à *simple cage* et est donc d'un coût *plus élevé*. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie de ses avantages, en construisant une cage rotorique simple avec *des barres très plates s'enfonçant profondément* dans le circuit magnétique.



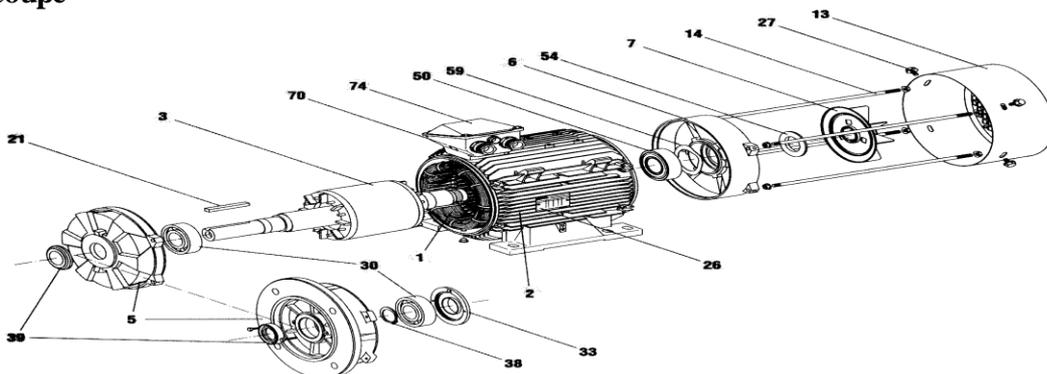
Lors du démarrage, les lignes de courant se concentrent près de la périphérie et tendent ainsi à assigner une *section de conducteur apparente réduite* et par conséquent une résistance *rotorique importante*. En revanche, en *marche normale*, cet effet disparaît et les lignes de courant, en occupant la *pleine section de la barre*, retrouvent un circuit de *faible résistance*.

Ce type de moteur, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à *haute tension* à *fort couple de démarrage*. Il présente l'inconvénient d'*entraîner une augmentation du coefficient de dispersion* des enroulements, donc une *diminution du facteur de puissance du moteur*, et bien sûr, d'*exiger un diamètre de rotor plus important* (*profondeurs*). Pour remédier à ce dernier inconvénient, on a parfois fait appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en *trapèze*, voire en L (la base du L étant en fond d'encoche).

4. Organes mécaniques (voir schémas ci-après)

Le stator auto-porteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des *roulements à billes* ou à *rouleaux* suivant le type de charge (axiale ou radiale). Un ventilateur est placé en bout d'arbre sur le rotor pour le refroidissement de la machine. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes.

5. Vues en coupe



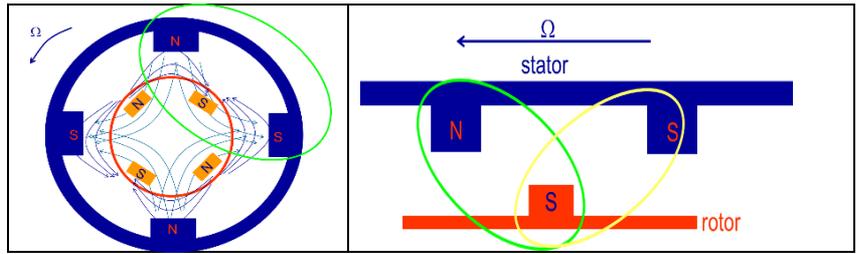
- | | | |
|-------------------------------|--|--|
| 1 : Stator bobiné | 21 : Clavette | 38 : Circlips de roulement côté accouplement |
| 2 : Carter | 26 : Plaque signalétique | 39 : Joint côté accouplement |
| 3 : Rotor | 27 : Vis de fixation du capot | 50 : Roulement arrière |
| 5 : Flasque côté accouplement | 30 : Roulement côté accouplement | 54 : Joint arrière |
| 6 : Flasque arrière | 33 : Chapeau intérieur côté accouplement | 59 : Rondelle de précharge |
| 7 : Ventilateur | | 70 : Corps de boîte à bornes |
| 13 : Capot de ventilation | | 74 : Couvercle de boîte à bornes |
| 14 : Tiges de montage | | |

6. Principe de fonctionnement



- Le pôle nord stator tire le pôle sud du rotor.
- Le pôle sud stator repousse le pôle sud du rotor.

Sur la périphérie du rotor, il y a nécessairement autant de pôles que sur le stator ; cela résulte de leur nature : ce sont des pôles induits.



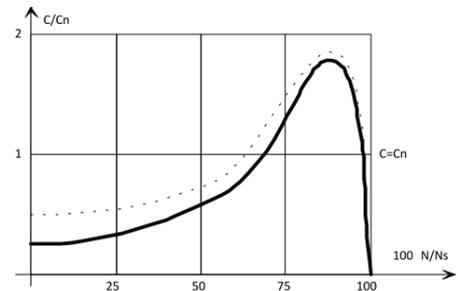
- Ces pôles tournent à la même vitesse de rotation que ceux du stator
- L'attraction/répulsion mutuelle entre pôles statoriques et rotoriques développe le couple moteur ; ce couple est le couple électromagnétique.
- Le couple électromagnétique résulte des courants induits, et donc des variations de flux.
- Si le rotor tourne à la même vitesse que le stator, il n'y a plus de variation de flux.
- Donc le rotor ne peut tourner qu'à une vitesse inférieure à celle du champ statorique.
- La vitesse de synchronisme ne peut en aucun cas être atteinte (en fonctionnement moteur). D'où le nom de machine asynchrone.
- Le rotor tourne à une vitesse $N_r < N_s$ inférieure à celle du champ statorique. Le rotor glisse donc par rapport à ses propres pôles. Ce glissement provoque une perte d'énergie qui lui est proportionnelle.
- La machine asynchrone est un transformateur à champ tournant.

7. Alimentation, caractéristiques et limites d'utilisation

7.1. Démarrage direct

a Caractéristique en régime permanent

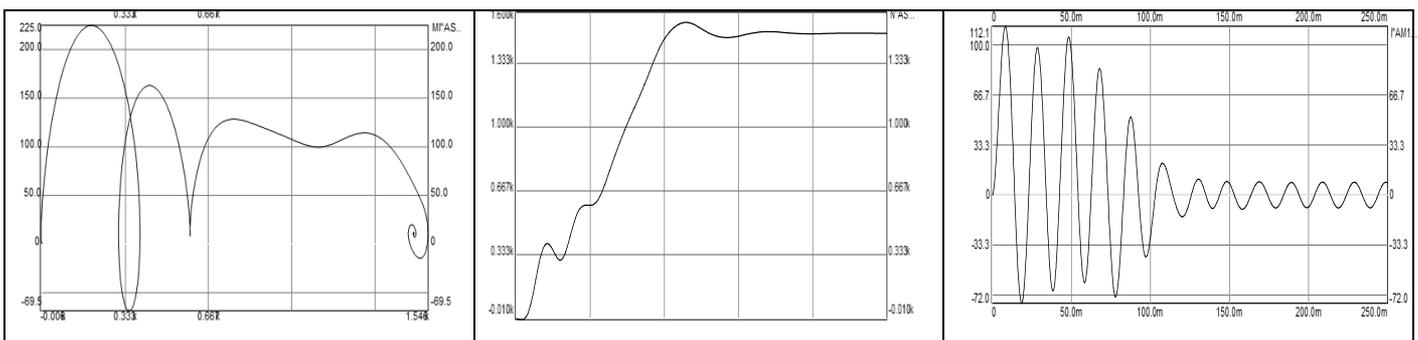
Il semble assez naturel de vouloir raccorder la machine sur le réseau basse tension 230/400 V 50 Hz, deux couplages sont alors possibles : étoile (Y) (tension simple à chaque enroulement) ou triangle (D) (tension composée à chaque enroulement) mais il ne faut pas perdre de vue que plus la tension d'un réseau est faible, plus sa puissance de court-circuit est faible, donc son impédance interne élevée. Cela signifie pour un moteur d'une puissance donnée, que la chute de tension due au courant de démarrage sera d'autant plus importante que son alimentation se fera par un réseau de tension faible. Ces chutes de tension peuvent devenir insupportables pour le réseau comme pour le couple moteur (voir graphe ci-contre pour une chute de tension de 20% moteur à cage simple). Lorsque le couple de démarrage est le critère le plus important, il faudra veiller à limiter la chute de tension pendant la phase de démarrage à 3% max. Ceci correspond à une diminution du couple de 6 à 8%. Il est souvent intéressant pour des moteurs de forte puissance d'opter pour des tensions d'alimentation plus élevées.



ces chutes de tension peuvent devenir insupportables pour le réseau comme pour le couple moteur (voir graphe ci-contre pour une chute de tension de 20% moteur à cage simple). Lorsque le couple de démarrage est le critère le plus important, il faudra veiller à limiter la chute de tension pendant la phase de démarrage à 3% max. Ceci correspond à une diminution du couple de 6 à 8%. Il est souvent intéressant pour des moteurs de forte puissance d'opter pour des tensions d'alimentation plus élevées.

b Caractéristiques en régime dynamique

La caractéristique couple/vitesse en régime établi ne permet pas de voir l'évolution des grandeurs pendant la phase de démarrage.



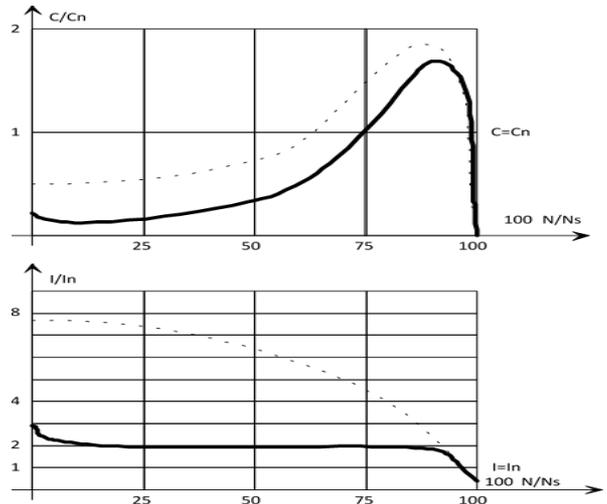


Cette phase transitoire fait apparaître une caractéristique couple/vitesse quelque peu différente. On retrouve ces ondulations de couple sur le relevé de l'évolution de la vitesse en fonction du temps (graphe ci-dessus). On y relève quelques valeurs : le courant de démarrage $I_d = 65A$ et le courant d'emploi $I_e = 7A$ pour $I_n = 11 A$ (courant nominal sur la plaque signalétique).

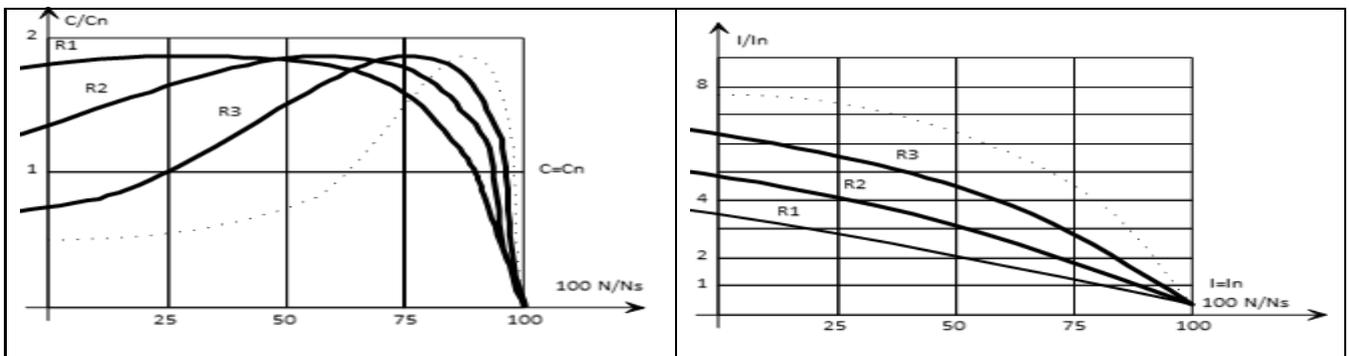
7.2. Limitation du courant de démarrage

Pour les **moteurs à cage** la solution la plus couramment employée consiste à sous alimenter la machine pendant la phase de démarrage. Il faut cependant que la charge mécanique permette cette sous-alimentation car diminuer la tension dans un rapport $1/n$ entraîne une diminution du couple dans un rapport $1/n^2$. Les solutions techniques sont les suivantes :

- **Démarrage étoile - triangle** : il nécessite la sortie des 6 bornes moteur et n'est envisageable que pour des petites puissances à cause de la brutalité des régimes transitoires lors des changements de couplage. C'est un procédé *extrêmement simple* et *peu coûteux*. Le couplage nominal de la machine doit être "triangle".
- **Insertion de résistances ou inductances statoriques** : cette méthode permet d'avoir plusieurs crans de démarrage. Cette solution est de plus en plus *abandonnée* au profit de solutions *électroniques* d'un *coût voisin*, d'un *volume moindre* et d'un *rendement bien meilleur*.
- **Démarrage par autotransformateur à une ou plusieurs prises** : il permet l'obtention d'un couple moteur plus élevé qu'avec une inductance statorique. Cette solution est également *abandonnée* au profit de *solutions électroniques d'un coût inférieur*.
- **Démarrage par gradateur de tension** : il offre les mêmes performances que la solution précédente pour un *coût* et un *encombrement moindre*. Le couple résistant de la charge entraînée doit permettre un démarrage ; il sera donc nécessairement quadratique ($C_r = k\Omega^2$ ventilation, pompage...). Des fonctionnalités supplémentaires peuvent lui être adjointes (démarrage à courant constant, dégomme de pompe, rampes d'accélération et de décélération...). Courbes sur le graphe ci-contre.
- **Utilisation d'un onduleur de tension** : Quoiqu'il soit plus *souvent* utilisé pour faire de la variation de vitesse, l'onduleur de tension peut permettre de faire un *démarrage souple* avec *limitation* du courant dans les situations où aucune baisse du couple n'est possible.



Pour les **moteurs à rotor bobiné**, on a la possibilité d'insérer, lors d'un démarrage, des *résistances* dans le *circuit rotorique*. Cette solution permet à la fois de *diminuer le courant de démarrage* et d'*augmenter le couple moteur*. Dans ce cas, des solutions électroniques (gradateur rotorique) sont disponibles. Courbes sur le graphe ci-dessous.



7.3. Freinage des machines asynchrones a. Freinage par contre courant



Ce mode de freinage est obtenu par *inversion de deux phases*. Au moment de l'inversion, le *glissement vaut presque 2*, il se réduit ensuite rapidement sous l'effet du couple inverse par rapport au sens de rotation. Généralement, un dispositif électrique de coupure déconnecte le moteur du réseau au moment du passage à la vitesse nulle ($g=1$). Le couple de freinage moyen est, en général, *supérieur* au couple de démarrage pour des moteurs asynchrones à cage. La variation du couple de freinage dépend fortement de *la conception de la cage rotorique*. Ce mode de freinage implique un courant absorbé important, approximativement constant et *légèrement supérieur* au courant de démarrage.

Les sollicitations thermiques, pendant le freinage, sont 3 fois plus importantes que pour une mise en vitesse. Le nombre approximatif de freinage par heure permis par cette méthode peut être évalué comme suit :

$$N_f = \frac{3600 \left[1 - \left(\frac{P_u}{P_n} \right)^2 \right]}{t_f \left[4 \left(\frac{I_d}{I_u} \right)^2 - \left(\frac{P_u}{P_n} \right)^2 \right]}$$

□□Ou :

- N_f : nombre de freinages permis par heure
- P_u : puissance utile du moteur
- P_n : puissance nominale du moteur
- t_f : temps de freinage (s)
- I_d/I_u : courant de démarrage/courant utile de fonctionnement

Le temps de freinage approximatif peut être calculé au moyen de la formule suivante :

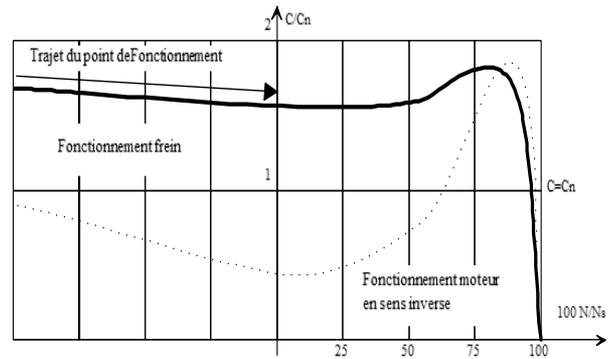
$$t_f = \frac{K_1 (J_m + J_{ch})}{0,45 (C_{max} + C_d)}$$

Ou

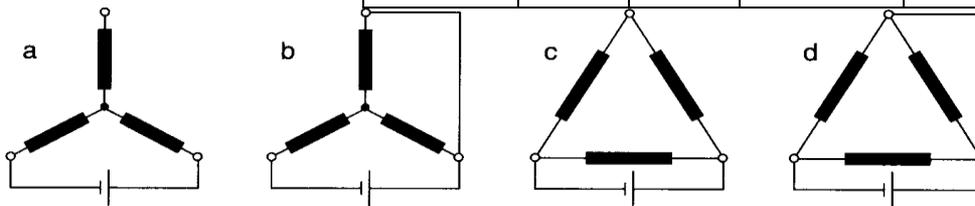
- t_f : temps de freinage (s)
- C_{max} : couple maxi du moteur (Nm)
- C_d : couple de démarrage du moteur (Nm)
- J_m : moment d'inertie du moteur (kg.m²)
- K_1 : constante dépendant du nombre de pôles du moteur
- J_{ch} : moment d'inertie de la machine entraînée ramené à la vitesse du moteur (kg.m²)

b. Freinage par injection de courant continu

Dans ce mode de freinage, le moteur asynchrone est couplé au réseau et le freinage est obtenu par coupure de la tension alternative et application d'une tension continue au stator. Quatre couplages des enroulements sur la tension continue peuvent être réalisés.



Fréquence	Constante K_1 pour différentes polarités				
	2 Pôles	4 Pôles	6 Pôles	8 Pôles	10 Pôles
50 Hz	345	157	104	78	62
60 Hz	415	188	125	94	75



▲ Couplage des enroulements du moteur sur la tension continue

La tension continue d'alimentation statorique est généralement fournie par une cellule de redresseur branchée sur le réseau. Les sollicitations thermiques sont approximativement 3 fois moins élevées que pour le mode de freinage par contre-courant. L'allure du couple de freinage dans l'intervalle de vitesse (0, Ns) est similaire à celle de la courbe C.



= f (n) et s'obtient par changement de variable d'abscisse en $N_f = N_s - N$. Le courant de freinage s'obtient par la formule :

$$I_f = K 1_i \times I_d \sqrt{\frac{C_f - C_{fe}}{k_2 \times C_d}}$$

Les valeurs de k_1 suivant les 4 couplages sont : $k_{1a} = 1.225$, $k_{1b} = 1.41$, $k_{1c} = 2.12$ et $k_{1d} = 2.45$ Quant au couple de freinage il est donné par :

$$C_f = \frac{\pi \times J \times n}{30 \times T_f}$$

Formules dans laquelle :

I_f (en A) = courant continu de freinage

I_d (en A) = courant de démarrage dans la phase

C_f (en N-m) = couple de freinage moyen dans l'intervalle (N_s , N)

C_{fe} (en N-m) = couple de freinage extérieur

C_d (en N-m) = couple de démarrage

J (en kg.m²) = moment d'inertie total ramené sur l'arbre moteur

n (en min⁻¹) = vitesse de rotation de l'arbre moteur T_f (en s) = temps de freinage

k_{1i} = coefficients numériques relatifs aux couplages a. b. c. et d. de la figure

k_2 = coefficients numériques tenant compte du couple de freinage moyen ($k_2 = 1.7$).

La tension continue à appliquer aux enroulements est donnée par :

$$U_f = k 3_i \times k_4 \times I_f \times R_1$$

Formules dans laquelle :

Les valeurs de k_3 pour les 4 schémas sont : $k_{3a} = 2$, $k_{3b} = 1.5$, $k_{3c} = 0.66$ et $k_{3d} = 0.5$

U_f (en V) = tension continue de freinage

I_f (en A) = courant continu de freinage

R_1 (en Ω) = résistance par phase statorique à 20° C

k_{3i} = coefficients numériques relatifs aux schémas a, b, c et d

k_4 = coefficient numérique tenant compte de l'échauffement du moteur ($k_4 = 1.3$)

c. Freinage en génératrice asynchrone

Ce mode de freinage s'applique aux moteurs multi-vitesses lors du passage à la vitesse inférieure ou aux moteurs alimentés en fréquence variable lorsque celle-ci descend. Il est impossible d'obtenir l'arrêt complet du moteur par ce procédé. Les sollicitations thermiques sont approximativement identiques à celles qui sont obtenues par le démarrage à la vitesse inférieure dans le cas des moteurs à couplage Dahlander (rapport des vitesses 1 : 2). Le couple de freinage développé par la machine asynchrone, de vitesse inférieure, fonctionnant en génératrice asynchrone dans l'intervalle de vitesse ($2N_s$, N_s) est très important. Le couple maximal de freinage est sensiblement supérieur au couple de démarrage du moteur de vitesse inférieure.

d. Freinage mécanique

Des freins électromagnétiques (excitation en courant continu ou en courant alternatif) peuvent être montés à l'arrière des moteurs. Ils peuvent venir en complément d'un freinage électrique pour l'arrêt complet du moteur et son maintien en position sans alimentation. Ces freins sont toujours à manque de courant c'est à dire que le freinage se fait en l'absence d'alimentation du frein.

Le dimensionnement et le choix de ce frein se font de la manière suivante :

La loi de la dynamique permet de déterminer le couple de freinage nécessaire pour immobiliser la charge en un temps donné par la norme ou le cahier des charges.

$$-C_f + / - C_r = J_T \frac{d\Omega}{dt}$$

Attention C_r le couple résistant de la machine entraînée peut être un couple de freinage (signe -) ou un couple d'accélération, dans le cas de charge entraînée (signe +). La détermination de C_f permet de choisir le frein.



Il existe deux types de freins : les freins de positionnement et les freins de secours qui se distinguent par le travail de friction admissible (ou énergie de friction). Cette énergie dissipée dans les garnitures de frein par échauffement vaut :

$$W_f = \frac{1}{2} J_T \cdot \Omega^2 \cdot \frac{C_{frein}}{C_{frein} + / - C_r}$$

Avec C_r positif si la charge aide le freinage et C_r négatif si la charge s'oppose au freinage (charge entraînée)

7.4. Temps de réponse :

Les temps de réponse des freins dépendent également des influences extérieures. La température, les types de pare-étincelles, ainsi que l'entrefer entre le disque et l'électroaimant, suivant l'état d'usure du frein, déterminent le temps de réponse. Les temps indiqués au tableau sont des valeurs déterminées par de nombreux essais. Les valeurs réelles seront légèrement modifiées vers le haut ou vers le bas, suivant le procédé de montage. Par des moyens électriques et mécaniques, il est possible de réduire notablement les temps de freinage.

Temps de réponse

Taille	Commande côté courant continu				Commande côté courant alternat.	
	Frein avec disque standard		Frein avec disque à commande rapide		Frein avec disque standard	
	t ₁ [ms]	t ₂ [ms]	t ₁ [ms]	t ₂ [ms]	t ₁ [ms]	t ₂ [ms]
2	20	13	—	—	20	80
3	25	15	30	10	25	90
4	30	20	35	15	30	150
5	40	35	50	20	40	200
6	60	60	70	25	60	500
7	80	100	85	50	80	700
8	100	200	110	80	100	1000
9	150	250	170	120	150	1300
10	200	400	230	250	200	3000
11	300	500	350	350	300	3100

t₁ = durée d'appel du disque (temps écoulé de la mise sous tension jusqu'à chute du couple à 10% de M_{nom})
t₂ = durée d'établissement du couple (temps écoulé de la coupure du courant jusqu'à montée du couple à 90% du couple de freinage nominal)

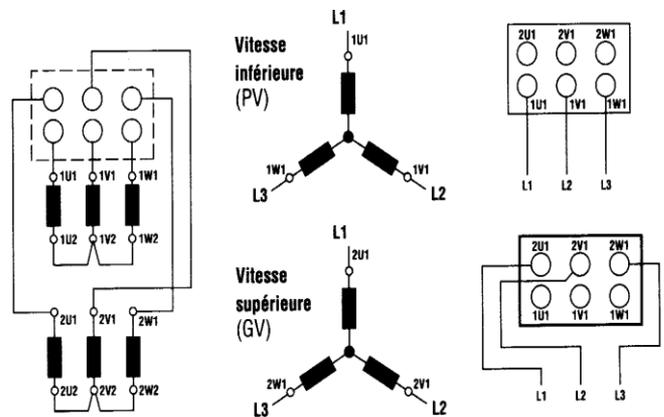
7.5. Machines asynchrones à plusieurs vitesses

Il est possible d'obtenir un nombre discret de vitesses en utilisant deux enroulements statoriques ou en modifiant le nombre de pôles apparent du stator.

➤ Double enroulements statoriques séparés

Lorsque l'on souhaite obtenir deux vitesses qui ne sont pas dans un rapport de 2 à 1, on munit le stator de deux enroulements (toujours montés en étoile pour éviter les courants induits) que l'on alimente séparément. Il serait théoriquement possible d'envisager plus de deux enroulements séparés mais pratiquement cela induirait une augmentation des dimensions externes de la machine ainsi qu'une dégradation trop importante des performances (augmentation de l'inductance de fuite au niveau des encoches).

➤ Couplage de pôles système Lindström/Dahlander





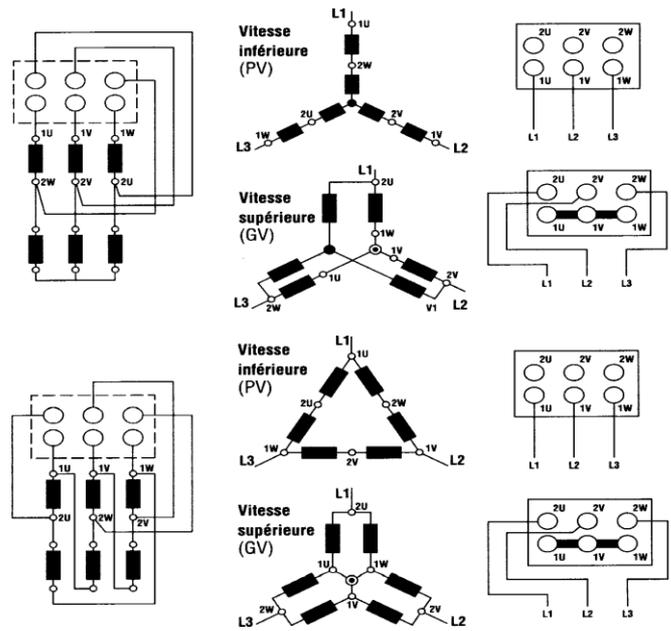
Il est possible d'obtenir des moteurs à deux vitesses dans un rapport $\frac{1}{2}$ avec un enroulement statorique constitué de 3×2 demi-enroulements qui par couplage feront apparaître un nombre de paires de pôles simples ou doubles. Un certain nombre de solutions est alors envisageable :

✓ Montage à couple quadratique :

Lorsque le couple résistant varie en fonction du carré de la vitesse les enroulements sont connectés en étoiles indépendantes pour la grande vitesse YY et en étoile série pour la petite vitesse Y. Dans les catalogues le symbole est YY/Y.

✓ Montage à couple constant :

Lorsque le couple résistant est à peu près le même aux deux vitesses, les enroulements sont connectés en étoile parallèle pour la grande vitesse YY et en triangle série pour la petite vitesse D. Dans les catalogues le symbole est YY/D.



➤ Couplage de pôles système PAM (Pole-Amplitude-Modulation)

Avec ce système il est possible d'obtenir des moteurs à deux vitesses qui ne sont pas nécessairement dans un rapport $\frac{1}{2}$. Les couplages externes sont les mêmes que pour le système Lindström/Dahlander.

➤ Mixage des techniques

En plaçant dans un stator deux enroulements à changement de pôles on peut avoir jusqu'à 4 vitesses pour un même moteur. C'est le maximum réalisable pratiquement.

8. Méthode et guide de sélection d'une machine asynchrone

Le choix d'un moteur asynchrone seul doit permettre l'entraînement de la machine accouplée avec les performances imposées par le cahier des charges à savoir :

- Le nombre de quadrants de fonctionnement
- Le couple sur toute la plage de vitesse : caractéristique $Cr = f(\Omega)$
- La vitesse désirée
- L'accélération et la décélération souhaitées

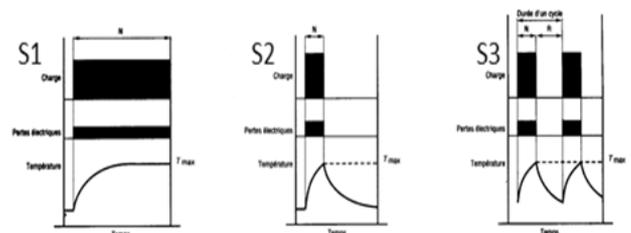
Et le respect des normes pour le réseau d'alimentation énergétique :

- La puissance de démarrage disponible
- La consommation d'énergie réactive
- Le taux d'harmoniques imposé au réseau
- La compatibilité électromagnétique

9. Type de service des moteurs électriques

a) **Service continu - Service type S1** : Fonctionnement à charge constante nominale d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint. Fdm (facteur de marche) = 1 et n (nombre de démarrages équivalent par heure) ≤ 6 .

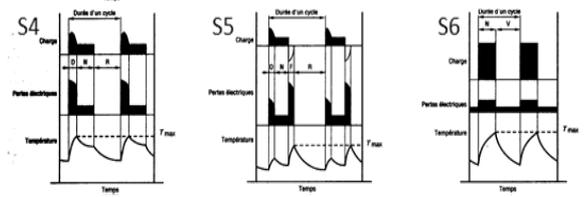
b) **Service temporaire - Service type S2** : Fonctionnement à charge constante nominale pendant un temps déterminé N, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir à 2°C près l'égalité de



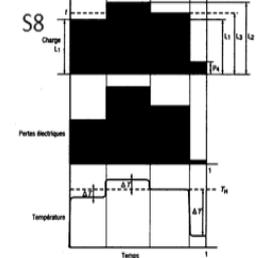
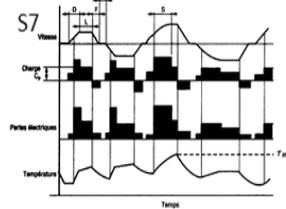


température entre la machine et le fluide de refroidissement. Fdm selon cahier des charges et $n = 1$.

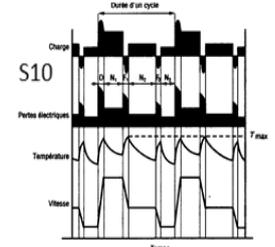
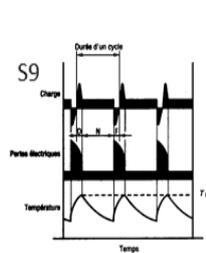
c) **Service Intermittent périodique - Service type S3** : Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de repos R . Dans ce service, le cycle est tel que le courant de démarrage n'affecte pas l'échauffement de façon significative. $F_{dm} = N/N+R$ et $n = 0$.



d) **Service intermittent périodique à démarrage - Service type S4** : Suite de cycles de service identiques comprenant une période appréciable de démarrage D , une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de repos R . $F_{dm} = N+D/N+D+R$ et n selon cahier des charges, remplacer n par $4n$ dans la formule.



e) **Service intermittent périodique à freinage électrique - Service type S5** : Suite de cycles de service périodiques comprenant chacun une période de démarrage D , une période de fonctionnement à charge constante nominale N , une période de freinage électrique rapide F et une période de repos R . $F_{dm} = N+D+F/N+D+F+R$ et n selon cahier des charges, remplacer n par $4n$ dans la formule.



f) **Service ininterrompu périodique à charge intermittente - Service type S6** : Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante nominale N et une période de fonctionnement à vide V . Il n'existe pas de période de repos. $F_{dm} = N/N+V$ et $n = 0$. Calcul de P pour régime intermittent.

g) **Service ininterrompu périodique à freinage électrique - Service type S7** : Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de démarrage D , une période de fonctionnement à charge constante L et une période de freinage électrique F . Il n'existe pas de période de repos. $F_{dm} = 1$ et n selon cahier des charges, remplacer n par $4n$ dans la formule.

h) **Service ininterrompu périodique à changements liés de charge et vitesse - Service type S8** : Suite de cycles de service identiques comprenant chacun une période de fonctionnement à charge constante $L1$ correspondant à une vitesse de rotation prédéterminée, suivie d'une ou plusieurs périodes de fonctionnement à d'autres charges constantes $L2$ $L3$ correspondant à différentes vitesses de rotation. Il n'existe pas de période de repos. $F_{dm} = 1$ et n selon cahier des charges, remplacer n par $4n$ dans la formule. Calcul de P pour régime intermittent.

i) **Service à variations non périodiques de charge et de vitesse - Service type S9** : Service dans lequel la charge et la vitesse ont une variation non périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges appliquées qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge. Pour ce service type, des valeurs appropriées à pleine charge devront être considérées comme bases du concept de surcharge. $F_{dm} = 1$ et n selon cahier des charges, remplacer n par $4n$ dans la formule. Calcul de P pour régime intermittent.

j) **Service à régimes constants distincts - Service type S10** : Service comprenant au plus quatre valeurs distinctes de charges (ou charges équivalentes), chaque valeur étant appliquée pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique. La charge minimale pendant un cycle de charge peut avoir la valeur zéro (fonctionnement à vide ou temps de repos). $F_{dm} = 1$ et $n = 0$. Calcul de P pour régime intermittent.

10. Prise en compte d'un mode de refroidissement différent.

La Publication IEC 34-6 fait état des modes de refroidissement des machines tournantes. Pour la désignation de ces modes, on a recours à deux codes de symbolisation, l'un simplifié, pour les types de machines les plus courantes refroidies à l'air, l'autre complet, pour des types de machines présentant des systèmes plus complexes de refroidissement. Le mode de refroidissement est symbolisé par les lettres IC (International Cooling) suivies, dans le cas du code simplifié, d'un groupe de deux ou trois chiffres ou, dans le cas d'un système complet, d'un groupe d'une lettre et de deux lettres et chiffres significatifs pour chaque circuit de refroidissement.

code simplifié **IC 411** ou système complet **IC 4 A 1 A 1**



Disposition du circuit		Fluide de refroidissement		Mode de circulation	
0	Libre circulation	A	Air	0	Convection
1	Canalisation d'aspiration	F	Fréon	1	Autocirculation
2	Canalisation de refoulement	H	Hydrogène	2	Réservé
3	2 canalisations ci-dessus	N	Azote	3	Réservé
4	Refroidie par la surface	C	Dioxyde de carbone	4	Réservé
5	Echangeur incorporé à air	W	Eau	5	Circulation forcée intégrée
6	Echangeur ajouté à air	U	Huile	6	Circulation forcée ajoutée
7	Echangeur incorporé	S	Autre fluide (à préciser)	7	Circulation indépendante
8	Echangeur ajouté	Y	Fluide non choisi ...	8	Déplacement relatif
9	Echangeur séparé			9	

Quelques exemples du code simplifié :

- Le premier chiffre indique la disposition du circuit de refroidissement.
- Le deuxième chiffre indique la manière dont est fournie la puissance nécessaire à la circulation de l'air.

Code	Description sommaire
IC 01	Machine ouverte auto refroidie Ventilateur monté sur l'arbre.
IC 06	Machine ouverte avec ventilation indépendante montée sur la machine.
IC 11	Machine auto-ventilée. L'air de refroidissement est canalisé à l'entrée. Le ventilateur est monté sur l'arbre.
IC 17	Machine dont l'air de refroidissement est canalisé à l'entrée. L'air est fourni et sa circulation est assurée par un réseau de distribution indépendant.
IC 21	Machine auto-ventilée. L'air de refroidissement est canalisé à la sortie. Le ventilateur est monté sur l'arbre.
IC 27	Machine dont l'air de refroidissement est canalisé à la sortie, un dispositif d'aspiration indépendant fait circuler l'air.
IC 31	Machine auto-ventilée dont l'air de refroidissement est canalisé à l'entrée et à la sortie.
IC 37	Machine dont l'air de refroidissement est canalisé à l'entrée et à la sortie. Un réseau de distribution indépendant fournit l'air et le fait circuler.
IC 41	Moteur fermé à carcasse ventilée. Ventilateur externe monté sur l'arbre.
IC 51	Moteur fermé carcasse à tubes avec deux ventilateurs externe et interne.

Quelques exemples du système complet décrivant deux circuits de refroidissement ; le premier chiffre indique la disposition du circuit de refroidissement.

- La première lettre indique la nature du fluide primaire
- Le deuxième chiffre indique le circuit de refroidissement primaire dans la machine
- La deuxième lettre indique la nature du fluide secondaire
- Le troisième chiffre indique le circuit de refroidissement secondaire, externe, qui est à la température la plus basse dans l'échangeur thermique.

L'air et l'eau, les fluides de refroidissement les plus usuels, sont symbolisés respectivement par les lettres A et W. La lettre A est supprimée lorsque l'air est le seul fluide de refroidissement employé.

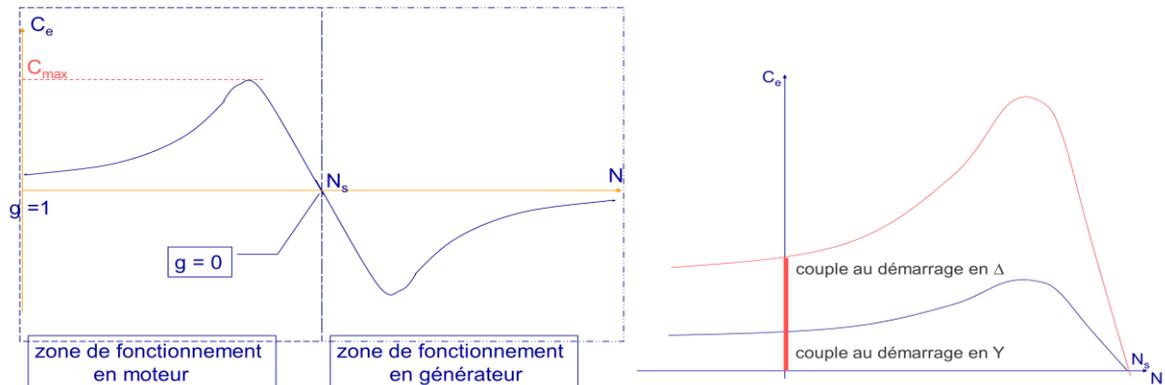
IC 4 A 1 A 0 Ou IC 410	Machine fermée refroidie par sa surface. Pas de ventilateur externe. L'air à l'intérieur circule en circuit fermé sous l'effet de moyens propres à la machine et cède sa chaleur à travers la surface de la carcasse.
IC 4 A 1 A 1 Ou IC 411	Machine fermée à carcasse ventilée. La ventilation externe est propre à la machine. L'air à l'intérieur circule en circuit fermé sous l'effet de moyens propres à la machine et cède sa chaleur à travers la surface de la carcasse.
IC 5 A 1 A 1 Ou IC 511	Machine fermée avec échangeur de chaleur incorporé (ex : carcasse à tubes) refroidi par air ambiant. Deux ventilateurs propres à la machine, l'un extérieur, l'autre intérieur, font circuler respectivement l'air ambiant de refroidissement et l'air chaud interne à travers l'échangeur.



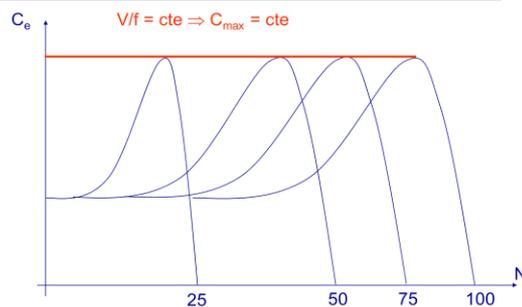
IC 4 A 1 A 6 Ou IC 416	Machine fermée à carcasse ventilée au moyen d'un système de ventilation indépendant monté sur la machine. L'air à l'intérieur circule en circuit fermé sous l'effet de moyens propres à la machine et cède sa chaleur à travers la surface de la carcasse.
IC 3 A 1 W 7	Machine refroidie par air, avec hydroréfrigérant incorporé. La circulation de l'air chaud interne à travers l'échangeur est obtenue par une ventilation propre à la machine, celle de l'eau par pompe ou par distribution.

Les machines asynchrones sont caractérisées pour le mode IC 41 ou IC 411. Pour les configurations autres que **C411** se reporter au guide de choix correspondant.

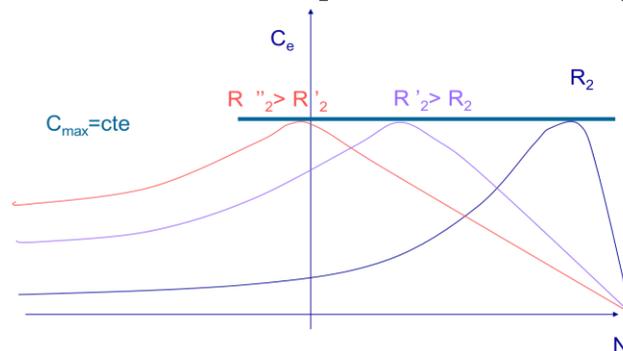
11. Influence d'une variation de la tension d'alimentation statorique sur la caractéristique mécanique



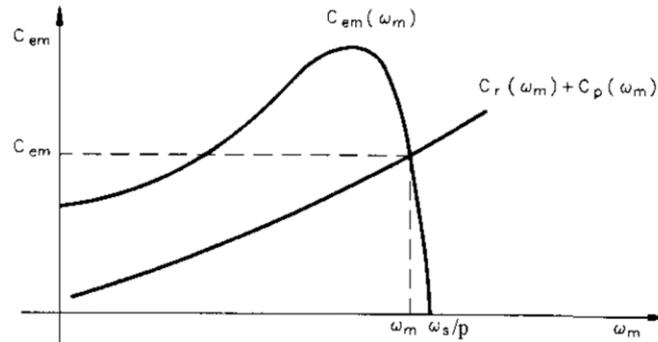
Influence d'une variation de la fréquence des tensions statoriques



Influence d'une variation de la résistance rotorique sur la caractéristique mécanique



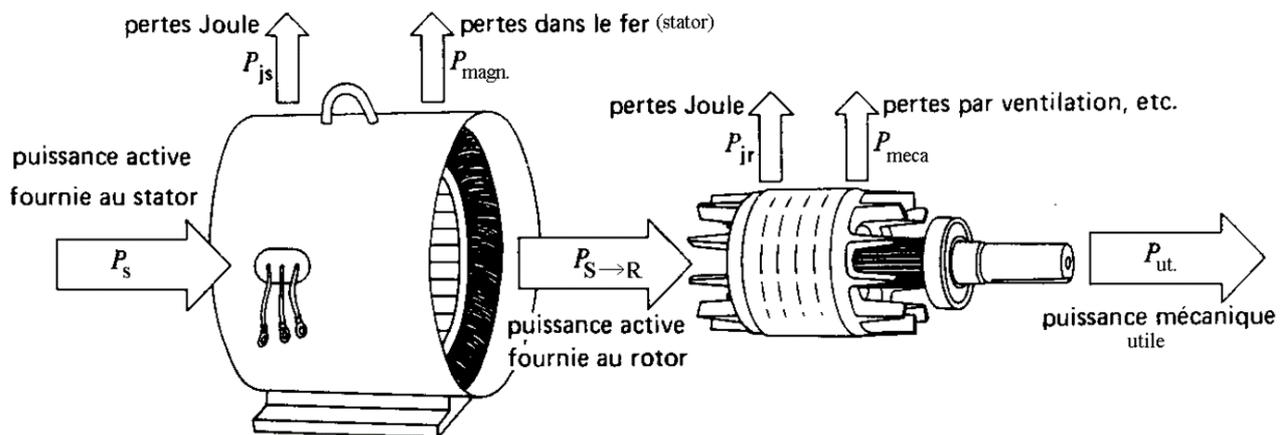
12. Point de fonctionnement normal



Le point de fonctionnement nominal correspond à un couple très inférieur au maximum (pour meilleur rendement, sécurité vis à vis des creux de tension, stabilité).

Dans une simulation, une fois calculée la vitesse ω_m , on en déduit le glissement, et on peut résoudre le circuit équivalent pour calculer toutes les grandeurs.

13. Bilan de puissance



Pour rappel, le couple électromagnétique C_{em} est égal à la puissance transmise du stator au rotor divisée par la vitesse de rotation du champ ω_s/p .

14. Calcul de la machine asynchrone

L'équation de sortie : équation sortie est l'expression mathématique qui donne la relation entre les différents paramètres physiques et électriques de la machine électrique.

Dans un moteur à induction l'équation de sortie peut être obtenu comme suit :

Considérons «m» nombre de phase de la machine, avec les notations habituelles suivantes :

- V_{ph} = tension de phase ; I_{ph} = courant de phase
- Z_{ph} = nombre du conducteur / phase
- T_{ph} = nombre de of spire / phase
- N_s = Vitesse de synchronisme on tr/m n_s = Vitesse de synchronisme on tr/s
- p : nombre de pole, q= la charge électrique spécifique
- Φ = flux dans l'entrefer /pole ; B_{av} = densité moyenne de flux
- kw = facteur de bobinage
- η = rendement.
- $\cos \varphi$ = facteur de puissance
- D = Diamètre du stator,
- L = Longueur brut du noyau
- C_o = coefficient de sortie.

La sortie Q en kW = Entrée x Rendement.



➤ Entrée du moteur = $mV_{ph} I_{ph} \cos \varphi 10^{-3} \text{ kW}$

Pour les machines triphasées $m=3$

➤ Entrée du moteur $3V_{ph} I_{ph} \cos \varphi \times 10^{-3} \text{ kW}$

➤ Supposant : $V_{ph} = E_{ph} \Rightarrow V_{ph} = E_{ph} = 4.44 f \Phi T_{ph} \times K_w = 2.22 f \Phi \times Z_{ph} \times K_w$

$$f = \frac{PN_s}{120} = \frac{Pn_s}{2},$$

➤ Sortie : $= 3 \times 2.22 \frac{Pn_s}{2} \Phi Z_{ph} K_w I_{ph} \eta \cos \varphi 10^{-3} \text{ kW}$

$$= 1.11 P \Phi 3 I_{ph} Z_{ph} n_s K_w \eta \cos \varphi 10^{-3} \text{ kW}$$

$$P\Phi = B_{av} \pi DL, \text{ and } 3 \frac{I_{ph} Z_{ph}}{\pi D} = q$$

➤ Sortie du moteur = $1.11 B_{av} \pi DL \times \pi D q \times n_s K_w \eta \cos \varphi 10^{-3} \text{ kW}$

$$Q = (1.11 \pi^2 B_{av} q K_w \eta \cos \varphi 10^{-3}) D^2 L n_s \text{ kW}$$

$$Q = (11 B_{av} q K_w \eta \cos \varphi 10^{-3}) D^2 L n_s \text{ kW}$$

➤ Donc la sortie $Q = C_0 D^2 L n_s \text{ kW}$

Ou : $C_0 = 11 B_{av} q K_w \eta \cos \varphi 10^{-3}$

fin