

1. Introduction

Dans ce chapitre, les questions concernant l'établissement des schémas de bobinage des machines à courant alternatif seront examinées. Etant donnée la multiplicité des types de machines électriques tournantes, il serait difficile de réunir ici toutes les données concernant les bobinages de ces machines. Nous nous limiterons donc aux bobinages triphasés rencontrés au stator des machines synchrones et asynchrones, ainsi qu'au rotor des machines asynchrones à rotor bobiné.

2. Notations et données complémentaires

S : nombre total d'encoches du stator

p : nombre de pôles.

m : nombre de phases ($m = 3$ pour les machines triphasées).

a : nombre de groupes en parallèles par phase.

Z_e : nombre de conducteurs par encoche (généralement $Z_e = 2$)

τ_p : pas polaire en nombre d'encoches

Y : pas d'enroulement

Z : nombre total des conducteurs dans le stator

q : nombre d'encoches par pôle et par phase, il est donné par :

$$q = \frac{(S/p)}{m} \quad (1)$$

si q est entier l'enroulement est dit régulier ;

si q est fractionnaire l'enroulement est dit irrégulier (ou fractionnaire).

α l'angle électrique entre deux encoches voisines

Le pas polaire est déterminé par :

$$\tau_p = \frac{S}{p} = 180^\circ \text{ électrique} \quad (2)$$

On obtient l'angle électrique entre deux encoches voisines à l'aide de la relation suivante:

$$\alpha = \frac{p \times 180^\circ}{S} \quad (3)$$

3. Types de bobinages

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, il existe deux principales façons de bobiner une machine électrique quelque soit la direction du flux: le bobinage réparti (ou distribué), le bobinage concentré. Le bobinage réparti est le bobinage le plus simple à modéliser analytiquement. Toutefois les têtes de bobines sont le principal inconvénient car elles sont source de pertes par effet Joule.

4. Conditions d'établissement d'un bobinage triphasé

- Les trois phases sont décalées de 120^0 électriques.
- Si le nombre de pôles p est un multiple de 3^n , le nombre d'encoches doit être un multiple de 3^{n+1}
- Lorsque q n'est pas entier, on a : $q = \lambda + \frac{\beta}{\delta}$
Ou λ est un entier et $\frac{\beta}{\delta}$ une fraction irréductible, λ ne doit pas être multiple de 3
- Si l'on veut réaliser un schéma équilibré, c'est-à-dire sans courant de circulation entre les parties parallèles d'une même phase, les FEM engendrées dans chaque partie doivent être égale en module et en phase, d'où :
 - S doit être divisible par $3a$
 - La valeur maximale de a est $2p$.

Pour établir un schéma de bobinage, il faut suivre les étapes suivantes :

- Répartir les faisceaux entre les 03 phases.
- Fixer le sens de parcours de chaque faisceau à l'intérieur de la phase correspondante.
- Réunir les faisceaux pour former les bobines.
- Définir les connexions entre bobines à l'intérieur de chaque phase ainsi que les entrées et sorties permettant les couplages classique en triangle et en étoile.

5. Enroulements triphasés à une couche (un seul faisceau par encoche)

Les figures 1.a, 1.b, 1.c et 1.d montrent 04 réalisations possibles des bobinages du stator des machines synchrones et asynchrones, à une seule couche. Ces figures peuvent se regrouper 2 à 2 de deux façons différentes :

- Les réalisations montrées dans les figures 1.b et 1.d sont des bobinages à bobines concentriques ou bobinage à plans. A l'opposé, les réalisations montrées dans les figures 1.a et 1.c sont des bobinages en section, appelés également imbriqués suivant la terminologie des bobinages à courant continu.
- Les réalisations montrées dans les figures 1.a et 1.b sont appelées bobinages à pôles consécutifs. A l'opposé, les réalisations montrées dans les figures 1.c et 1.d sont des bobinages à pôle non consécutif (par pôle).

En effet, si l'enroulement est constitué de plusieurs bobines élémentaires concentriques, il s'agit d'un enroulement en bobines. Les bobines élémentaires sont réalisées sur des gabarits différents. Si l'enroulement utilise des bobines élémentaires toutes identiques, c'est un enroulement en sections (imbriqué ou ondulé).

L'enroulement est par pôle si chaque phase comporte un groupe de bobines ou de sections pour chaque pôle. Il est par pôle consécutif si chaque phase ne comporte qu'un groupe de bobines ou de sections pour chaque paire de pôles.

Il est à noter que quelque soit le mode de bobinage choisi, les mêmes conducteurs sont dans les mêmes encoches parcourus par le même courant dans le même sens.

Cependant, ces bobinages diffèrent du point de vue :

- Des harmonique (spatiales et temporelles) de la tension induite et donc de la qualité de la tension d'armature et des fluctuations de vitesse;
- de la masse de cuivre utilisée; donc du coût de fabrication.
- des chutes ohmiques et du flux de fuite des têtes de bobines; donc du rendement.
- du refroidissement des connexions; de la facilité de mise en œuvre et de l'isolation.

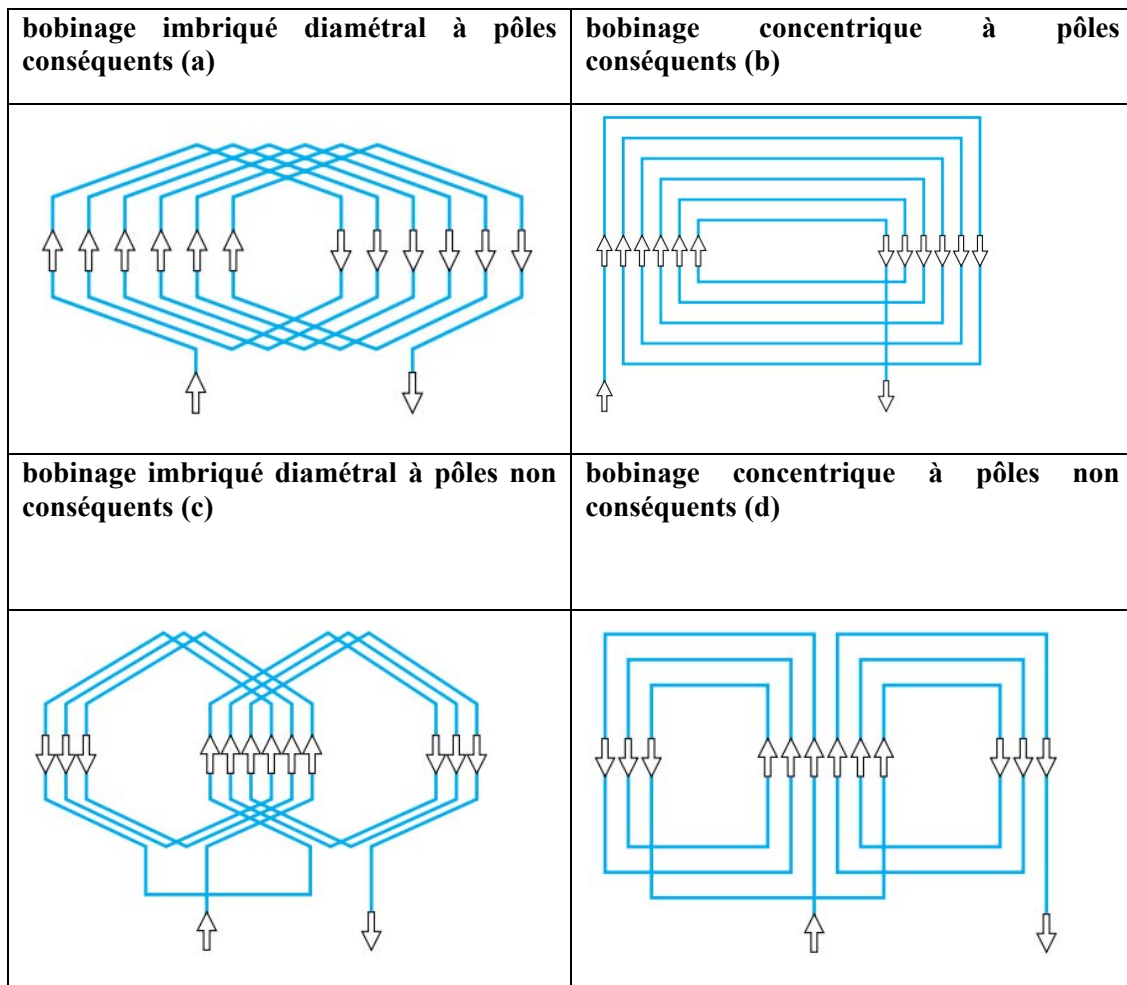


Figure. 1 : Schémas de bobinage : exemples [Saint-Michel]

Les enroulements à une couche étaient très répandus, ils sont remplacés à présent par les enroulements à deux couches et ils ne sont plus utilisés que dans certains cas particuliers. Cependant, on trouvera encore un grand nombre de machines en service dotées d'enroulement à une seule couche.

Nous allons examiner 03 types d'enroulements à une couche :

- Enroulements imbriqués à pas diamétral.
- Enroulements ondulés à pas diamétral.
- Enroulements concentriques.

5.1 Enroulements imbriqués à pas diamétral

Ce sont des enroulements à une couche avec bobines d'égale largeur. Toutes les bobines de ces enroulements ont la même forme et peuvent être fabriquées sur un gabarit unique, pour cette raison on les appelle encore enroulements de gabarit. Ces enroulements ont l'avantage : ils permettent de réaliser des raccourcissements du pas, mais comme dans tous les enroulements à une couche des difficultés apparaissent lors de la mise en place des parties frontales. En effet, dans les encoches l'enroulement est placé en une seule couche et dans les parties frontales, vu le croisement des conducteurs, il doit être placé dans deux ou plusieurs plans.

Exemple 01: Tracer le schéma de bobinage du stator d'une génératrice synchrone ayant les caractéristiques suivantes : 4 pôles, 24 encoches, une couche, imbriqué à pas diamétral

Solution :

$$\text{Le pas polaire} : \frac{S}{p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$\text{Le pas d'enroulement} : Y = 6$$

$$\text{Nombre d'encoches par phases} \frac{24}{3} = 8$$

$$\text{Nombre d'encoches par phase et par pôle} q = \frac{8}{4} = 2$$

$$\text{Calcul du nombre de groupes de bobines nécessaires} : \frac{P}{2} = 2$$

$$\text{Angle électrique entre 02 encoches voisines} : \frac{p \times 180^\circ}{S} = \frac{4 \times 180^\circ}{24} = 30^\circ$$

Les entrées des différentes phases :

L'entrée de la phase (A) se fait à l'encoche N°1.

$$\text{L'entrée de la phase (B) se fait à l'encoche} : 1 + \frac{120^\circ}{30^\circ} = 5$$

$$\text{L'entrée de la phase (C) se fait à l'encoche} : 1 + \frac{240^\circ}{30^\circ} = 9$$

Le tableau 1 représente la répartition des encoches par phase sous les différents pôles :

Chaque phase est constituée de deux groupes de bobines. Puisque le faisceau d'entrée de la première bobine du premier groupe de la phase (A) se trouve à l'encoche « 1 », le faisceau de « sortie » de cette bobine doit se trouver à un écart correspondant à $(1 + 6) = 7$. De ce fait, la seconde bobine du premier groupe de la phase (A) occupe les encoches 2 et 8. Il en va de même pour le deuxième groupe qui doit se situer dans les encoches (13 et 19) pour la première bobine et (14 et 20) pour la deuxième. Il ne reste qu'à réunir les deux groupes pour former l'enroulement de la première phase.

Il ne faut pas oublier que les deux groupes de bobines doivent être en accord avec les sens de courant imposé par le pas polaire, figure (2).

Tableau 1 répartition des encoches par phase sous les différents pôles

Groupe de bobine	pôle	Phase (A)	Phase(C)	Phase (B)
Premier groupe de bobines	Pôle 1	1, 2	3, 4	5, 6
	Pôle 2	7,8	9,10	11,12
Deuxieme groupe de bobines	Pôle 3	13,14	15,16	17,18
	Pôle 4	19,20	21,22	23,24

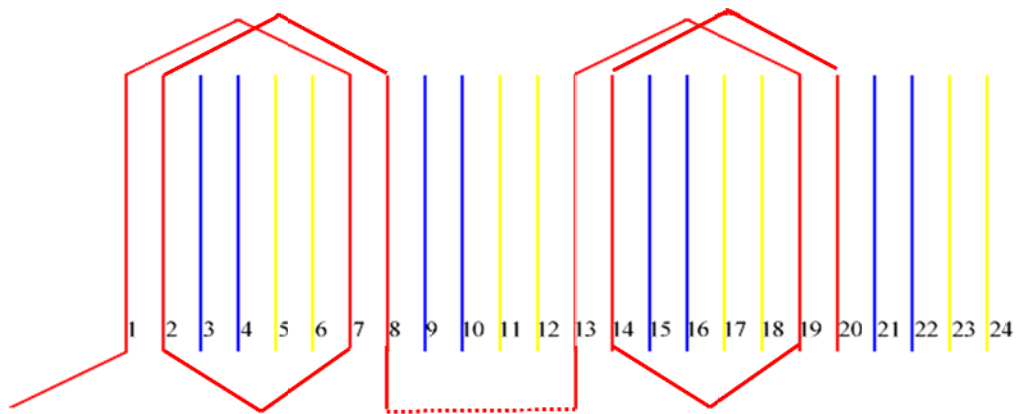


Figure 2. Schéma de bobinage pour la phase (A) d'une machine à 04 pôles, 24 encoches. L'enroulement est imbriqué à pas diamétral

L'enroulement de la phase (B) doit se retrouver décalé de quatre encoches par rapport à celui de la phase (A), par conséquent :

Le faisceau d'entrée de la première bobine du premier groupe de la phase (B) se trouve à l'encoche « 5 », le faisceau de « sortie » de cette bobine doit se trouver à un écart correspondant à $(5 + 6) = 11$. Le faisceau d'entrée de la deuxième bobine de la phase (B) se trouve à l'encoche « 6 », et le faisceau de « sortie » de cette bobine se trouvera à un écart correspondant à $(6 + 6) = 12$.

Il en va de même pour le deuxième groupe de bobines qui doit se situer dans les encoches (17 et 13) pour la première bobine et (18 et 24) pour la deuxième.

La phase (C) doit se situer quatre encoches plus loin que la phase B, soit les bobines (9 et 15) et (10,16) pour le premier groupe, et (21,3) et (24,4) pour le deuxième. Finalement on obtient le schéma de la figure (3).

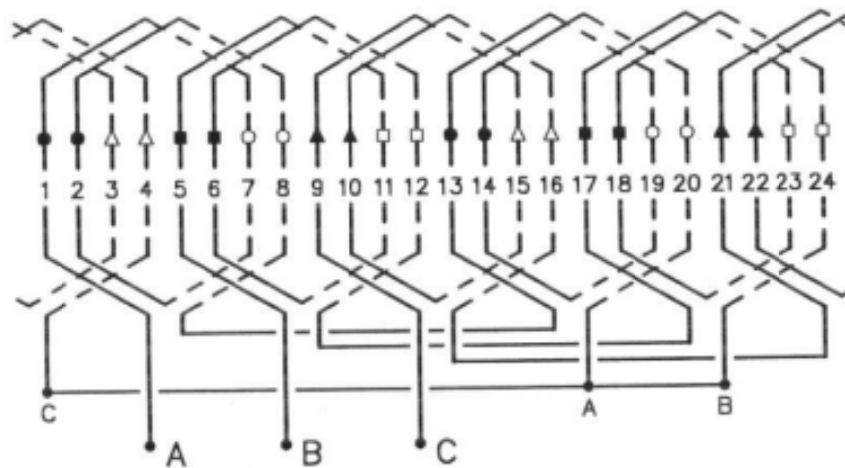


Figure 3. Schéma de bobinage pour les trois phases (A, B et C) d'une machine à 04 pôles, 24 encoches. L'enroulement est imbriqué à pas diamétral [Bouchard]

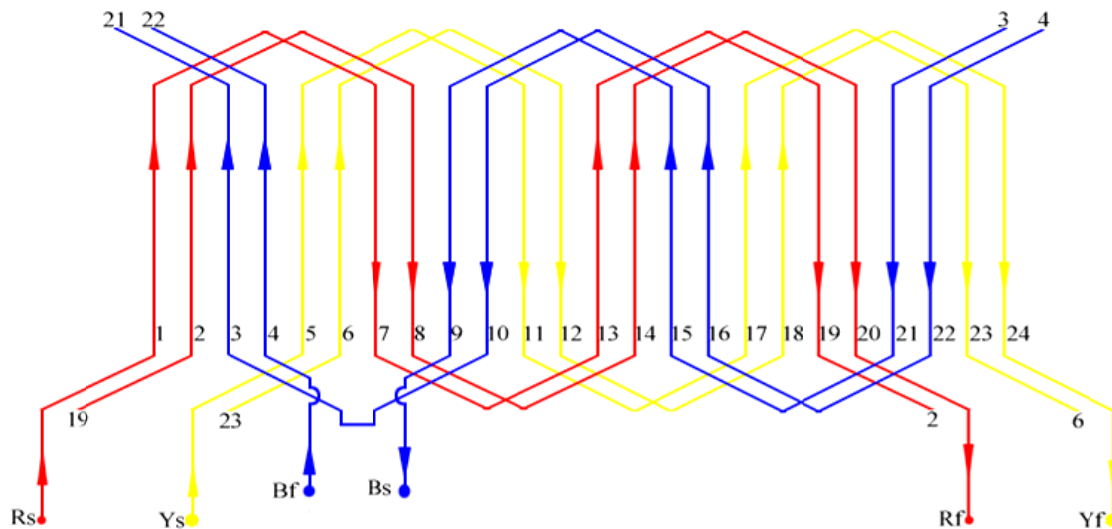


Figure 5. Schéma de bobinage pour les trois phases (A, B et C) d’une machine à 04 pôles, 24 encoches. L’enroulement est ondulé à pas diamétral

5.3 Enroulements concentriques

L’enroulement concentrique constitue le type d’enroulement le plus généralement utilisé dans la fabrication d’un bobinage à simple couche. Comme dans l’enroulement imbriqué à simple couche, chaque bobine occupe et remplit deux encoches. La différence réside dans le fait que les bobine au lieu d’être toutes identiques et décalées d’une encoche les unes par rapport aux autres, sont, à l’intérieur d’une phase, de dimensions différentes et placées les unes autour des autres.

Par conséquent pour un moteur à 4 pôle et 24 encoches (l’exemple précédent), plutôt que d’occuper les encoches (1 et 7) pour la première bobine et (2 et 8) pour la second bobine du premier groupe de la phase (A) , la premier bobine d’un enroulement concentrique est agrandie et occupe les encoches (1 et 8) tandis que la second bobine est réduit et occupe les encoches (2 et 7) figure (6).

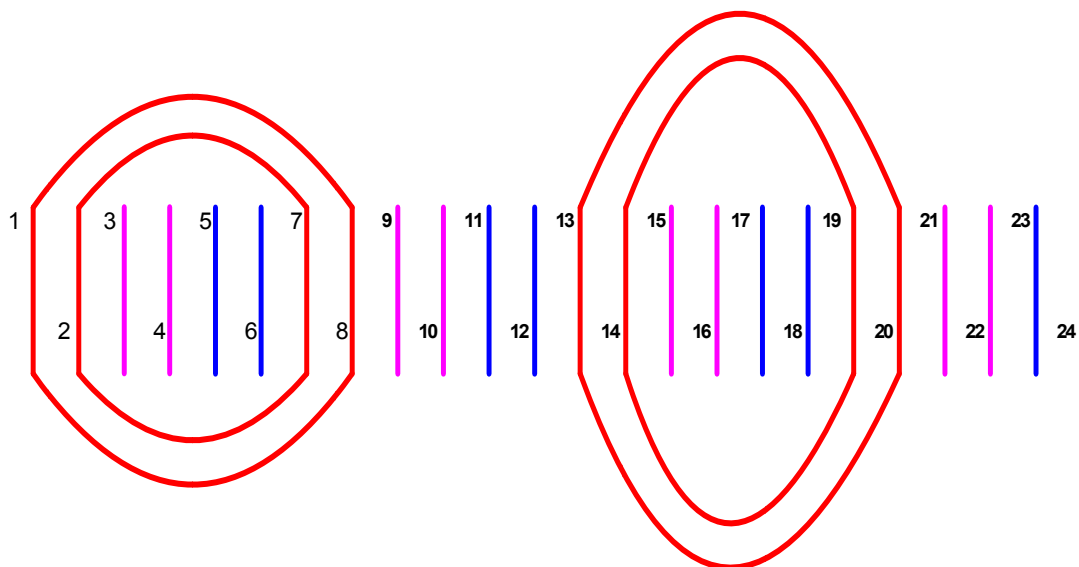


Figure 6. Schéma de bobinage pour la phase A d’une machine à 04 pôles, 24 encoches. L’enroulement est concentrique

Ni l'une ni l'autre des deux bobines n'est à pas diamétral, c'est-à-dire 6, comme c'est le cas avec le bobinage imbriqué ou ondulé car l'une à un pas de 7 et l'autre, un pas de 5. Toutefois, la moyenne des pas correspond à 6 qui est le pas normal. Il en va de même pour le deuxième groupe de la phase (A), la première bobine occupe les encoches (13 et 21), et la second occupe les encoches (14 et 19).

Le même raisonnement s'applique pour les phases B et C. On obtient ainsi pour les 03 phases le diagramme et le schéma de bobinage de la figure (7)

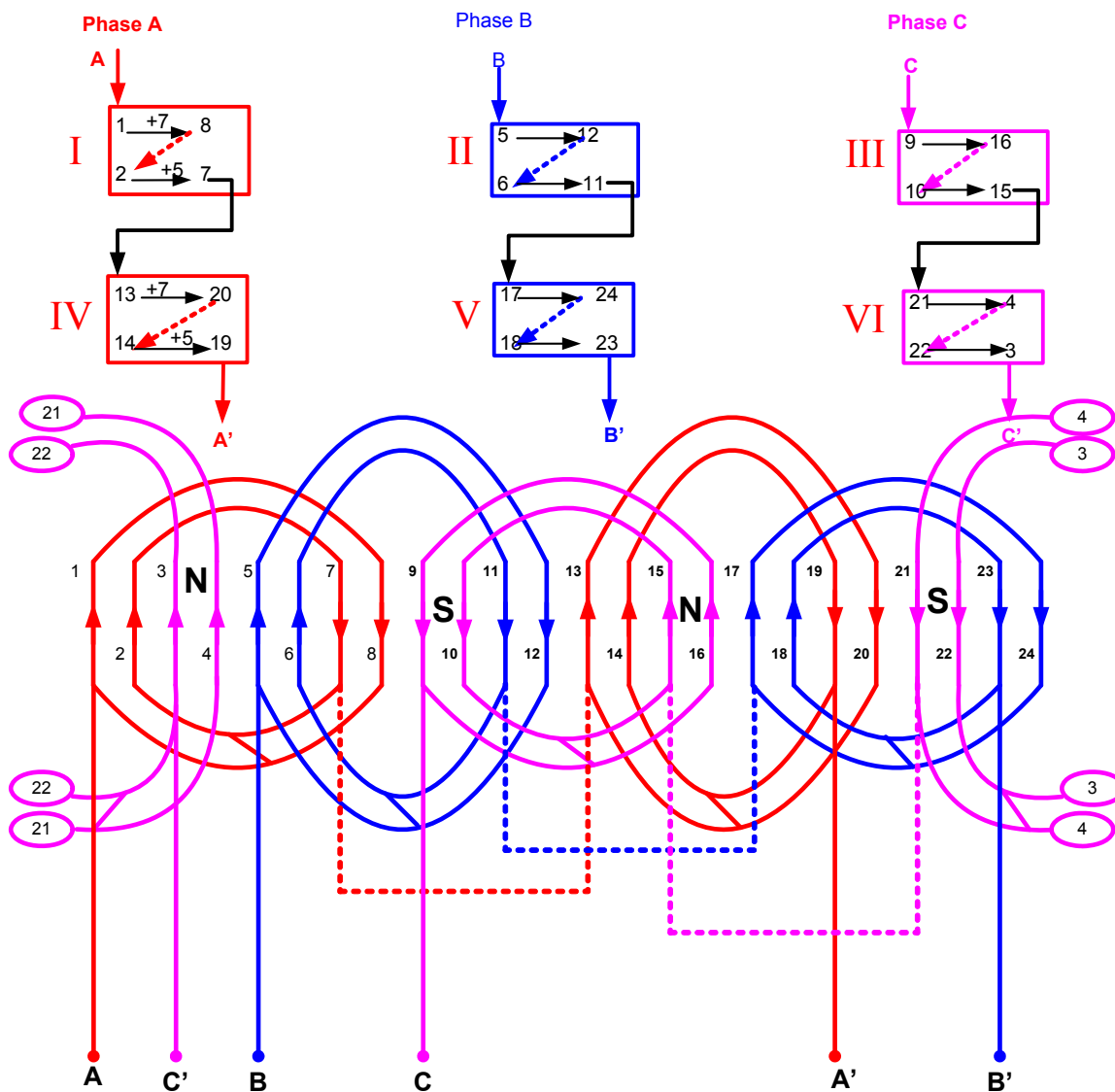


Figure 7. Schéma de bobinage pour les trois phases (A, B et C) d'une machine à 04 pôles, 24 encoches. L'enroulement est concentrique.

6. Enroulements triphasés à deux couches (02 faisceaux par encoche)

Ces bobinages sont très répandus, car ils ont l'avantage d'être réalisable avec des bobines égales (un seul moule pour former les bobines, calage des bobines plus homogène) sans avoir l'inconvénient du bobinage précédent.

En effet chaque bobine possède un faisceau situé dans la couche supérieure et un faisceau situé dans la couche inférieure, chacun des faisceaux occupant la mi-hauteur de l'encoche. Les têtes de bobines correspondant aux différents faisceaux de la couche supérieure s'éloignent hors du fer suivant des trajets parallèles, le passage d'une à l'autre se fait facilement au milieu des têtes de bobines.

Deux dispositions principales des têtes de bobines sont utilisées :

- a- Disposition dite cylindrique ou en manteau (Figure.8.a). Les têtes de bobines restent sensiblement dans un cylindre coaxial. L'encombrement radial B est faible, mais l'encombrement axial A est en gros proportionnel au pas polaire. Cette disposition est donc favorable aux grandes polarités (faible pas polaire et hauteur de culasse faible).
- b- Disposition dite en développante (figure.8.b) : Les têtes de bobines sont rabattues le long des surfaces latérales du fer. L'importance relative des coté A et B est inter changée par rapport à la figure 8a. Si l'on regarde les têtes de bobine suivant la direction X parallèles à l'axe, la forme des têtes de bobines correspond à des développantes de cercle, cela pour réduire la valeur de l'enroulement radial B , ce qui justifie la dénomination de ce type de bobinage. Cette disposition est réservée aux faibles polarités (4, et surtout 2 pôles), l'encombrement B n'étant pas alors un gêne étant vu l'importance de la hauteur de culasse.

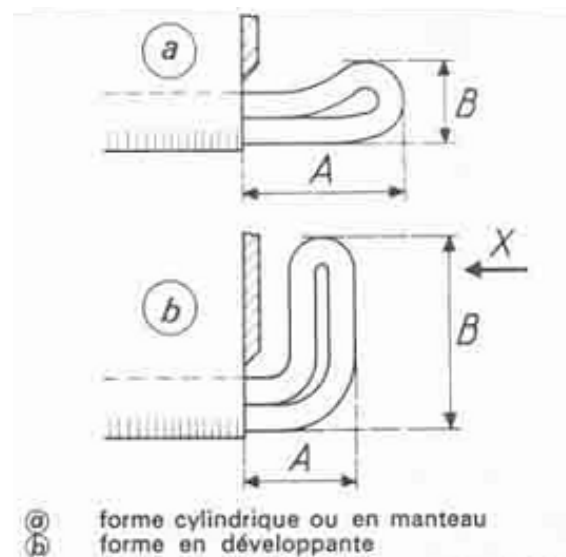


Figure. 8 Forme des têtes de bobines des enroulements à deux faisceaux par encoche [Jan Ancel]

7. Enroulements imbriqués à deux couches et à pas raccourci

L'enroulement à deux couches est toujours à pas raccourci. Dans l'enroulement imbriqué à pas raccourcis, la partie du bobinage située au fond des encoches est décalée par rapport à la partie supérieure d'un nombre entier d'encoches de telle sorte que l'ouverture des sections est inférieure au pas polaire. L'avantage que l'on peut retirer d'une telle disposition est de réduire, voire d'annuler les harmoniques d'espace, notamment les harmoniques 5 et 7 qui sont les plus gênants. Dans les moteurs asynchrones, l'harmonique 7 du champ magnétique est le plus gênant, car il se déplace dans le même sens que le champ magnétique fondamental

Exemple 02: Tracer le schéma de bobinage du stator d'une génératrice synchrone ayant les caractéristiques suivantes : 2 pôles, 24 encoches, 02 couches, imbriqué à pas raccourci (raccourcissement d'une encoche).

Solution :

Le pas polaire : $\tau_p = \frac{S}{p} = \frac{24}{2} = 12$

Le pas d'enroulement : $Y = \tau_p - 1 = 11$

Nombre d'encoches par phase et par pôle $q = \frac{8}{2} = 4$

Angle électrique entre 02 encoches voisines : $\frac{p \times 180^\circ}{S} = \frac{2 \times 180^\circ}{24} = 15^\circ$

Les entrées des différentes phases :

L'entrée de la phase (A) se fait à l'encoche N°1.

L'entrée de la phase (B) se fait à l'encoche : $1 + \frac{120^\circ}{15^\circ} = 9$

L'entrée de la phase (C) se fait à l'encoche : $1 + \frac{240^\circ}{30^\circ} = 17$

Le tableau 2 représente la répartition des encoches et des faisceaux par phase

Tableau 2 Répartition des encoches et des faisceaux par phase

Encoches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Faisceaux supérieures	A	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B
Faisceaux inférieurs	A	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B
Encoches	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Faisceaux supérieures	A	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B
Faisceaux inférieurs	A	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B

Le pas d'enroulement est égal à 11, par conséquent, le faisceau n°1 de la phase (A) doit être connecté au faisceau n° 12 de la phase (B), or un faisceau d'une phase ne peut pas être connecté à un faisceau d'une autre phase. Pour résoudre ce problème on décale à gauche le groupe de faisceaux inférieurs d'une encoche et on obtient le tableau 3 représentant la position correcte des encoches.

Tableau 3 Répartition corrigée des encoches et des faisceaux par phase

Encoches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Faisceaux supérieures	A	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B
Faisceaux inférieurs	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B	A
Encoches	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Faisceaux supérieures	A	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B
Faisceaux inférieurs	A	A	A	C	C	C	C	B	B	B	B	A

A l'aide de ce tableau, le schéma de bobinage de la phase (A) peut être établi selon le schéma de la figure 9. Il est à noter que l'entrée d'une bobine est un faisceau ayant un numéro sans apostrophe tandis que la sortie est un faisceau ayant un numéro avec apostrophe.

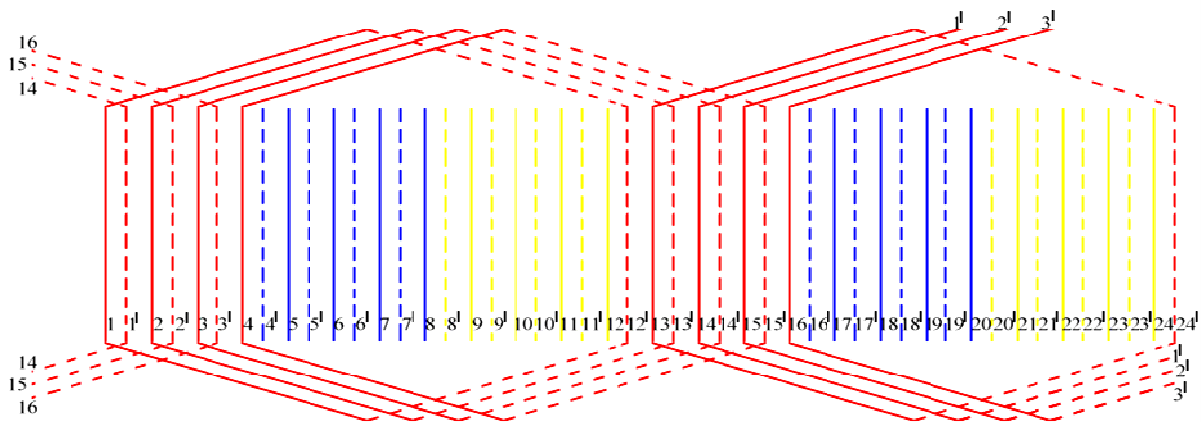


Figure 9. Schéma de bobinage pour la phase A d'une machine à 02 pôles, 24 encoches. L'enroulement est imbriqué à deux couches et à pas raccourci d'une encoche.

La figure 10 représente le schéma complet du bobinage. Il faut se rappeler que :
 Le faisceau d'entrée de la phase (B) est le faisceau supérieur de l'encoche « 9 ».
 Le faisceau d'entrée de la phase (C) est le faisceau supérieur de l'encoche « 17 ».

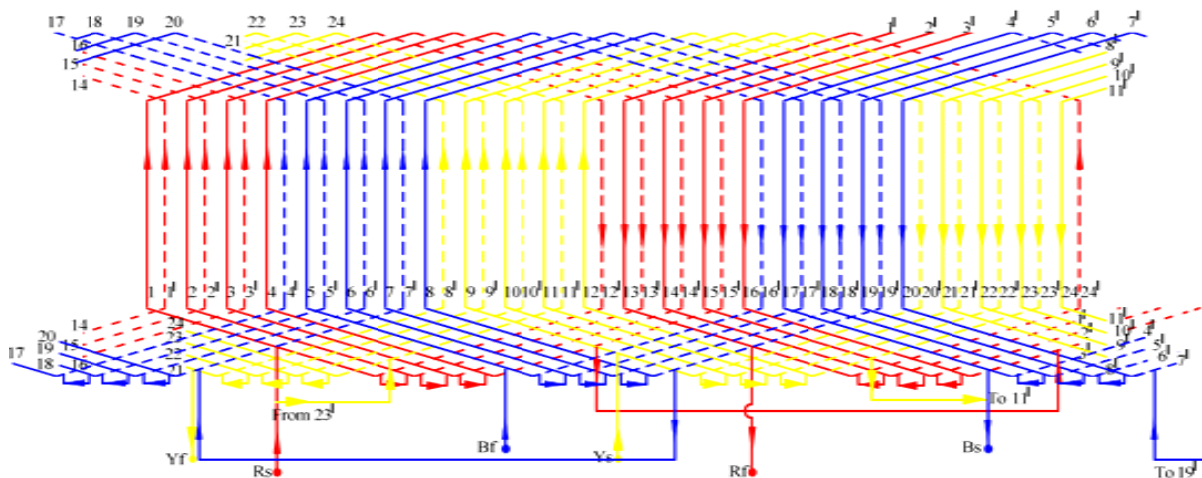


Figure 10. Schéma de bobinage pour les 03 phases d'une machine à 02 pôles, 24 encoches. L'enroulement est imbriqué à deux couches et à pas raccourci d'une encoche.

8. Enroulement à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et phase

Pour les machines à grand nombre de pôles, les nombres entiers considérés pour les bobinages réguliers conduisent généralement à des nombres d'encoches très élevés qui rendent la machine soit non réalisable, soit trop coûteuse. On doit ainsi faire appel à une autre définition en introduisant des nombres non entiers d'encoches par pôle et phase. Cela a pour conséquence directe que, pour une quelconque des phases, le nombre d'encoches bobinées par pôle est variable et/ou les régions bobinées ne sont pas équidistantes.

La figure 11.a a en est une illustration, à titre d'exemple, pour une machine à 54 encoches et 12 pôles, soit 1,5 encoche par pôle et phase : la phase 1 est en noir et la phase 1' en gris. Pour une meilleure compréhension, les connexions frontales sont aussi figurées pour la première phase.

Il s'agit d'un bobinage imbriqué à 2 couches avec un pas de 3 (1 à 4) pour un pas diamétral de : $\frac{54}{12} = 4.5$

L'angle électrique entre encoches a pour valeur : $\frac{12 \times 180^\circ}{54} = 40^\circ$

Les phases sont donc bien décalées de 120° (3 encoches). Le motif se reproduit tous les 2 pôles. Il sera donc possible de prévoir au plus 6 circuits en parallèle pour ce schéma, alors qu'avec un bobinage régulier on aurait pu aller jusqu'à 12.

Toujours pour une machine à 12 pôles, on peut aussi avoir 1.25 encoche par pôle et phase, soit en tout : $1.25 \times 3 \times 12 = 45$ encoches.

Le schéma est dans ce cas plus complexe, car il devra montrer des alternances de motifs à 1,5 et à 1 encoche bobinée par phase.

Il se présente comme sur la figure 11.b, la phase 1 étant noircie et la phase 1' grisée. Les têtes de bobines de la phase 1 sont aussi représentées. Le pas de bobinage est de 3 (1 à 4).

Dans cet exemple, le motif ne se retrouve à l'identique que tous les 4 pôles, mais les phases sont toujours décalées de 120° : il y a en effet 5 encoches de décalage pour la phase 1'' ($240 = 5 \times 6 \times 360/45$) et 10 pour la phase 1' qui correspond bien à 120° modulo 360° .

Le nombre maximal de circuits en parallèle sera cette fois limité à 4.

Tous les nombres fractionnaires ne sont pas autorisés : en particulier les nombres tels que la fraction irréductible ait un dénominateur multiple de 3 sont interdits, car les phases ne peuvent alors pas être décalées entre elles d'un angle de 120° . Si le nombre de pôles est multiple de 3^n , le nombre d'encoches devra donc être multiple de 3^{n+1} .

L'onde de FMM des bobinages fractionnaires est relativement distordue, en raison :

- du nombre généralement faible d'encoches par pôle ;
- de la périodicité du motif qui se fait sur plusieurs pôles au lieu d'un seul ;
- de la non équidistance des parties bobinées et de leur disposition différente.

Il en résulte des harmoniques inférieurs de FMM qui tournent donc à une vitesse d'autant plus grande par rapport au fondamental que leur période spatiale est plus grande. Ils créent aussi des harmoniques pairs.

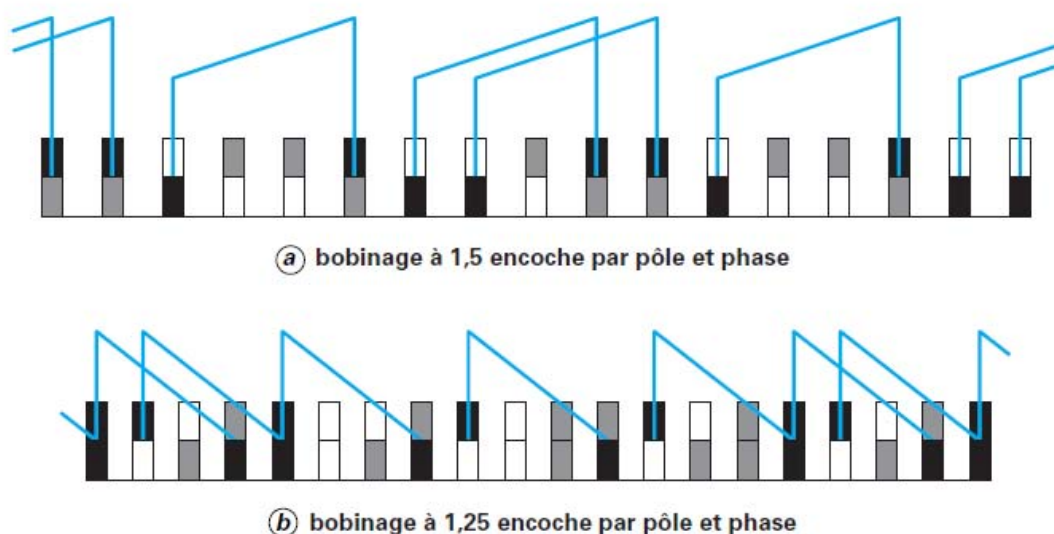


Figure 11 Bobinage à 1,25 encoche par pôle et phase

En fait, l'intérêt essentiel de ces bobinages est de minimiser l'influence des harmoniques de denture. En effet, si l'on imagine une dent dans l'axe d'un pôle arbitraire, les pôles adjacents auront au pire, dans le cas d'un nombre demi-entier, une encoche dans l'axe, minimisant ainsi très efficacement les effets de variation de réductance. Les coefficients de bobinage de ces harmoniques deviennent alors beaucoup plus petits que dans le cas des bobinages entiers, pour lesquels on sait qu'ils sont maximaux. Dès lors, il est parfois possible de se passer du vrillage de l'une des deux armatures.

9. Le facteur d'enroulement :

Dans l'étude de la répartition du champ dans l'entrefer des machines à courant alternatif, il faut prendre en considération la disposition des conducteurs du stator et du rotor et faire intervenir un facteur de correction, dit facteur de bobinage ou facteur d'enroulement. Ce facteur tient compte de la répartition du bobinage et des raccourcissements éventuels du pas d'enroulement. Il est donné par l'expression classique suivante :

$$K_w = K_d \cdot K_r \quad (4)$$

Où K_d désigne le facteur de distribution et K_r le facteur de raccourcissement du pas.

9.1 Le facteur de distribution :

Le facteur de distribution prend en considération uniquement la distribution des bobines entre elles (d'une même phase) et ne prend pas en considération la distribution des spires à l'intérieur d'une bobine. Si on définit q comme étant le nombre d'encoches et α comme l'angle en degrés électrique qui sépare deux encoches, le facteur de distribution du $v^{\text{ème}}$ harmonique, est égal à :

$$K_d = \frac{\sin v \frac{q\alpha}{2}}{q \sin v \frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

9.2 Le facteur de raccourcissement :

Le facteur de raccourcissement tient compte du raccourcissement de l'ouverture de bobine par rapport au pas polaire. Ce facteur est déterminé par le rapport entre le flux capté par une bobine et le flux total induit par un pôle magnétique et s'exprime :

$$K_r = \sin v \frac{C \cdot \pi}{2 \cdot \tau_p} \quad (6)$$

Où C désigne l'ouverture de la bobine.

Habituellement, on définit le rapport $\frac{c}{\tau_p}$ comme étant le rapport du raccourcissement du pas

Le raccourcissement diminue la f.é.m. de la machine donc semble uniquement nuisible au bon fonctionnement. Ce procédé est utilisé pour étouffer les harmoniques de la f.é.m.

10. Choix des enroulements pour courant alternatif :

Aucune règle ne peut être donnée quant au choix du type de bobinage, celui-ci dépendant de nombreux facteurs tels que :

- Possibilité de mise en parallèles à l'intérieur des phases, principalement pour les bobinages susceptibles d'être réalisés pour des tensions différentes.

- Encombrement des têtes de bobines et facilité de fixation de celles-ci.
- Temps nécessaire pour réaliser le bobinage.
- Outillage nécessaire pour la fabrication des bobines.
- Possibilité de couper l'induit en plusieurs parties à assembler sur place

Les bobinages à plans à un faisceau par encoche étaient autrefois très répandus, principalement pour les faibles et moyennes puissances. Ils sont encore souvent utilisés pour les moteurs monophasés.

Pour les bobinages triphasés, on emploie de plus en plus les bobinages à deux faisceaux par encoche car ils présentent les avantages :

- Possibilité de réduction du pas de bobinage
- Fixation plus homogène des têtes de bobines
- Nécessité d'un seul moule de bobines.