

CONCEPCIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO DE JAULA DE ARDILLA

Proyecto de fin de grado

Universidad Pontificia de Comillas

PEDRO MARTÍNEZ-OSORIO MARTÍN-RIVA

Jefe de proyecto: AMIR ARZANDÉ (Supélec)

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Grado en Ingeniería Electromecánica

Especialidad eléctrica

Julio 2014

CONCEPCIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO DE JAULA DE ARDILLA

RESUMEN

Proyecto de fin de grado

Universidad Pontificia de Comillas

PEDRO MARTÍNEZ-OSORIO MARTÍN-RIVA

Jefe de proyecto: AMIR ARZANDÉ (Supélec)

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Grado en Ingeniería Electromecánica

Especialidad eléctrica

Julio 2014

CONCEPCIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO DE JAULA DE ARDILLA

Los motores asíncronos o motores de inducción están compuestos de dos partes: el estator, que está fijo y en el que encontramos los enrollamientos conectados a la fuente; y el rotor, montado sobre un eje libre, que gira. Ambas partes están hechas de láminas de acero al silicio y cuentan con ranuras donde se colocan los enrollamientos. Según el tipo de rotor distinguimos entre motores de rotor bobinado y motores de jaula de ardilla. En el rotor bobinado, los enrollamientos trifásicos (en estrella o triángulo) están conectados a anillos que los hacen accesibles desde el exterior a través de escobillas. En cambio, las ranuras del motor de jaula de ardilla están formadas por barras (normalmente de cobre o aluminio) cortocircuitadas en los extremos por anillos terminales. Este tipo de motor se ha convertido en el más común de los dos.

Este proyecto aborda, en un primer lugar, las generalidades y los aspectos teóricos del diseño y construcción de motores asíncronos de jaula de ardilla. Se analizan las características óptimas de las distintas partes (rotor y estator) en cuanto a dimensiones, materiales, forma y número de ranuras, tipos de enrollamiento y demás en función de los resultados deseados. Para ello se tienen en cuenta todo tipo de cuestiones relativas a la construcción como el aislamiento, los canales de ventilación (si son necesarios), etcétera.

Para los motores de baja y media potencia, la jaula de ardilla se puede construir con aluminio vertido bajo presión y vacío parcial, lo cual permite evitar la presencia de burbujas de aire y hacer las barras y los anillos en la misma operación. Para los motores más grandes se suelen utilizar barras de cobre o latón. Puesto que la tensión inducida en las barras es débil, no hay necesidad de aislamiento entre barras y dientes del rotor, al contrario de lo que ocurre en el estator. Para reducir el ruido y ciertos armónicos durante el arranque y para que la aceleración sea más uniforme, a menudo se construye el rotor de manera que los conductores sean oblicuos respecto al eje del motor. Sin

embargo, esta configuración es incompatible con el análisis en dos dimensiones que se realiza al final del proyecto.

La forma de la ranura del estator tiene una importancia especial en este estudio teórico pues determina en gran medida la forma de la curva par/velocidad. El mayor problema que podemos encontrarnos es un par de arranque muy bajo o una corriente de arranque demasiado alta, y se puede solucionar con una doble jaula o con ranuras profundas. La doble jaula está compuesta de un material de fuerte resistividad y débil dispersión magnética cerca del entrehierro (latón, bronce) y uno de débil resistividad y fuerte dispersión magnética lejos (cobre). La jaula externa, sobre todo activa durante el arranque, permite obtener un par más importante en esta fase de funcionamiento, mientras que en régimen nominal la jaula interna permite alcanzar las características de un motor de jaula simple. En el caso de las ranuras profundas (o ranuras dobles, que no es lo mismo que doble jaula), se utiliza el efecto pelicular en los conductores con el fin de hacer variar la resistencia del rotor en función de la velocidad de funcionamiento de la máquina. Este efecto hace que, cuanto mayor es la frecuencia de la corriente, mayor tendencia tiene ésta a circular solo por la superficie de los conductores. Así, durante el arranque, a medida que la velocidad de rotación aumenta, la frecuencia de la corriente en el rotor disminuye y la corriente utiliza una superficie cada vez más grande de la barra. Esto permite igualmente tener un par de arranque más importante.

En cuanto a los enrollamientos del estator, analizamos los diferentes tipos (ondulado, imbricado y concéntrico), a una o dos capas (el concéntrico no pudiendo ser utilizado más que en configuración a una capa). Para media y alta potencia se suele emplear el imbricado a doble capa, mientras que para los motores de baja potencia se suele emplear el concéntrico. El uso de "camino en paralelo" permite usar un motor bajo distintas tensiones. Diversas ecuaciones nos dan el número idóneo de conductores en serie por fase, el flujo magnético por polo y el número de conductores en cada ranura en función de la tensión aplicada, el número de ranuras y diversos factores (de distribución y de paso) que dependen del tipo de enrollamiento escogido.

En cuanto al número de ranuras y sus dimensiones, se parte de una anchura de ranura y de diente similar, y de una profundidad de ranura del orden de 4 a 6 veces su anchura. Para un motor de 4 polos, la anchura de la culata y la longitud del diente son similares, mientras que para 2 polos la culata es más ancha (en torno a un 30-50% más) y para más polos es más estrecha. La elección del paso entre las ranuras y de las dimensiones de éstas va en función de la corriente total que debe atravesarlas (es decir, del número de conductores, su sección y el espesor del aislamiento). Dependiendo del diámetro (y de la potencia) del motor, hay ciertos intervalos de valores estándar para el paso entre ranuras. El aislamiento sólo tiene lugar en el estator, envolviendo los cables (barniz flexible, normalmente a doble capa) y también entre los conductores y el acero del estator. Antiguamente se realizaba un enrollamiento con bobinas prefabricadas que obligaba a que la ranura fuera de tipo abierto y paredes paralelas. Se introducía una claveta para cerrarla. Hoy en día se emplea más la ranura semiabierta, introduciendo cada cable por la abertura. El uso de ranuras trapezoidales, sean de fondo listo o curvo, permite que los dientes tengan paredes paralelas y el flujo magnético se distribuya uniformemente. Llamamos factor de espacio al cociente entre la sección total de conductor y el espacio neto disponible en la ranura. No es mayor de 0.85 para los cables al barniz. Para la producción en serie se sitúa entre 0.7 y 0.75. Diversas ecuaciones nos permiten calcular el flujo magnético tanto en el entrehierro como en los dientes y la culata del estator, entre otros parámetros.

El dimensionamiento del estator lo hacemos calculando D (diámetro interior del estator) como $\tau p / \pi$. De (el diámetro exterior) viene dado por unos intervalos de valores usuales del cociente D_e / D en función del número de polos. Notemos que el valor de τ viene dado por una ecuación empírica que nos da un valor aceptable en la mayoría de casos. Igualmente, la longitud del motor se calcula como $l = \frac{P_u k_u}{n D_e^2}$, siendo k_u un coeficiente artificial que llamamos coeficiente de utilización y que podemos trazar en función del cociente entre potencia y velocidad. Su valor desciende ligeramente cuando el número de polos es mayor. Es conveniente tener en cuenta la longitud “aparente” del motor,

que tiene en cuenta canales de ventilación y disipación del flujo en los extremos. Diversas ecuaciones también arrojan las dimensiones idóneas para el tipo de ranura escogido, que es trapezoidal de fondo curvo.

En lo que concierne al rotor, lo más importante es la buena elección del número de ranuras, que evita la presencia de vibraciones, ruido magnético e intervalos de sincronismo (una especie de escalones en la parte de baja velocidad de la curva del par) El número de ranuras del rotor nunca debe ser igual al del estator. Puede ser más grande pero en general es más pequeño, obteniendo buenos resultados para valores entre un 15 y un 30% más bajos. Para evitar vibraciones deberíamos escoger $N_{es}-N_{er}$ de manera que $N_{es}-N_{er}$ sea distinto de $\pm 1, \pm 2, \pm(p \pm 1)$ y $\pm(p \pm 2)$. Para evitar un par "sacudido" (debido a la variación del par de arranque para las diferentes posiciones del rotor), $N_{es}-N_{er}$ debería ser distinto de todo múltiplo de $\pm 3p$. Los picos de sincronismo son eliminados para valores de $N_{es}-N_{er}$ distintos de $\pm p, -2p$ y $-5p$. Con todo esto, creamos una tabla con los valores posibles de parejas de números de ranuras estator-rotor para motores de 2, 4, 6 y 8 polos.

En el rotor, diversas ecuaciones nos arrojan los valores de la corriente máxima, lo cual nos permite calcular la sección del anillo y, sabiendo el número de ranuras, la sección de cada barra. Las dimensiones idóneas de la ranura siguen el mismo cálculo que en el caso de estator. Si la jaula de ardilla no se hace vertiendo metal fundido, hay que dejar suficiente juego para la inserción de la barra. El tipo de ranura calculado es trapezoidal con ambas extremidades curvas.

Por último, se calculan los parámetros del circuito equivalente y las características del funcionamiento durante el arranque y en marcha normal.

En segundo lugar, este proyecto comprende también la creación de una aplicación *Matlab* que contiene todo lo tratado en la parte teórica y nos da las características

óptimas del motor. Recibe parámetros como la potencia, el par y la velocidad nominal, la tensión, la frecuencia y el número de polos. Como resultado obtenemos las dimensiones de las ranuras de estator y rotor (para una forma de ranura predeterminada), las características de ambas partes (dimensiones, número de ranuras). También nos da como resultado las características de funcionamiento (en carga, en el punto de par máximo, en el arranque) y los parámetros del circuito equivalente.

Por último, se ha utilizado el programa de análisis por elementos finitos *JMAG* para validar los resultados con los parámetros que nuestros cálculos habían arrojado. También se ha utilizado este programa para observar cómo varían las prestaciones del motor haciendo variar distintos parámetros (dimensiones, materiales, forma de las ranuras)

DESIGN OF A SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR

Induction motors are made of two parts: a stator that stays still, where we can find windings relying it to the source; and the rotor, that is placed on an axis which turns. Both parts are made of silicon electrical steel sheets and have notches where the windings are placed. Depending on the type of rotor we classify motors in wound type motors and squirrel-cage motors. In a wound type rotor, the three-phase windings (either in star or triangle) are connected to slip rings that make them accessible from the outside by means of brushes. In squirrel-cage motors, however, rotor notches are filled with metal bars (normally made of copper or aluminium) that are short circuited at both ends by terminal metal rings. This type of motor has become the most usual of both

This project treats, in first place, the generalities and technical aspects of the conception and construction of squirrel-cage induction motors. We will analyze the optimal characteristics of both rotor and stator in terms of dimensions, materials, shape and number of notches, type of winding and so on in order to achieve the desired behavior. To accomplish this objective, all kinds of questions regarding the construction of the motor (such as insulation and ventilation) are taken into account.

For low and medium power motors, the cage can be built with aluminium poured under pressure and partial vacuum, which lets us avoid the presence of air bubbles in the bars. This way, bars and terminal rings are all made in the same operation. For bigger motors normally copper or brass bars are used by directly introducing them in the notches. As the tension inducted in the bars is weak, there is no need to isolate bars from rotor teeth, as opposed to what happens in the stator. To reduce noise and certain harmonics during the start period, and in order to have a more uniform acceleration, the rotor is often built in such a way that the bars lay oblique to the rotor axis. Nevertheless, this configuration is not compatible with the 2D analysis that we will perform using *JMAG*.

The shape of the stator's notch has a special importance in the theoretical study as it determines in great measure the shape of the torque/speed curve. The biggest issue we can face is to have a low starting torque or a too high starting current. This can be solved by using a double squirrel cage or deep notches.

A double squirrel cage is made of high resistivity, low magnetic dispersion bars near the air gap (made of brass, bronze) and low resistivity, high dispersion bars far from the air gap (copper). The external cage, active mainly during the start phase, lets us obtain a bigger torque during that phase, whilst near the rated values the internal cage lets us have the same performances as in a single-cage motor.

Deep notches (or double notches, which is not the same as double cage), conductors' skin effect is used to make the rotor resistance change as a function of the machine speed. This effect implies that, the bigger the current frequency, the higher tendency it has to circulate on the conductors' surface. As a result, during the start phase, as speed goes up, the rotor frequency goes down and the current uses a bigger and bigger part of the bar. This also lets us have a bigger starting torque.

Regarding stator windings, we analyze the different types (undulated, imbricated and concentric), and configurations (one or two layers, concentric winding being unable to present a double layer configuration). For medium and high power motors, double-layer imbricated winding is usually used. The use of « parallel paths » lets us use a motor under different tensions. Certain equations give us the ideal number of series conductors per phase, magnetic flux per pole and number of conductors per notch as a function of the applied tension, the number of notches, the diverse factors regarding the chosen winding.

Regarding the number of notches and their dimensions, we start from the assumption that the width of the notch and the tooth is similar, and that the notch has a depth of 4

to 6 times its width. For a 4-pole motor, the width of the stator breach and the tooth's length is similar (it is a bit bigger for 2-pole motors and a bit smaller for 6 and 8-pole motors). The choice of the distance between notches and their dimensions depends on the total current that has to go through them (i.e. the number of conductors, their section, the insulators' thickness...) Depending on the diameter (and the power) of the motor, there are certain intervals of values for the distance between notches. Insulation is only necessary in the stator, covering wires (flexible varnish) and between the conductors and the stator steel sheets. Formerly, it was common to use prefabricated coils that were inserted as a whole in the notch, which made it necessary for the notch to be open and parallel sided. Nowadays, the most used type of notch is the semi-open one, where wires are introduced one by one through the opening. The use of trapezoidal notches (either flat or round-ended) allows the teeth to have parallel sides so that the magnetic flux is uniformly distributed. We call space factor to the relation between the total conductor section and the net available space in the notch. It is not bigger than 0.85 for varnished wires. For mechanic production its value lies between 0.7 and 0.75. Diverse equations allow us to calculate the magnetic flux in the air gap as well as the teeth and the stator breach, among other parameters.

D (the inside diameter of the stator) is calculated as $\tau p / \pi$. D_e (the outer diameter) is given by some intervals of usual values of the quotient D_e/D as a function of the number of poles. Notice that the value of τ is given by an empiric equation that provides an acceptable value in most cases. The length of the motor is calculated as $l = \frac{P_u k_u}{n D_e^2}$, k_u being an artificial coefficient named "usage coefficient" that can be traced as a function of the ratio between power and speed. Its value gets smaller as the number of poles grows. It is convenient to take into account the apparent length of the motor, that considers ventilation openings and the dissipation of magnetic flux at both ends. Several equations give us the ideal dimensions of the notch for the chosen shape, which is no other than a trapezoidal, round ended one.

Concerning the rotor, the most important choice is the number of notches, which helps us get rid of vibrations, magnetic noise and synchronism intervals (a sort of steps in the low-speed part of the torque/speed curve). The number of notches must never be the same as in the stator. It can be bigger but in general it is smaller. Normally, values between 15 and 30% smaller result in good performances. To avoid vibrations we should choose Nes-Ner different from $\pm 1, \pm 2, \pm(p \pm 1)$ y $\pm(p \pm 2)$. To avoid a jerky torque due to the variation of the starting torque for different rotor positions, Nes-Ner should be different from every multiple of $\pm 3p$. Synchronism peaks are avoided by using values of Nes-Ner different from $\pm p, -2p$ y $-5p$. Taking all these constraints into account, we can create a chart containing all possible pairs of values Nes and Ner for 2, 4, 6 and 8 pole motors.

Several equations give us the values of the maximum current in the rotor, which lets us calculate the section of the terminal rings and, knowing the number of bars, the section of each bar. The ideal dimensions of the notch calculations follow the same rules as the stator ones. If the squirrel cage is not made by pouring liquid metal but by inserting the bars, enough room has to be left for the insertion. The type of notch chosen is trapezoidal with both ends curved. Finally, the equivalent-circuit parameters and the characteristics of the operation during start phase and rated values are calculated.

As a second part of the project, a *Matlab* application containing all the theoretical questions treated has been made. It gives us the optimal characteristics of a motor given the desired nominal power, torque and speed, as well as tension and frequency or number of poles. As a result we obtain the dimension of both parts' notches, the dimensions and number of notches of the stator and the rotor, the equivalent circuit parameters and the operation characteristics at the starting phase, the maximum torque and the rated point.

Thirdly, the finite-element analysis software *JMAG* has been used in order to validate the results obtained by our calculations. This program has also been used to observe how

the motor performances change by changing some motor characteristics (dimensions, materials, notch shapes...).

INDEX

- 1. Enoncé et objectifs: page 3**
- 2. Généralités sur la construction des moteurs : page 3**
- 3. Classification des moteurs : page 6**
- 4. Bobinage : page 7**
- 5. Isolation : page 14**
- 6. Stator : page 15**
- 7. Rotor : page 27**
- 8. Circuit équivalent : page 35**
- 9. Programme sur Matlab : page 39**
- 10. Modélisation sur JMAG : page 42**
- 11. Bibliographie : page 64**

1. ENONCÉ ET OBJECTIFS

L'objectif de ce projet est d'aborder la conception de moteurs asynchrones triphasés. Tout d'abord on fera une étude théorique abordant les généralités sur sa construction et les différentes parties (rotor et stator). On fera spéciale attention au dimensionnement, le nombre de pôles, les matériaux, la forme des encoches et les enroulements.

Comme partie pratique nous avons réalisé un programme qui applique les calculs de la partie théorique, essayant d'obtenir des valeurs optimales des paramètres (dimensions, circuit équivalente, caractéristique du couple, etcétera) non seulement pour les valeurs de notre cahier des charges mais pour d'autres valeurs.

Cependant ce code *Matlab* utilise toujours les mêmes formes d'encoche pour rotor et stator (semi ouverte trapézoïdale). Comme dernière partie on analysera comment les variations des dimensions et de la forme de l'encoche peuvent affecter les caractéristiques de fonctionnement du moteur à l'aide du logiciel *JMAG-Express*.

2. GENERALITÉS SUR LA CONSTRUCTION DE MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

Les moteurs asynchrones ou moteurs à induction sont composés de deux parties : le stator, qui est fixe et on y trouve les enroulements reliés à la source et le rotor, qui est monté sur un axe libre et tourne. Toutes les deux parties sont faites de tôles d'acier au silicium et comptent des encoches où l'on place des enroulements. Selon le type de rotor on distingue les moteurs à rotor bobiné et les moteurs à cage d'écureuil.

L'épaisseur des tôles du stator varie entre 0.35 et 0.55 mm. Plus les tôles sont fines, plus on minimise les pertes du circuit magnétique. Pour les moteurs à grand diamètre, les tôles sont découpées par sections (il n'y a pas une seule tôle

pour toute la circonférence du moteur mais plusieurs). Les tôles sont recouvertes d'une couche de vernis pour limiter les courants de Foucault. Le coefficient de foisonnement est donc le rapport entre l'épaisseur véritable de l'acier et l'épaisseur physique de l'empilement de tôles. Il varie entre 0.92 et 0.94 normalement.

Une caractéristique importante du stator est la forme de l'encoche. On retrouve deux types principaux : l'encoche ouverte et la semi-ouverte. Normalement les encoches de type ouvert sont de la même largeur sur toute leur profondeur et les dents sont trapézoïdales. On doit y insérer une clavette près de l'entrefer. Les encoches semi-ouvertes sont normalement de forme trapézoïdale, donc les dents sont à parois parallèles. Ces encoches laissent une ouverture de largeur minimale mais qui permet quand même introduire des conducteurs de petit diamètre.

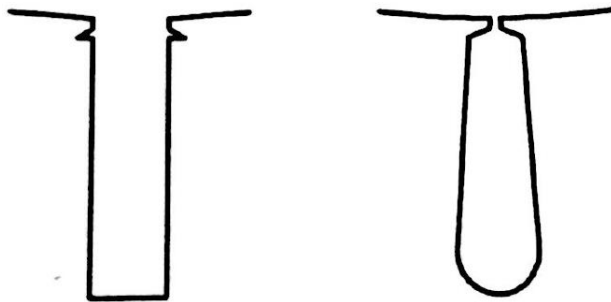


Figure 1 : Encoche ouverte (avec l'espace pour la clavette) et semi-ouverte trapézoïdale à fond rond

Pour des moteurs à longueurs importantes on divise le paquet de tôles par des canaux de ventilation dont la largeur varie entre 8 et 12 mm. Pour son efficacité il faut que leur localisation soit différente dans le rotor et le stator. Dans les moteurs à petit diamètre on ne les insère pas car il faut ajouter des canaux pour l'évacuation de l'air, ce qui n'est pas toujours physiquement faisable. Pour des moteurs à épaisseur d'acier supérieur à 250 mm, on détermine habituellement le nombre de canaux de sorte à avoir des paquets de tôles de 60 à 80 mm d'épaisseur. Des « entretoises » servent alors à maintenir l'espacement et fixer

les paquets de tôles les uns aux autres. Souvent, on serre les tôles ensemble à l'aide de boulons ou cordons de soudure pour éviter les vibrations.

Au rotor bobiné ou rotor à bagues, les enroulements triphasés (en étoile ou triangle) sont connectés à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur à travers de balais qu'on peut court-circuiter pour la marche normale. On peut également y insérer des résistances ou ajouter des convertisseurs à thyristors pour régler le courant de démarrage et la vitesse en marche. Cependant, depuis quelques années ce moteur a été remplacé par le moteur à cage piloté par des convertisseurs à fréquence variable. Dans ce type de rotor, les enroulements et leurs différents aspects sont semblables à ceux du stator, présentant cependant la particularité d'être connectés à des bagues sur lesquelles frottent des balais qui rendent le circuit du rotor accessible de l'extérieur.

Les encoches du moteur à cage d'écureuil sont des barres en cuivre ou en aluminium court-circuitées aux deux bouts du stator par des anneaux terminaux. Dans les moteurs à faible-moyenne puissance, les cages sont faites en aluminium coulé sous vide partiel et pression, ce qui permet d'éviter la présence de bulles d'air et de faire les barres et les anneaux dans la même opération. Pour les grands moteurs on utilise normalement des barres en cuivre ou en laiton. On utilise habituellement des encoches de type semi-ouvert, bien que les encoches fermées soient aussi fréquentes. Puisque la tension induite dans les barres du rotor est faible, on n'a besoin d'une isolation entre barres et dents.

Pour réduire le bruit et certains harmoniques pendant le démarrage et pour que l'accélération soit plus uniforme, on construit le rotor de façon à ce que les conducteurs soient obliques par rapport à l'axe du moteur



Figure 2 : Cage d'écureuil à conducteurs obliques

3. CLASSIFICATION DES MOTEURS À CAGE D'ÉCUREUIL

Selon le critère de la NEMA (www.nema.org), on peut classer les moteurs à cage d'écureuil selon la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor. Au démarrage, la réactance est d'autant plus grande que le conducteur est éloigné de l'entrefer. La résistance dépend de la longueur du rotor, la section des conducteurs et le matériau utilisé. Plus la résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit et meilleur est le couple de démarrage.

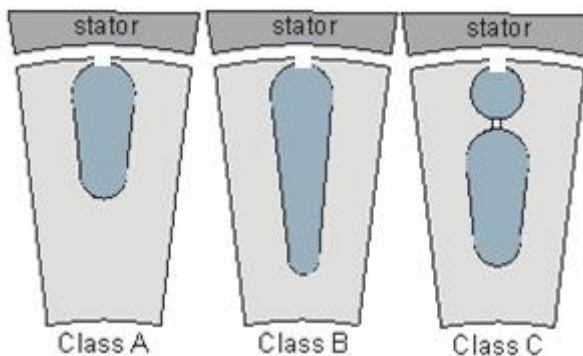


Fig 3 : Formes d'encoche pour différentes classes de moteur

Classe A: Couple et courant de démarrage normaux.

Classe B: Couple normal et courant de démarrage faible. C'est le moteur le plus utilisé de nos jours. L'emploi d'encoches étroites et profondes permet d'avoir une réactance qui, lors du démarrage, est plus forte dans le bas du conducteur, ce qui force le courant à passer par le haut, réduisant la surface active et augmentant la résistance. Comme ci, le courant est limité et on peut démarrer à pleine tension dans beaucoup de cas.

Classe C : Couple fort et faible courant de démarrage. La double cage d'écurueil se construit de la façon suivante : on place un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. Durant le démarrage, il se passe la même chose qu'avec les moteurs classe B. Le courant est donc faible mais le couple est fort. Lorsque le rotor a atteint sa vitesse pleine, la réactance loin du conducteur devient faible et la répartition du courant devient uniforme.

Classe D : Fort glissement (il s'agit d'une encoche semblable à celle de la classe A de la figure mais plus courte). Ce moteur a un enroulement à forte résistance en raison de sa petite section, ce qui lui donne un fort couple et faible courant au démarrage. Le glissement peut atteindre 15 ou 20%

Classe F : Couple faible et courant de démarrage faible (semblable à la classe B mais les conducteurs sont placés plus loin de l'entrefer). Au démarrage le courant est faible, mais le circuit est très inductif et le couple développé est aussi faible.

De ce classement on peut déduire que le choix d'une encoche appropriée nous aide à donner au moteur les caractéristiques souhaitées. Il existe cependant des configurations plus complexes que celles que nous venons de voir.

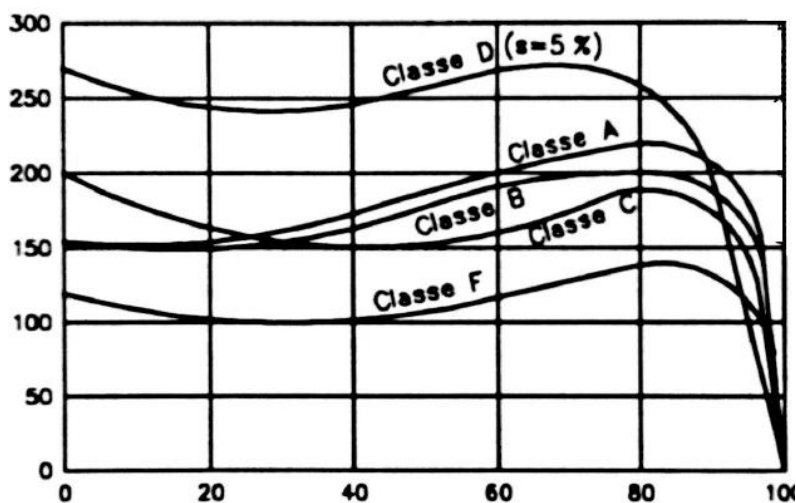


Figure 4 : Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur. Vitesse exprimée en % de celle de synchronisme

4. BOBINAGE

Trois types de bobinage de stator sont habituellement utilisés : l'imbriqué, le concentrique et l'ondulé, chacun d'entre eux présentant ses propres avantages. L'enroulement imbriqué s'utilise pour le bobinage de moteurs d'à partir quelques dizaines de kW. Dans les petits moteurs asynchrones on emploie généralement l'enroulement concentrique, surtout quand le bobinage est mécanisé. L'enroulement ondulé est indiqué pour les moteurs à bagues. Les enroulements imbriqué et ondulé sont le plus souvent à double couche, de manière que chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit forcément être pair.

Pour utiliser le moteur sous plusieurs tensions différentes, on peut répartir les bobines en un certain nombre de groupes qu'on peut relier en série ou en parallèle. Dans ce dernier cas on s'y réfère comme des *chemins en parallèle*.

4.1. Bobinage imbriqué à simple couche

Dans ce type de bobinage, chaque bobine qui forme l'enroulement occupe deux encoches. Alors le nombre d'encoches doit être multiple de deux fois le nombre de phases. Le nombre d'enroulements par phase est égal au nombre de paires de pôles.

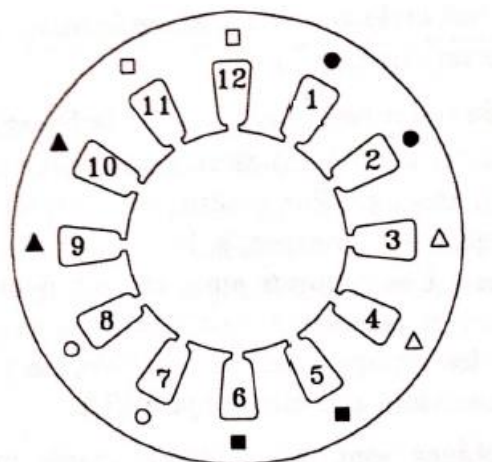


Fig 5 : Moteur triphasé à une paire de pôles, enroulement imbriqué à simple couche.

Une paire de pôles indique qu'il doit y avoir un seul enroulement par phase. Dans le moteur précédent, le nombre d'encoches étant 12, on trouve qu'il doit y avoir quatre encoches par phase donc deux bobines par enroulement. Pour que le pas d'encoche (distance entre deux côtés d'une même bobine) soit « normal » ou « entier », il faut que si le premier côté de la première bobine de la phase A est dans l'encoche 1, le deuxième côté soit dans l'encoche 7. La seconde bobine de cette phase occupera donc les phases 2 et 8, et ainsi de suite.

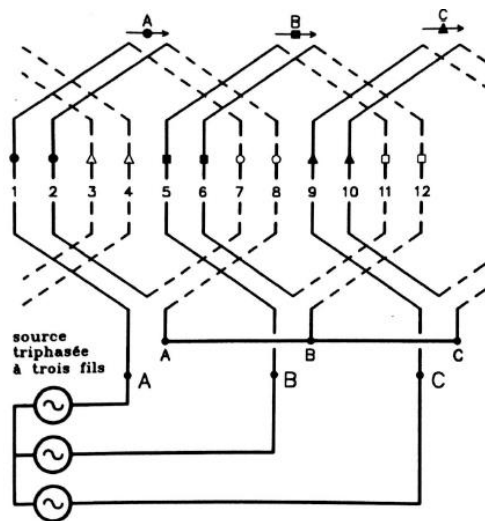


Figure 6 : Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 12 encoches.

Si c'était un moteur avec le même nombre de pôles et phases, mais 24 encoches au lieu de 12, les encoches correspondant à la phase A seraient 1 et 13, 2 et 14, 3 et 15 et 4 et 16, car maintenant on aurait quatre bobines par enroulement soit huit encoches par phase.

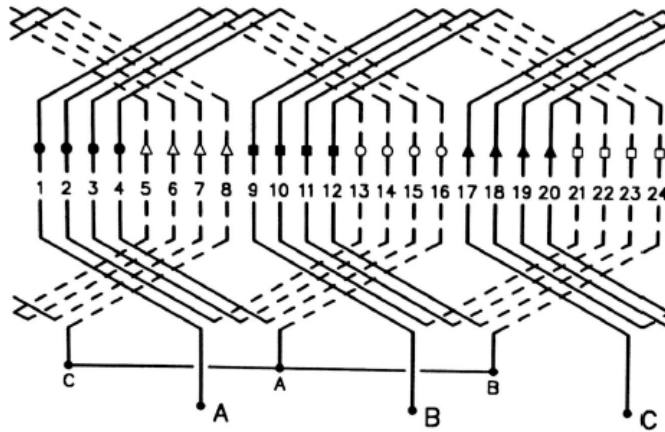


Figure 7 : Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 24 encoches.

Par contre, dans un moteur à quatre pôles, il doit y avoir deux enroulements par phase. Pour le même stator à 24 encoches, on aura donc 8 encoches par phase donc 4 encoches par enroulement (la moitié que pour un moteur à une paire de pôles).

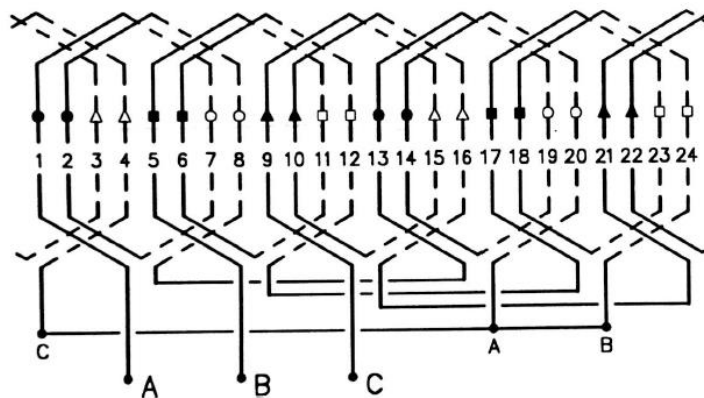


Figure 8 : Diagramme d'enroulement imbriqué à une couche, deux paires de pôles, 24 encoches.

Or, en réalité, chaque bobine qui occupe une paire d'encoches se compose de plusieurs conducteurs ou tours de fil. Ces schémas sont des modèles simplifiés avec un seul tour de fil par bobine. Le nombre de tours de fil est déterminé en fonction de la tension d'alimentation et les Ampères-tours nécessaires pour produire le flux souhaité dans le circuit magnétique. La figure suivante représente deux tours de fil par bobine en plus de la connexion en triangle (les précédentes étant en étoile).

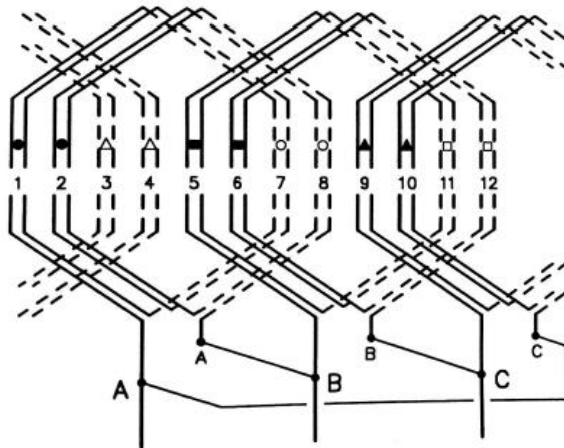


Figure 9 : Équivalent au premier diagramme d'enroulement mais pour deux tours de fil et connexion en triangle.

4.2. Bobinage imbriqué à double couche

L'enroulement imbriqué est le plus utilisé pour les stators des moteurs à moyenne-grande puissance. Le plus souvent un enroulement à double couche est employé, de manière que chaque bobine est composée de la moitié des conducteurs qui passent par une encoche, et les conducteurs sont placés dans l'encoche de manière qu'une bobine occupe la partie supérieure et l'autre la partie inférieure.

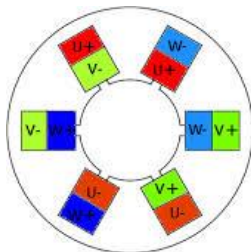


Figure 10 : Schéma simplifié de comment se répartissent les bobinages dans l'encoche

Le pas d'encoche peut alors être modifié : on parle d'un pas raccourci ou fractionnaire, ce qui complique la mise en place du bobinage mais, si le choix est judicieux, atténue les harmoniques de l'onde de flux et améliore le comportement du moteur.

Si on reprend le cas du moteur 2 pôles-12 encoches mais cette fois avec un pas raccourci de 5 encoches au lieu de 6, pour la phase A les deux premières bobines

se placent dans les encoches 1 et 6 et 2 et 7, alors que les deux autres occupent les bobines 2 et 7 et 3 et 8

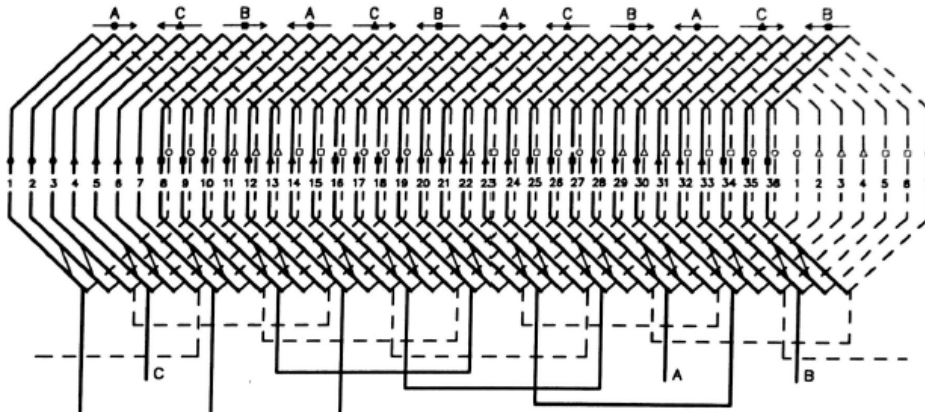


Figure 11 : Enroulement imbriqué double couche. Moteur à 3 phases, 4 pôles, 36 encoches. Pas fractionnaire de $7/9$ (140° électriques). Enroulements à 120° élec.

4.3. Enroulement ondulé

Comme le bobinage imbriqué, il s'agit d'un type d'enroulement habituellement fait à double couche. Dans ce type d'enroulement, les conducteurs qui occupent des places analogues sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Le circuit fait le tour du stator une ou plusieurs fois, sans revenir en arrière, en allant d'un pôle à l'autre. On nomme *tronçon* le circuit formé lorsque toutes les encoches d'une même phase contiennent un conducteur. Comme il s'agit d'un circuit à double couche, il est possible de superposer un deuxième tronçon au premier, mais ceci doit se faire en sens inverse.

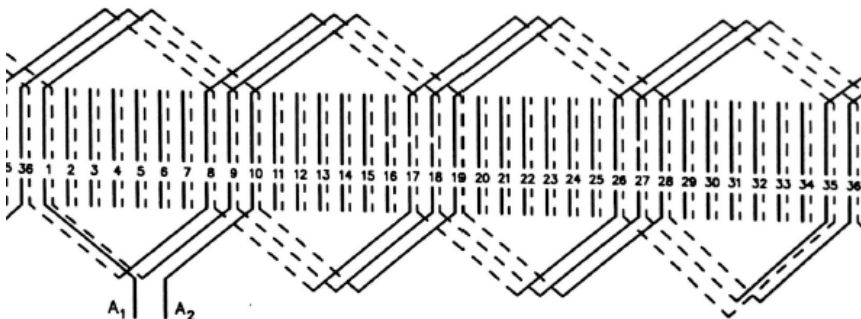


Figure 13 : Enroulement ondulé d'une phase. Moteur à 4 pôles et 36 encoches.

La figure précédente montre les deux tronçons qui forment une phase complète. Les lignes complètes représentent les conducteurs supérieur et les lignes pointillés les conducteurs inférieurs. Le nombre de tronçons est de deux fois le nombre de phases. Dans un tronçon, un conducteur supérieur est connecté à un conducteur inférieur et vice-versa. Entre le commencement et la fin de chaque tronçon il y a un nombre de pas raccourcis égal au nombre d'encoches par pôle par phase moins un.

Pour le bobinage des autres phases, le même principe s'applique avec un décalage de 120° électriques.

4.4. Bobinage concentrique

C'est le type de bobinage à simple couche le plus commun. Comme dans le bobinage à simple couche, chaque bobine occupe et remplit deux encoches. La différence réside dans le fait que, pour une phase, les bobines sont de dimensions différentes et placées les unes autour des autres. Pour un moteur à une paire de pôles et douze encoches, plutôt que 1 et 7 pour la première bobine et 2 et 8 pour la seconde, la première bobine est agrandie et occupe les encoches 1 et 8, alors que la seconde est réduite et occupe les encoches 2 et 7. Aucune des deux n'est à pas normal (6), au contraire que dans le bobinage imbriqué, car l'une est à pas 5 et l'autre à pas 7. Cependant, la moyenne correspond au pas normal. Considérant un moteur à une paire de pôles et 24 encoches, les bobines pour la phase occupent les encoches 1 et 16, 2 et 15. Le même raisonnement s'applique aux autres phases. Ce type d'enroulement est forcément à simple couche.

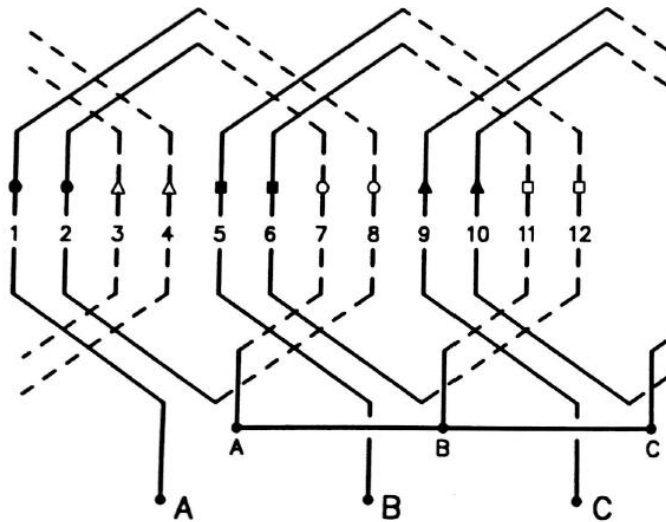


Figure 14 : enroulement concentrique pour un moteur à une paire de pôles, 12 encoches.

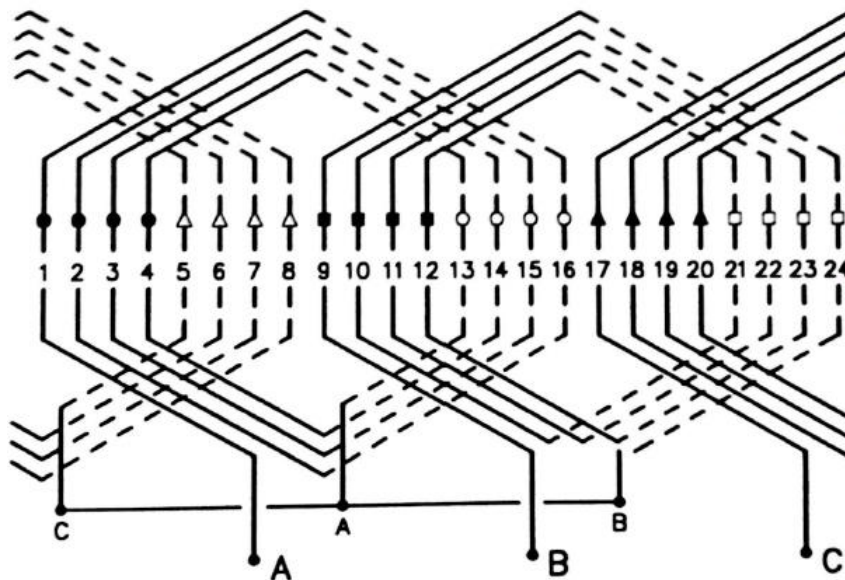


Figure 15 : Enroulement concentrique. Moteur à une paire de pôles et 24 encoches

5. ISOLATION

L'isolation entre conducteurs, bobines et circuit magnétique peut être réalisée avec plusieurs types de matériau. Dans le passé on employait des matériaux tels que le papier ou le coton, imprégnés ou non d'huile. Les développements dans le domaine de la chimie nous permettent d'avoir toute une gamme de produits synthétiques parmi lesquels on choisit en fonction des caractéristiques isolantes et thermiques souhaitées. On peut citer le nylon, l'époxy, le polyester ou le polyvinyle, par exemple. On groupe ces matériaux en classes selon sa

température maximale d'utilisation. Les vernis utilisés pour couvrir les fils ronds doivent rester flexibles. Selon l'épaisseur du vernis on peut avoir des fils isolés simple, double ou triple couche, le double couche étant le plus utilisé.

6. LE STATOR

6.1 Bobinage

Comme on a vu précédemment, on utilise les *chemins en parallèle* pour pouvoir avoir des moteurs qui fonctionnent à plus d'une tension. Par exemple, un moteur pourrait fonctionner à 230 et 460 V si l'on connecte les deux chemins en parallèle ou en série, respectivement.

L'enroulement qu'on utilise la plupart des fois est un enroulement imbriqué à double couche pour les stators des moteurs à moyenne et grande puissance. Mais à cause du coût il est fréquent d'employer un enroulement concentrique pour les petits moteurs.

Si l'on n'a qu'un seul côté de bobine par encoche, il est déconseillé d'avoir un nombre fractionnaire d'encoches par pôle car cela induit des harmoniques importants et le champ résultant est perturbé. Quand il y a plusieurs côtés de bobine par encoche on peut opter pour cette option, qui est même recommandable quand il y a beaucoup de pôles. Cependant il faut respecter le fait que les enroulements des diverses phases soient décalés de $\frac{2\pi}{m} + 2k\pi$ radians électriques, m étant le nombre de phases.

Le nombre de conducteurs en série par phase peut être déduit de cette relation: $N = \frac{0.97E}{2.22f\phi k_d k_p}$, kd et kp étant des facteurs de distribution et de pas des enroulements dont on parlera plus tard. Le flux en mWb par pôle est déduit de la relation $\phi = C1\sqrt{P_u * 60/f} * 10^{-3}$, les plages de C1 variant en fonction du nombre de pôles :

| Pôles | C1 |
|-------|-----------|
| 2 | 2.95-4.30 |

| | |
|----|-----------|
| 4 | 2.25-2.85 |
| 6 | 1.95-2.45 |
| 8 | 1.80-2.20 |
| 10 | 1.70-2.10 |
| 12 | 1.60-2.00 |
| 14 | 1.55-1.90 |
| 16 | 1.50-1.85 |

Le nombre de conducteurs par encoche équivaut à $N_c = \frac{N*q*m}{N_e}$, q étant le nombre de chemins parallèles et Ne le nombre d'encoches au stator.

Jusqu'à récemment, pour des moteurs assez grands, on employait des bobines préformées, ce qui nécessite que l'encoche soit ouverte à parois parallèles. Si c'est possible, on emploie un seul conducteur par couche. Si la section devient trop grande (>65sq mm) on dispose la bobine de façon à ce que les conducteurs de la même couche soient en parallèle. Cependant, il y a des dispositions alternatives.

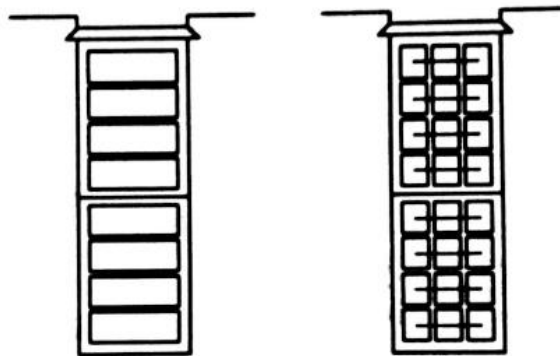


Figure 16 : Encoche ouverte avec un et plusieurs conducteurs par couche

6.2 Nombre et dimensions des encoches

On a déjà traité l'influence de la forme de l'encoche sur la courbe du couple et le courant de démarrage précédemment.

Ce choix est critique pour la conception du moteur. Pour commencer on peut dire que la largeur de l'encoche et de la dent sont très proches et que la profondeur de l'encoche est de l'ordre de 4 à 6 fois sa largeur.

La largeur de la culasse et la longueur des dents sont assez proches pour un moteur à 4 pôles, alors que pour un moteur à 2 pôles la culasse est de l'ordre de 30-50% plus grande. Dans les moteurs à 6-8 pôles la largeur de la culasse est inférieure.

Pour des moteurs à un diamètre extérieur en dessous de 400mm, le pas d'encoche ne devrait pas être inférieur à 10 mm, la plage usuelle étant d'entre 12 et 20mm. Pour les moteurs à un diamètre extérieur d'entre 400 et 1000 mm cette plage va de 20 à 30mm. Pour les moteurs à grande puissance elle va normalement de 25 à 40mm, pouvant arriver jusqu'à 60mm. Le choix des dimensions est influencé par le courant total dans chaque encoche.

Dans les petits moteurs (et de plus en plus dans les moteurs plus grands) on utilise souvent des encoches semi ouvertes trapézoïdales à fond rond ou plat, ce qui permet d'avoir des dents à parois parallèles donc une distribution uniforme du flux dans la dent. Dans ce cas on emploie du fil rond verni double couche normalement. L'ouverture de l'encoche permet d'introduire les fils mais, étant petite, permet d'avoir de meilleures performances que l'encoche ouverte, qui a des effets sur la réluctance de l'entrefer.

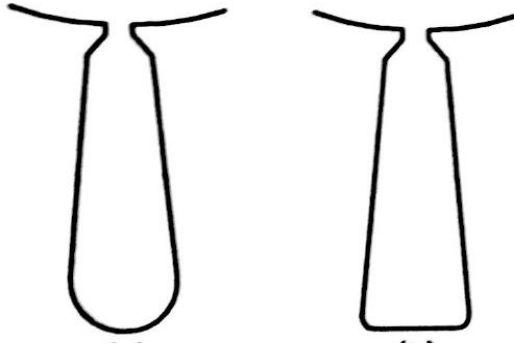


Figure 17 : Encoches trapézoïdales à fond rond et à fond plat

On définit le pas d'encoche au niveau de l'entrefer comme $t_{s1} = \frac{\pi D}{N_e}$.

Les dimensions des encoches dépendent du nombre de conducteurs, leur section et l'épaisseur requise pour l'isolation (normalement une double couche de vernis pour les fils circulaires ou de coton ou papier pour les rectangulaires). L'isolement comprend aussi une gaine qui entoure les bobines, qui peut être faite en mica, toile ou ruban en plus de coton, papier ou vernis. Si id est l'augmentation de la profondeur de l'encoche et iw celle de sa largeur, on retrouve ces valeurs à prévoir selon la tension et le diamètre extérieur du stator :

| TENSION(V) | Diamètre à l'entrefer (mm) | | | | | |
|------------|----------------------------------|-----|----------|-----|-----------|-----|
| | 0-400 | | 400-1000 | | 1000 et + | |
| | Augmentation de l'épaisseur (mm) | | | | | |
| | id | iw | id | iw | id | iw |
| 0-300 | 6.1 | 1.5 | 6.3 | 1.6 | 7.9 | 2.0 |
| 300-600 | 6.3 | 1.9 | 7.4 | 2.1 | 8.6 | 2.4 |
| 600-1500 | - | - | 7.9 | 2.4 | 9.4 | 2.8 |
| 1500-3000 | - | - | 9.1 | 3.0 | 11.6 | 3.8 |

Pour une encoche semi ouverte trapézoïdale à fond rond comme celle de la figure suivante on peut prévoir une ouverture w_{es1} de l'ordre de 2.5mm pour les petits moteurs, valeur qui peut atteindre 4 ou 5 mm dans les grands moteurs. L'épaisseur d_4 de l'isthme des dents varie entre 0.75 et 3mm, alors que d_3 , distance entre l'isthme et la partie utile de l'encoche varie entre 0.75 et 1mm. Dans les grands moteurs ces grandeurs peuvent atteindre des valeurs supérieures. Dans les moteurs à faible puissance, d_3 peut parfois être nul. Le facteur d'espace, k_e , est le rapport entre la section totale des fils isolés et celle de l'espace net disponible. Il ne dépasse 0.85 pour des fils au vernis. Pour la production en série il est entre 0.7 et 0.75

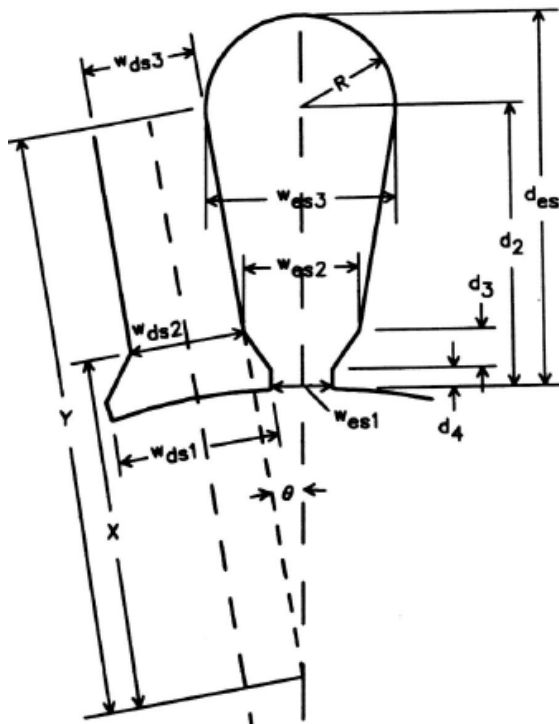


Figure 18: encoche trapezoidale a fond rond, semi ouverte. Dimensions

Pour l'encoche à fond plat on a une section

$$S_{ne} = \left(\frac{w_{es2} + w_{es3}}{2} - i_w \right) * (d_{es} - i_d)$$

Pour l'encoche à fond rond on a

$$S_{ne} = \left(\frac{w_{es2} + w_{es3}}{2} - i_w \right) * \left(d_2 - i_d + \frac{i_w}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(R - \frac{i_w}{2} \right)^2$$

Comme on a déjà dit la largeur du dent et de l'encoche sont deux dimensions sont en général très proches. On utilise cette relation pour une première approche de dimensionnement. En plus on a :

$$S_{ne} = \frac{N_c N_{fil} (\pi * D_{fil}^2) / 4}{k_e}$$

Si l'on pose

$$\theta = 180^\circ / N_e$$

$$X = \frac{w_{es2}}{2 \sin \theta}$$

$$A = X + i_d - d_3 - d_4$$

$$Z = \frac{w_{es2}}{2} - i_w$$

$$B = \frac{A - Z / \sin \theta + \pi i_w / 2}{1 + \frac{\pi}{2} \sin \theta}$$

$$C = \frac{S_{ne} + Z * A - \frac{\pi}{2} \left(\frac{i_w}{2}\right)^2}{\sin \theta * \left(1 + \frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}$$

$$Y = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4 * C}}{2}$$

On obtient

$$R = Y * \sin \theta$$

$$w_{es} = 2 * R$$

$$d_2 = Y - X + d_4 + d_3$$

$$d_{es} = d_2 + R$$

Pour des encoches trapézoïdales à fond plat, les termes contenant π disparaissent et $d_{es} = d_2$. Pour les encoches à fond rond on considère que la longueur effective de la dent est de $d_2 + 2R/3$

6.3 Mise en équation

La tension induite aux bornes de chaque conducteur est déterminée par l'équation $E_C = \frac{\varphi_t * n}{60}$. Une série de facteurs influe sur la tension totale induite au niveau du stator. φ_t est le flux total (en Wb) et n la vitesse de révolution en rpm.

L'équation précédente exprime la tension moyenne induite lorsque le flux du champ tournant est uniforme. Pour la machine asynchrone, on peut exprimer la distribution du flux dans l'entrefer comme une série de Fourier aux termes pairs nuls (puisque le flux est symétrique par rapport à l'axe du pôle). En pratique, on néglige tous les coefficients sauf le premier et on considère un flux sinusoïdal. Pour modifier l'équation on introduit le facteur de distribution, défini comme le rapport entre l'aire sous la courbe de distribution réelle du flux et celle d'un rectangle de la même valeur maximale. Pour une courbe sinusoïdale $f_d = \frac{2}{\pi} \approx 0.637$.

La valeur efficace étant plus utile que la valeur moyenne ou maximale, on introduit aussi un facteur de forme du flux, rapport entre la valeur efficace et la valeur moyenne :

$$f_b = \frac{1}{\sqrt{2}} / \frac{2}{\pi} \approx 1.11$$

On peut aussi tenir en compte le fait que les bobines sous un pôle ne sont pas concentrées dans un seul endroit. Le facteur de distribution de l'enroulement se définit comme le rapport entre la tension induite véritable et celle que l'on aurait si toutes les bobines seraient concentrées en un seul endroit :

$$k_d = \frac{\sin\left(\frac{Ne * \beta}{p * m * 2}\right)}{\frac{Ne}{p * m} * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}$$

Où Ne est le nombre d'encoches du stator, p est le nombre de pôles, m le nombre de phases et $\beta = 180\pi/Ne$ l'angle en degrés électriques entre deux encoches.

On peut aussi tenir en compte le facteur de pas si le bobinage n'est pas à pas entier mais raccourci $k_p = \sin(\nu * \gamma * 180^\circ/2)$, où ν est l'harmonique considéré et γ le rapport de raccourcissement du pas.

L'équation complète de tension effective par phase devient

$$E_i = \frac{\varphi_t * n * N * f_d f_p k_d k_p}{60}$$

où N est le nombre de conducteurs en série par phase. Normalement on connaît la tension et non le flux. Si on tient en compte la chute de tension due à la réactance de fuite. Cette chute étant normalement d'entre 0.02 et 0.04 p.u., on pose $E_i = E - I_m X_1 = 0.97E$. On doit souligner que le courant de magnétisation n'est pas négligeable par rapport au courant en pleine charge, et ce d'autant plus que le moteur est petit. Il peut dépasser 45% du courant à pleine charge pour un moteur de 1kW, alors que pour les grands moteurs il se situe généralement aux environs de 45%. Travaillant avec le flux par pôle plutôt qu'avec le flux total, et sachant que le nombre de pôles $p=120*f/n$ (f étant la fréquence et n la vitesse de rotation maximale), on arrive à

$$\varphi = \frac{0.97E}{2.22 N * f * k_d k_p} = \frac{0.437E}{N * f * k_d k_p}$$

D'autre part, la valeur des ampères conducteurs par millimètre à l'entrefer I_n dépend de la puissance du moteur, de la tension aux bornes des enroulements, du type de ventilation et de la réactance de fuite

admissible. Pour des moteurs type ouvert, avec des tensions inférieures à 2500V et une élévation de température de 40°C, on a un I_n moyen en fonction de la puissance utile tel que :

$$I_n = 47543 \left(\frac{P_u}{n}\right)^3 - 28778 \left(\frac{P_u}{n}\right)^2 + 6515 \frac{P_u}{n} - 14$$

Lors de la conception d'un moteur, la vitesse et la puissance sont toujours spécifiées, ce qui établit une relation directe entre le diamètre intérieur du stator D et sa longueur apparente l_a , selon l'équation :

$$P_u = E_i * f * m * \eta * F_p * 10^{-3} = \varphi_t * \frac{n}{60} N * f_d f_b k_d k_p * f * m * \eta * F_p * 10^{-3}$$

Si on considère que

$$\varphi_t = \pi D l_a B_g 10^{-6} \text{ et } I_n \pi D = I * m * N * k_p$$

On arrive à

$$P_u = D^2 l_a n B_g I_n k_d \eta F_p * 1.16 * 10^{-10} \text{ ou bien } \frac{D^2 l_a n}{P_u} = \frac{8.6 * 10^9}{B_g I_n k_d \eta F_p}$$

Toutefois, il est préférable de travailler avec la longueur physique totale du stator, l, et avec le diamètre extérieur, D_e , qui correspond au diamètre extérieur minimale du bâti. Il existe alors une relation entre le diamètre extérieur et la longueur du stator. On définit le coefficient d'utilisation comme

$$k_u = \frac{D_e^2 * l * n}{P_u}$$

Ce coefficient d'utilisation varie en fonction du nombre de pôles et du type de moteur (fréquence, tension). Il faut normalement se reporter aux diagrammes du constructeur.

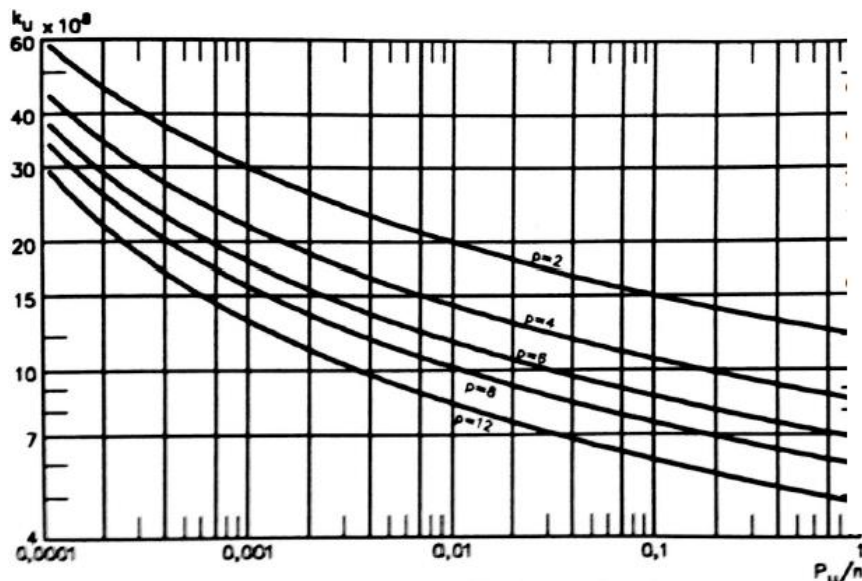


Figure 19: courbes du K_u en fonction du rapport P_u/n pour des moteurs à 60Hz et des tensions inférieures à 600V. Moteurs à cage d'écureuil à 2, 4, 6, 8 et 12 pôles.

Dans un moteur à induction, le courant de magnétisation requis pour maintenir le flux dans le circuit magnétique est fourni par l'alimentation. Le circuit étant très inductif, le courant est en retard de 90 degrés et devrait être aussi petit que possible. L'entrefer possédant une réluctance plus grande que le reste du circuit, il faut choisir une densité du flux faible dans l'entrefer, en général d'entre 0.4 et 0.7 Teslas (selon la puissance du moteur).

Si D est le diamètre d'alésage du stator à l'entrefer et l_a la longueur apparente du paquet de tôles, on a :

$$B_g = \frac{\varphi_t * 10^6}{\pi * D * l_a}$$

Pour le calcul du flux dans l'entrefer on se sert de la longueur apparente, qui correspond à la longueur physique moins les canaux de ventilation, mais tient en compte l'effet de frange dans les canaux de ventilation et à

chaque extrémité du stator. Pour le calcul de la longueur apparente il faut aussi compter avec l'épanouissement du flux aux extrémités du paquet de tôles car, à une certaine distance du paquet de tôles, les lignes de flux prennent forme de demi-cercle et pénètrent de façon orthogonale, induisant des courants de Foucault. Pour les deux extrémités, on considère une longueur fictive égale à celle de l'entrefer (une demi-longueur d'entrefer pour chaque extrémité). Dans les calculs on limite généralement la longueur de l'entrefer à 10mm pour les moteurs à grand entrefer, même si la véritable valeur est plus grande. Ainsi, si rotor et stator comportent le même nombre de canaux de ventilation (N_v) de même largeur (w_v), on a :

$$l_a = l - \frac{N_v w_v^2}{w_v + \frac{5g}{2}} + g$$

Les caractéristiques du moteur dépendent aussi du rapport entre la longueur totale du stator et son pas polaire à l'entrefer $\tau = \pi D/p$. Le rapport l/τ est choisi en fonction du rendement, du facteur de puissance, du coût... Pour un f.p. élevé on cherche un rapport d'entre 1 et 1.25 ; pour un bon rendement, d'environ 1.5 et pour un coût minimale, d'entre 1.5 et 2. En pratique, il peut varier entre 0.6 et 2. Les valeurs usuelles de τ correspondent approximativement à $\tau = 112 \left(\frac{P_u}{p}\right)^{0.24}$. À partir de cette valeur et du nombre de pôles, on peut dimensionner le diamètre intérieur du stator. Le rapport entre diamètre intérieur et extérieur du stator se situe entre certaines plages en fonction du nombre de pôles :

| Nombre de pôles | De/D |
|-----------------|-----------|
| 2 | 1.85-1.95 |
| 4 | 1.45-1.55 |
| 6 | 1.35-1.43 |
| 8 | 1.28-1.35 |

| | |
|----|-----------|
| 10 | 1.23-1.28 |
| 12 | 1.21-1.23 |

Figure 20 : plages usuelles du rapport D_e/D en fonction du nombre de poles

Avec des méthodes empiriques on arrive à une approche pour définir le diamètre minimale du rotor ou diamètre d'alésage du stator : $D_{min} = \left(\frac{D_e}{D} - 1\right) * \frac{\tau * p}{\pi} + 12(P_u * p)^{0.36}$. Cette valeur doit être révisée car elle peut être trop petite, surtout pour les moteurs à grande vitesse et à deux pôles, où il peut avoir une insuffisance d'acier due à la présence de l'axe, dont on doit tenir compte. Un autre facteur qui peut influencer le dimensionnement et la conception des canaux de ventilation est la vitesse périphérique, définie comme $V = \frac{\pi D n}{60} * 10^{-3}$

Le courant de phase dans l'enroulement du stator est de

$$I = \frac{P_u * 10^3}{E * m * \eta * F_p}$$

On détermine alors la section du conducteur dans lequel circule le courant comme

$$a_s = \frac{I}{q * J_s}$$

Les pertes dans le cuivre échauffent le moteur proportionnellement au carré du courant. Il faut choisir une densité de courant telle que l'élévation de la température soit admissible par le type d'isolant utilisé. Normalement on prend une densité de courant d'entre 4 et 5 A/mm². S'il s'agit d'un moteur très bien ventilé on peut arriver jusqu'à 6 ou 7 A/mm².

Pour un flux donné, les dimensions des encoches déterminent la densité du flux dans les dents. Si cette densité est grande, grandes seront aussi les pertes et il faudra un grand nombre d'Ampères-tours pour faire passer

le flux à travers les dents. La valeur maximale de la densité de flux est atteinte avec une section minimale :

$$B_{ds} = \frac{\varphi * 10^6}{f_d w_{dsmin} l_a k_f N_{ep}}$$

φ étant le flux par pôle, et N_{ep} le nombre d'encoches par pôle. B_{ds} signifie densité de flux dans les dents du stator. On peut aussi la calculer dans la culasse du stator:

$$B_{cs} = \frac{\varphi * 10^6}{2d_{cs} l_a k_f}$$

Où d_{cs} est l'épaisseur effective de la culasse du stator. Pour des encoches à fond plat cette épaisseur est égale à la distance radiale de la culasse à l'extérieur de l'encoche. Pour l'encoche à fond rond il faut tenir compte que la longueur effective des dents correspond à $d+2R/3$.

7. LE ROTOR

7.1. Longueur de l'entrefer

Même avec une faible densité de flux et un entrefer étroit, la chute de potentiel magnétique dans l'entrefer est plus forte que dans le reste du circuit magnétique. C'est donc lui qui nécessite la plus grande partie du courant de magnétisation. Celui-ci devant être le plus faible possible pour minimiser les pertes, on cherche un entrefer aussi étroit que les contraintes mécaniques le permettent. Mais un entrefer trop étroit fait augmenter les harmoniques qui peuvent nuire au fonctionnement de la machine pendant le démarrage et l'accélération. Alors la longueur minimale admissible de l'entrefer en millimètres peut être déduite à travers la suivante formule empirique :

$$g = 3.18 - 6600/(D + 2300)$$

Le diamètre du rotor, prenant comme longueur de l'entrefer le double de la valeur minimale, est donc:

$$Dr = D - 2g$$

Pour l'axe on peut accepter cette équation empirique :

$$Daxe = 12 * (P_u * p)^{0.36}$$

7.2. Coefficient de Carter

Le coefficient de Carter est le facteur par lequel on doit multiplier la réluctance de l'entrefer pour tenir compte de la présence des encoches. On peut calculer ce coefficient à travers le champ entre une surface dentée et une surface lisse, avec l'approximation d'une encoche de profondeur infinie.

On peut le calculer séparément pour le rotor et le stator et obtenir un coefficient global en multipliant les deux :

$$k_c = k_{crotor} * k_{cstator}$$

$$k_{ci} = \frac{t}{(t - w_e) + \frac{w_e^2}{1 + \frac{w_e}{5g}}} = \frac{t}{t - \frac{w_e^2}{5g + w_e}}$$

Dans cette équation, t est le pas d'encoche, we la largeur de l'encoche au niveau de l'entrefer et g la longueur de l'entrefer. Elle est déduite du fait qu'on peut remplacer l'encoche par un entrefer supplémentaire de sa même largeur et d'une épaisseur égale au cinquième de sa largeur. Pour certains calculs on emploie un entrefer fictif ou apparent : $g' = kc * g$

7.3. Enroulements du rotor

Dans un moteur à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau terminal.

Quand les barres sont en cuivre ou laiton, on les introduit directement dans les encoches et on les soude aux anneaux du même matériau (normalement). Le contact entre barres et anneaux doit être le meilleur possible. Par contre quand les barres sont en aluminium, qui a un point de fusion beaucoup plus bas, on les coule directement sur place. Avec un vide partiel on évite la présence de bulles qui diminuerait la section des barres créant des points chauds.

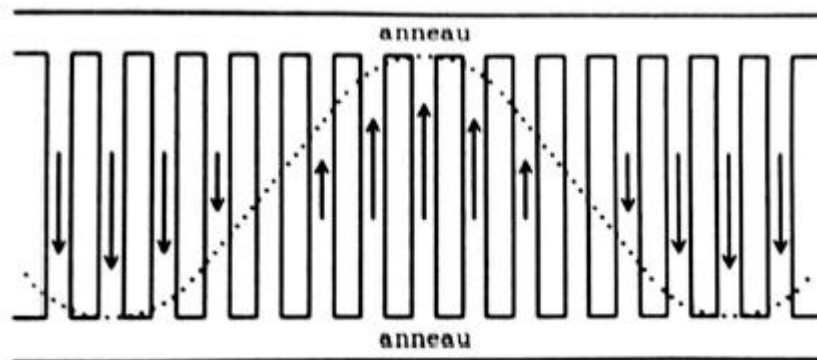


Figure 21 : courant dans les barres du rotor.

7.4. Nombre et forme de l'encoche

Les encoches d'une cage d'écurueil, au moins pour les classes A, B, C et D, sont semi-ouvertes avec une ouverture d'entre 1.5 et 3mm. Quand les barres sont en cuivre, elles prennent une forme arrondie ou rectangulaire et plutôt allongée. Pour les barres en aluminium coulé on peut avoir pratiquement n'importe quelle forme, puisqu'elles s'adaptent à l'encoche en l'emplissant totalement. Les encoches servent en fait comme moule pour la coulée. Pour les barres en cuivre on laisse un jeu d'entre 0.15 et 0.4mm autour du conducteur pour les insérer.

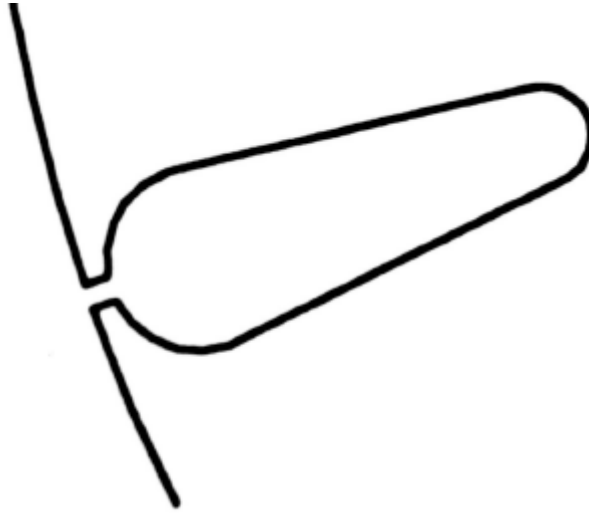


Figure 22 : forme de l'encoche prise pour nos calculs. Trapézoïdale et deux fois arrondie.

Le bon choix du nombre d'encoches du rotor évite la présence de vibrations, de bruit magnétique et de plages de synchronisme (un genre d'escalier sur la partie basse vitesse de la courbe de couple).

Le nombre d'encoches du rotor ne doit jamais être égal à celui du stator. Il peut être plus grand mais est généralement plus petit dans les rotors à cage d'écureuil. On obtient de bons résultats pour un écart d'entre 15 et 30%.

Pour éviter les vibrations on devrait choisir N_{er} de sorte que $N_{es}-N_{er}$ soit différent de $\pm 1, \pm 2, \pm(p \pm 1)$ et $\pm(p \pm 2)$.

Pour éviter de produire un couple saccadé (dû à la variation du couple de démarrage pour les différentes positions du rotor) on devrait choisir $N_{es}-N_{er}$ différent de tout multiple de $\pm 3p$.

Les pointes de synchronisme sont éliminées pour $N_{es}-N_{er}$ différent de $\pm p, -2p$ et $-5p$. Dans le tableau suivant on retrouve les paires

d'encoches rotor-stator qui remplissent ces conditions pour moteurs à 2, 4, 6 et 8 pôles

| Nes | Ner | | | |
|------------|------------------------|----------|----------|----------|
| | Nombre de pôles | | | |
| | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 18 | 12 | | | |
| | 24 | | | |
| 24 | 18 | 18 | | |
| | 30 | 30 | | |
| 30 | 18 | | | |
| | 24 | | | |
| | 36 | | | |
| 36 | 24 | 24 | 20 | |
| | 30 | 28 | 22 | |
| | 42 | 30 | 26 | |
| | | 42 | 46 | |
| | | 44 | 50 | |
| 42 | 24 | | | |
| | 30 | | | |
| | 36 | | | |
| | 48 | | | |
| 48 | 30 | 30 | | 26 |
| | 36 | 36 | | 30 |
| | 60 | 40 | | 34 |
| | | 60 | | 36 |
| | | | | 38 |
| | | | | 60 |
| 54 | 30 | | 34 | |
| | 36 | | 36 | |
| | 48 | | 38 | |
| | 60 | | 40 | |
| | 66 | | 44 | |
| | | | 64 | |
| 60 | 36 | 36 | | |
| | 48 | 42 | | |

| | | | | |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | 72 | 48 | | |
| | | 72 | | |
| 72 | 48 | 48 | 50 | 50 |
| | 54 | 54 | 54 | 54 |
| | 60 | 60 | 58 | 58 |
| | 66 | 90 | 62 | 60 |
| | 90 | | 82 | 84 |
| | | | 86 | 86 |
| | | | 88 | 90 |
| | | | 90 | |
| 84 | | 60 | | |
| | | 66 | | |
| | | 72 | | |
| | | 96 | | |
| | | 102 | | |
| 90 | | | 64 | |
| | | | 68 | |
| | | | 70 | |
| | | | 72 | |
| | | | 74 | |
| | | | 94 | |
| | | | 98 | |
| | | | 100 | |
| | | | 104 | |
| 96 | | 70 | | 66 |
| | | 78 | | 70 |
| | | 114 | | 74 |
| | | 118 | | 78 |
| | | | | 82 |
| | | | | 114 |
| | | | | 118 |
| | | | | 120 |

On élimine davantage les effets indésirables si les conducteurs sont placés de façon oblique par rapport à l'axe, normalement avec un biais égale au plus petit des pas dentaires (soit celui du stator ou celui du rotor)

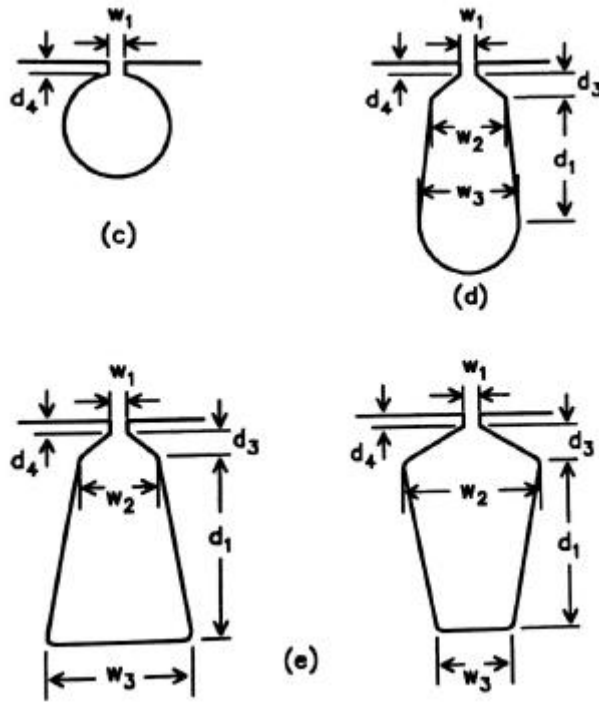


Figure 23 : Encoches de type semi-ouvert ronde, semi-ouvert trapézoïdale à fond rond et semi-ouvert trapézoïdale à fond plat

Pour une encoche trapézoïdale dont les extrémités sont toutes les deux arrondies avec les dents de largeur uniforme, le calcul type nous donne ces relations :

$$t_{r1} = \frac{\pi D_r}{N_{er}}$$

$$A_b = A_r = A_s * (A_r / A_s \text{ en } \%) / 100$$

$$w_{er2} = \left(\frac{\pi(D_r - 2d_4)}{N_{er}} \right) - w_{dr2}$$

$$\theta = 180^\circ / N_{er}$$

$$w_{er3} = \sqrt{\frac{\frac{A_b * 8 * tg\theta}{N_{er}} - (\pi tg\theta + 2)w_{er2}^2}{\pi tg\theta - 2}}$$

$$d_{er} = \frac{w_{er2} - w_{er3}}{2tg\theta} + \frac{w_{er2} + w_{er3}}{2} + d_4$$

Dans ces relations tr_1 est le pas d'encoche du rotor à l'entrefer, D_r le diamètre extérieur du rotor, N_r le nombre d'encoches rotoriques, A_b la section totale de les barres, w_{er2} la largeur de l'encoche du rotor près de l'ouverture, w_{er3} la largeur du fond de l'encoche du rotor, θ l'inclinaison des encoches en radians et d_4 l'épaisseur de l'isthme des dents. En général, il s'agit des mêmes calculs que pour l'encoche du stator, en prenant pour la partie nouvellement arrondie l'approximation $d_3=2R/3$

7.5. Mise en équation

Le courant qui traverse chaque barre se divise en deux dans les anneaux : la moitié revient par le conducteur situé à un pas polaire en avant et l'autre moitié revient par le conducteur situé à un pas polaire en arrière. Le courant maximale dans les anneaux correspond, quand toutes les barres sont parcourues par le courant maximale, à

$$I_{Amax} = \frac{I_{max}N_b}{2*p}$$

Cependant, il n'est pas maximal dans toutes les barres en même temps : il varie de manière sinusoïdale. Alors

$$I_{Amax} = \frac{I_{max}N_b}{2 * p} * \frac{2}{\pi}$$

Et sa valeur efficace (I_b est la valeur efficace du courant dans les barres)

$$I_A = \frac{I_{max}N_b}{2 * p} * \frac{2}{\pi} * \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{I_B N_b}{\pi * p}$$

La section de chaque anneau (A_a) et la section totale des barres (A_b) sont :

$$A_a = \frac{I_a}{J_a} = \frac{I_b N_b}{\pi * p * J_a} \text{ et } A_b = \frac{I_b N_b}{J_b}$$

Enfin, on obtient la section de chaque barre du rotor comme $a_b = A_b/N_b$

La ventilation est généralement meilleure pour les anneaux que pour les barres, surtout quand ils sont placés à une distance de l'acier.

La valeur maximale de la densité de flux dans les dents du stator est la suivante :

$$B_{dr} = \frac{\varphi_t 10^6}{w_{drmin} l_a k_f N_{er}}, w_{drmin} = \frac{\pi(D_r - 2d_{er})}{N_{er}} - w_{er}$$

w_{drmin} est donc la largeur minimale de la dent du rotor. Il est plus utile d'employer une valeur représentative de B_{dr} au lieu de la valeur maximale. C'est la forme de l'encoche qui détermine si cette valeur représentative se trouve plus proche du maximum ou du minimum. La densité de flux dans la culasse du rotor est dans la même plage que celle du stator. L'épaisseur théorique de la culasse, même si l'épaisseur véritable correspond à la distance entre le fond des encoches et l'axe, est de

$$d_{cr} = \frac{\varphi * 10^6}{2 * B_{cr} l_a k_f}$$

8. CIRCUIT ÉQUIVALENT

Quelques calculs sur la force magnétisante, les pertes à vide (dans le fer, mécaniques, d'effet Joule), la résistance du rotor, la réactance de fuite et la dispersion (d'encoche, de boucle, de tête de bobine et due à la disposition en biais) nous mènent à un circuit équivalent grâce auquel on détermine les caractéristiques du moteur. Pour le moteur à double cage d'écureuil, on réalise les calculs pour chaque cage.

Les calculs qui nous mènent à ce modèle étant complexes et ne faisant pas partie des objectifs de ce projet, on prendra ces modèles comme valides. Les équations menant à la détermination des paramètres forment partie du code du programme développé, cependant :

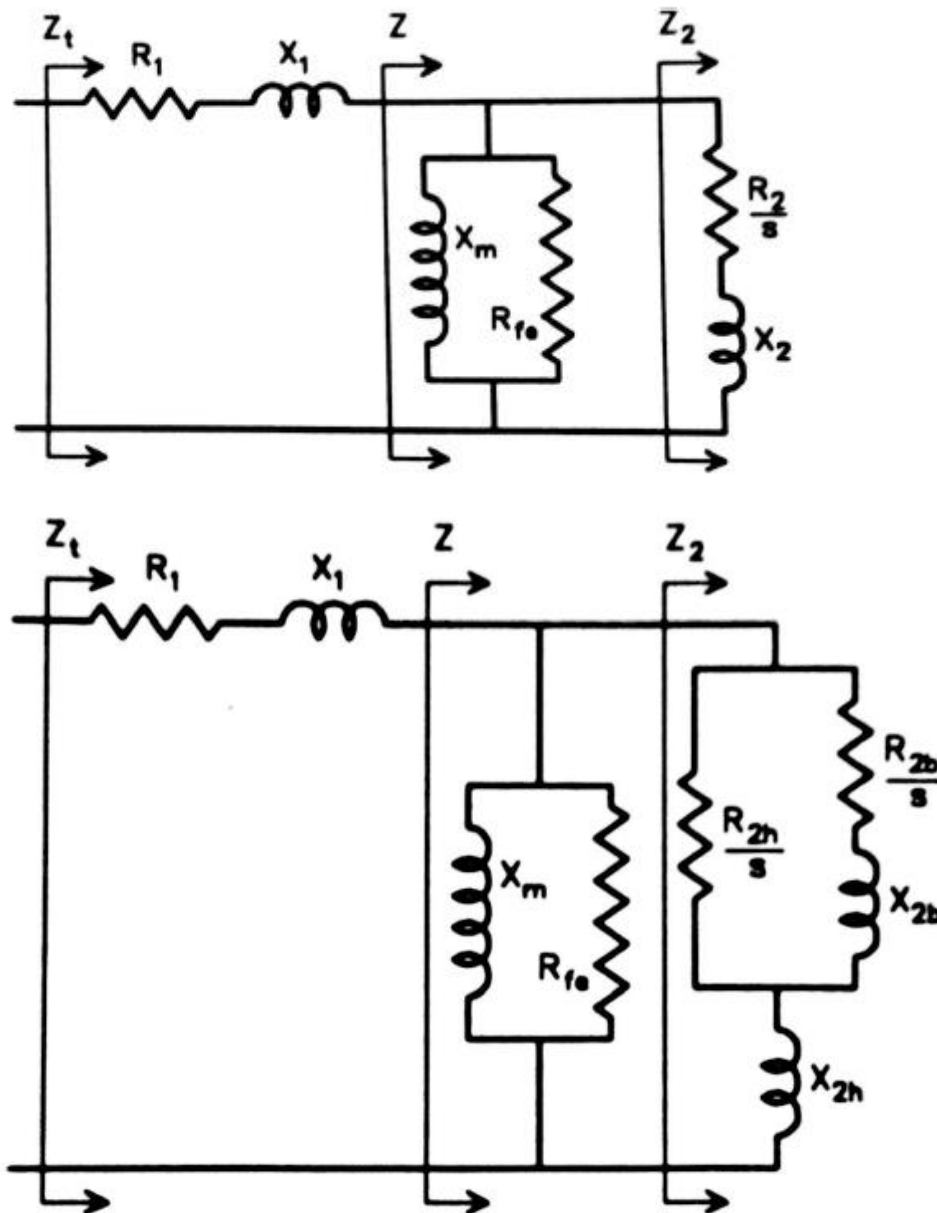


Figure 24 : circuit équivalent pour un moteur à simple et double cage d'écoreuil

8.1. Caractéristiques en marche normale

Pour une cage simple on a

$$Z_2 = \frac{R_s}{s} + jX_2$$

Pour une cage double on a $Z_2 = jX_{2h} + (R_{2h}/s) // (\frac{R_{2b}}{s} + jX_{2b})$

Pour les deux

$$Z_t = R_1 + jX_1 + (R_{fe} // X_m // Z_2)$$

$$I_1 = E/Z_t \text{ courant de ligne}$$

$$I_2 = \frac{E - I_1(R_1 + jX_1)}{Z_2} \text{ courant rotorique reporté au stator}$$

$$F_p = R_t/Z_t \text{ facteur de puissance}$$

$$P_{cu1} = mR_1 I_1^2 \text{ pertes dans le cuivre du stator}$$

$$P_g = mR_s I_2^2 / s \text{ puissance à travers l'entrefer}$$

$$P_u = (P_g - P_{cu2} - P_{rot})10^{-3} = ((1 - s)P_g - P_{rot})10^{-3} \text{ puissance disponible en sortie}$$

$$\eta = \text{puissance sortie} / \text{puissance entrée}$$

$$n = (1 - s)n_s \text{ vitesse en rpm}$$

$$C = \frac{9.55 P_u 10^{-3}}{n} \text{ Couple en N.m en marche normale}$$

$$s_m = R_2 / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2} \text{ glissement au couple max}$$

Par contre pour déterminer le glissement et le comportement à charge nominale on procède par méthode itérative.

8.2. Caractéristiques au démarrage

Au démarrage, le courant est beaucoup plus grand qu'en charge nominale, donc le circuit magnétique est saturé. Le courant dans la périphérie des barres augmente, ce qui entraîne une augmentation apparente de la résistance. Pour ce but on ajoute un facteur R_c au calcul de R_2 obtenant R_{2dem} . Comme on avait dit le calcul de ces paramètres, même si présent dans notre code, ne fait partie de l'objectif de ce projet. On peut ainsi poser :

$$Z_{dem} = \sqrt{(R_1 + R_{2dem}) + \left(\frac{X_1 + X_2}{k_h}\right)^2},$$

où k_h est un facteur de correction qui se situe entre 1.2 et 1.8, introduit parce que la réactance de fuites diminue au démarrage. Alors le courant à rotor calé est de:

$$I_{rc} = E / Z_{dem}$$

Finalement le couple au démarrage est :

$$C_{dem} = \frac{9.55 P_{cu}}{n_s} = \frac{3 R_{2dem} I_{rc}^2}{2\pi n_s / 60} = \frac{3 E^2 R_{2dem}}{Z_{dem}^2 2\pi n_s / 60}$$

9. CALCUL DES PARAMÈTRES – CRÉATION D'UN PROGRAMME SUR MATLAB

The screenshot shows a MATLAB GUI with the following sections:

- Données:** A table of input parameters:

| | |
|-----------------------------|------|
| Puissance Nominale (kVA) | 5 |
| Couple Nominal (Nm) | 30 |
| Tension (V) | 230 |
| Frequence (Hz) | 50 |
| Vitesse Nominale (r/min) | 1470 |
| Vitesse Synchrone (r/min) | 1500 |
| Facteur de Puissance | 0.9 |
| Nombre de Poles au Stator | 4 |
| Nombre de Fils en Parallèle | 2 |

 Below the table are buttons for 'Calcul', 'Reset', and 'Tableau'.
- Encoche Stator:** A list of parameters: des, d2, d3, d4, wes1, wes2, wes3, R, wds1, wds2, wds3, X, Y, Theta(*). A 'Figure de l'encoche' button is at the bottom.
- Encoche Rotor:** A list of parameters: der, d3, d4, wer1, wer2, wer3, R, Theta(*). A 'Figure de l'encoche' button is at the bottom.
- Caractéristiques:** Three sub-sections:
 - En Charge:** Glissement, Vitesse à Pleine Charge, Couple à Pleine Charge.
 - Couple Maximal:** Couple, Vitesse.
 - Au Démarrage:** Courant Rotorique Reporté au Stator, Couple Démarrage.
- Stator:** Diamètre intérieur, Diamètre extérieur, Longueur totale du stator, Nombre d'encoches, Pas d'encoche à l'entrefer, Nombre de conducteurs par encoche, Densité de flux dans l'entrefer, Densité de flux dans les dents, Densité de flux dans la culasse, Courant par phase.
- Rotor:** Diamètre du rotor, Pas d'encoche à l'entrefer, Densité de flux dans les dents, Densité de flux dans la culasse, Longueur de l'entrefer, Nombre d'encoches.
- Circuit Equivalent:** R1, X1, Xm, Rfe, R2, X2, Calculés à 25° C. A 'Figure du Circuit Equivalent' button is at the bottom.

On a créé un code sur Matlab qui permet d'obtenir tous les paramètres du moteur à partir des équations et formules précédentes.

Dans le champ « Données » on introduit les spécifications du moteur; le reste de champs servent à afficher les paramètres calculés. Le bouton « Calcul » permet au programme de commencer les calculs des paramètres de dimensionnement du moteur, le bouton « Reset » permet d'initialiser les spécifications standards qui ont été demandées. Alors, le programme permet dimensionner un moteur asynchrone à cage avec des spécifications différentes de ceux définis comme standard.

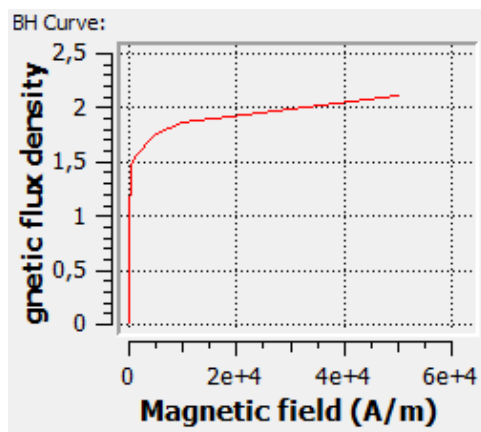
Ce programme est assez puissant pour le dimensionnement du moteur et le calcul des dimensions des encoches, mais il reste à optimiser le calcul du couple maximal et au démarrage car les valeurs obtenues ne nous semblent pas les bonnes.

10. MODÉLISATION ET SIMULATIONS SUR JMAG EXPRESS

JMAG-Express est un logiciel qui nous permet de modéliser des machines électriques (synchrones aussi) de manière rapide, en lui donnant seulement la forme d'encoche voulue et le cahier des charges (puissances, tension, vitesse de synchronisme, fréquence, couple et courant maximal souhaités...). Il fait tout seul la modélisation et permet de faire des simulations en traçant les courbes du couple, l'efficacité, la puissance mécanique, les pertes dans le cuivre, les pertes dans le fer, le courant primaire, le facteur de puissance et le courant magnétisant en fonction de la vitesse. Il calcule également les paramètres du circuit équivalent et les masses des différentes parties de la machine.

Bien qu'il fasse la modélisation et certains choix tout seul, ce qui est assez pratique, l'utilisateur peut les modifier comme il veut. Toutes les dimensions sont modifiables si cette modification n'entre pas en conflit avec une autre dimension.

Il permet aussi de choisir les matériaux, même si le choix n'est pas très vaste, donnant la courbe B/H. Pour les feuilles d'acier employées pour le stator et le rotor :



Pour le moteur à cage d'écurie il nous permet de choisir entre cuivre et aluminium, dont il connaît la conductivité et la densité. Il existe la possibilité d'ajouter des matériaux nouveaux, mais les deux plus courants sont déjà définis.

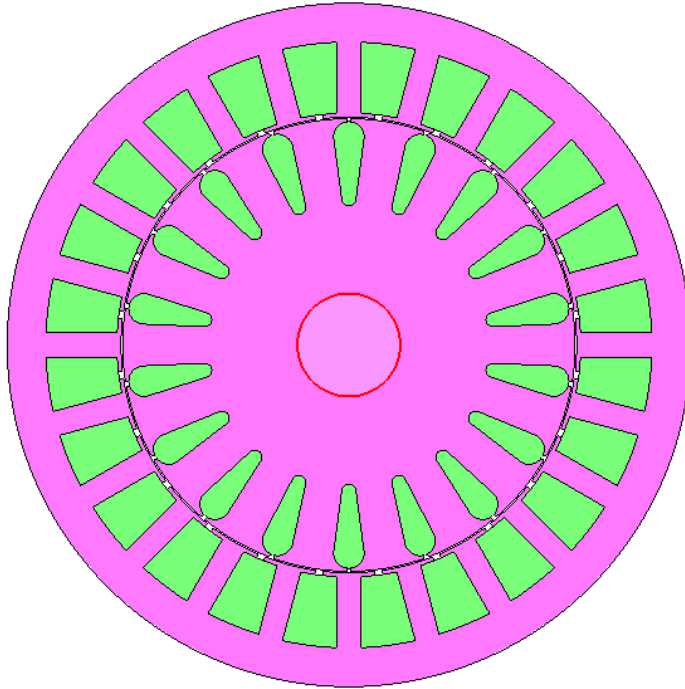
Les valeurs que le programme demande pour sa tâche sont la puissance mécanique souhaitée, la tension à appliquer, la vitesse de synchronisme, la longueur maximale du moteur, le diamètre extérieur maximale, le couple maximale et le courant maximale. Il est toujours possible de laisser certains de ces paramètres vides et le programme travaille sans ces limitations. Dans notre cas, n'ayant pas de limitation de courant ni de couple dans le cahier des charges, on décide de laisser vides ces paramètres, en plus de les limitations des dimensions.

En ce qui concerne les enroulements, choisit un type automatiquement. On peut choisir aussi un enroulement concentrique automatique. Cependant, on peut créer ses propres configurations d'enroulement pour créer, par exemple, un enroulement de type imbriqué. Il est aussi possible de faire des configurations à double couche.

Dans une première instance, on va comparer les résultats des simulations quand on crée son propre moteur avec les paramètres prédéterminés avec notre programme *Matlab* contre les simulations effectuées avec le modèle suggéré par JMAG-Express. Après, on verra de quelle manière les modifications dans la forme/dimensions des encoches, les matériaux et le type d'enroulement du moteur font varier les résultats. La limitation la plus importante de JMAG, on a trouvé, est qu'il ne permet pas de calculer le point nominal.

10.1. Modélisation de notre moteur avec JMAG

Le moteur créé avec les résultats pour notre cahier des charges sur JMAG est celui-ci



L'encoche trapézoïdale à fond rond étant indisponible pour le stator, on a fait l'approximation de la longueur effective de $2R/3$ pour l'utilisation d'une encoche semi ouverte à fond plat. Pour l'encoche du rotor, on a bien une encoche trapézoïdale à fond rond mais doublement arrondie, un peu différente de celle qu'on avait calculée. On l'a dimensionnée de manière à ce que la surface soit à peu près la même. Le reste de paramètres (dimensions, nombre d'encoches, longueur...) sont les mêmes.

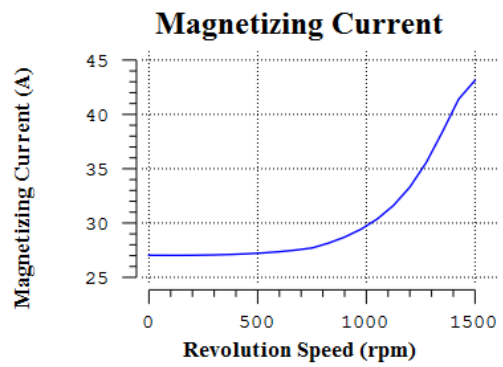
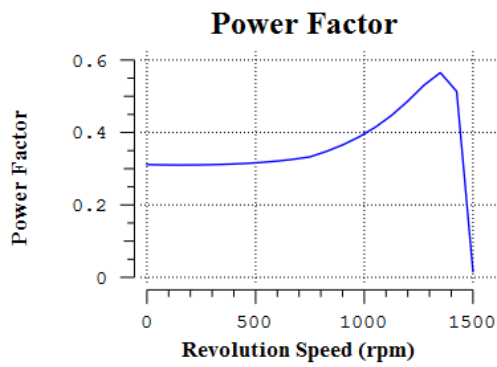
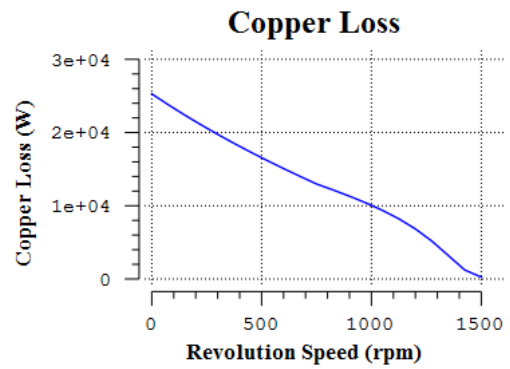
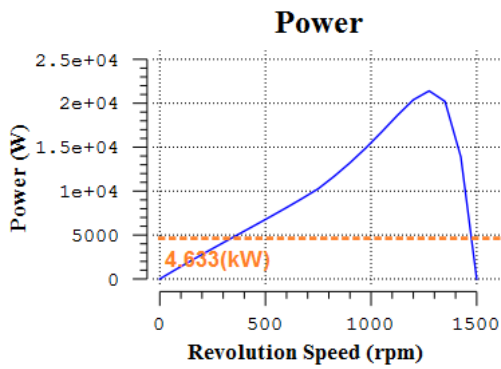
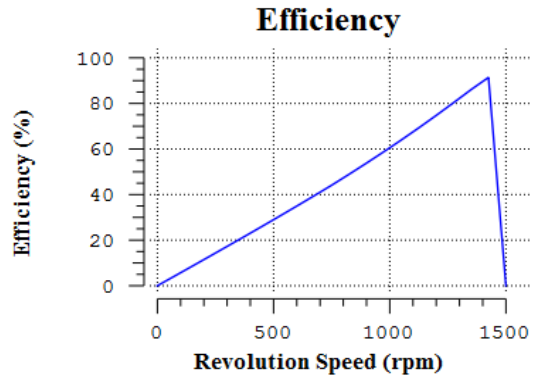
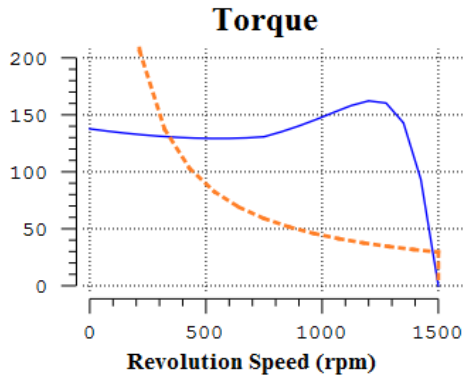
Les résultats des calculs que JMAG fait sont les suivants :

| Machine Constant | | |
|---|---|----------|
| Equivalent Circuit Parameters | Primary leakage reactance (ohm) | 0.483 |
| | Secondary leakage reactance (ohm) | 0.483 |
| | Primary resistance (ohm) | 0.0438 |
| | Secondary resistance (ohm) | 0.348 |
| | Iron loss equivalent conductance (S) | 0.00171 |
| | Excitation susceptance (S) | 0.315 |
| | Exciting Inductance (H) | 0.0101 |
| Starting Characteristics | Starting Impedance (real part) (ohm) | 0.304 |
| | Starting Impedance(imaginary part) (ohm) | 0.927 |
| | Starting Current (A) | 167 |
| | Starting Torque (Nm) | 138 |
| Electric Part | Effective Current (A) | 167 |
| | Wire Current Density (A/m ²) | 2.98e+07 |
| | Revolution Speed at Effective Current (rpm) | 0.0015 |
| Winding | | |
| Connection Type | Star Connection | |
| Series Number | 4 | |
| Parallel Number | 1 | |
| Number of Turns | 43 | |
| Setting Type | Phase Resistance | |
| Winding | Auto Winding | |
| Number of Layers | 1 | |
| Coil Pitch | 3 | |
| Coil Current Density(@1A) (A/m ²) | 1.79e+05 | |
| Drive | | |
| Amplitude (V) | 230 | |

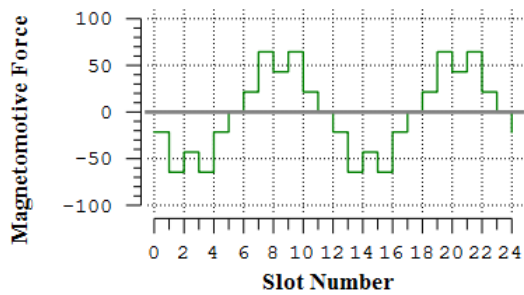
| | | |
|-------------------------------|--|---------------|
| Frequency (Hz) | | <u>50</u> |
| Dimension | | |
| All | Outer Diameter (mm) | <u>222</u> |
| | Gap Length (mm) | <u>0.485</u> |
| | Thickness | <u>108.85</u> |
| | Number of Poles | <u>4</u> |
| stator : so_000 | Number of Slots | <u>24</u> |
| | Outside Diameter (mm) | <u>221.6</u> |
| | Outside Diameter of Coil (mm) | <u>196.45</u> |
| | Inside Diameter of Coil (mm) | <u>150.42</u> |
| | Inside Diameter (mm) | <u>147.72</u> |
| | Tooth Width (mm) | <u>8</u> |
| | Slot Opening Width (mm) | <u>2.5</u> |
| im_rotor : rim_002 | Number of Secondary Conductor | <u>18</u> |
| | Outside Diameter (mm) | <u>146.75</u> |
| | Shaft Diameter (mm) | <u>33.36</u> |
| | Bar Outer Side Radius (mm) | <u>4.94</u> |
| | Bar Inner Side Radius (mm) | <u>2.29</u> |
| | Bar Outer Center Depth (mm) | <u>5.94</u> |
| | Distance between Bar Edge Centers (mm) | <u>20</u> |
| | Slot Opening Width (mm) | <u>1.5</u> |
| | Teeth Top R (mm) | <u>0</u> |
| cage : cage | End Ring Height | <u>3.302</u> |
| | End Ring Lower Edge Width | <u>9.906</u> |
| | End Ring Upper Edge Width | <u>9.906</u> |

| Mass Property | | |
|-----------------------------------|--|---------------------|
| Total | Total Weight | 46.7 |
| | Total Volume | 0.00584 |
| Stator | Coil - Mass (kg) | 23.8 |
| | Coil - Volume (m ³) | 0.00266 |
| | Stator Core - Mass (kg) | 11.3 |
| | Stator Core - Volume (m ³) | 0.00144 |
| | Part Weight(so_000) | 35.1 |
| Rotor | Cage - Mass (kg) | 1.02 |
| | Cage - Volume (m ³) | 0.000377 |
| | Rotor Core - Mass (kg) | 10.6 |
| | Rotor Core - Volume (m ³) | 0.00137 |
| | Part Weight(rim_002) | 11.6 |
| Inertia (kg m²) | Cage | 0.00376 |
| | Rotor Core | 0.0274 |
| | Total | 0.0312 |
| Materials | | |
| Coil | Category | Copper |
| | Density | 8960 |
| Stator Core | Category | JSOL - Steel_Sheets |
| | Type | <u>50A1000</u> |
| | Density | 7850 |
| Cage | Category | Aluminium |
| | Conductivity | 4e+07 |
| | Density | 2699 |
| Rotor Core | Category | JSOL - Steel_Sheets |

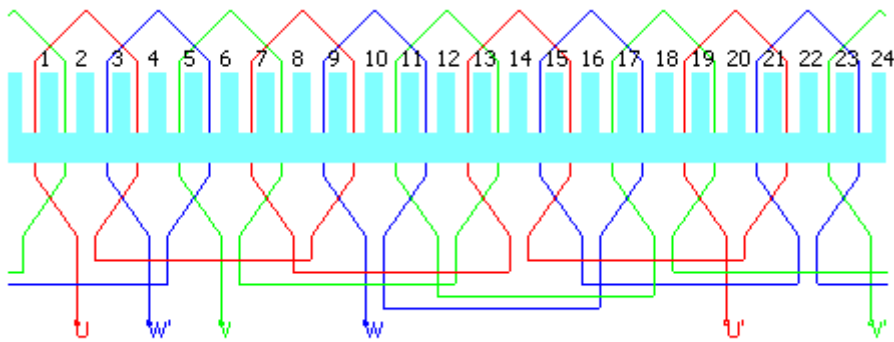
| | |
|---------|--------|
| Type | 50A600 |
| Density | 7750 |



Magnetomotive Force

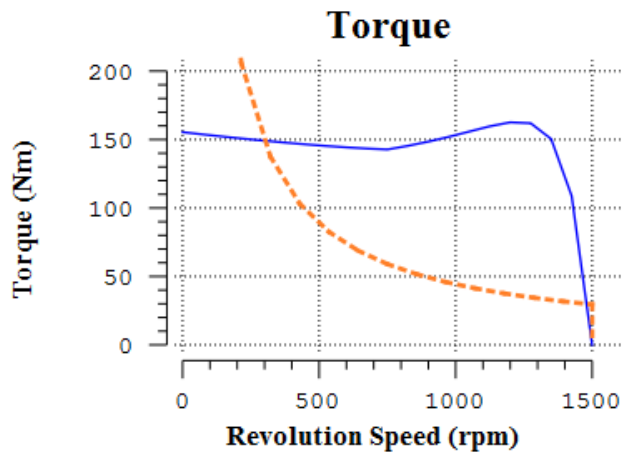


Ceci est obtenu pour l'enroulement automatique utilisé par JMAG :

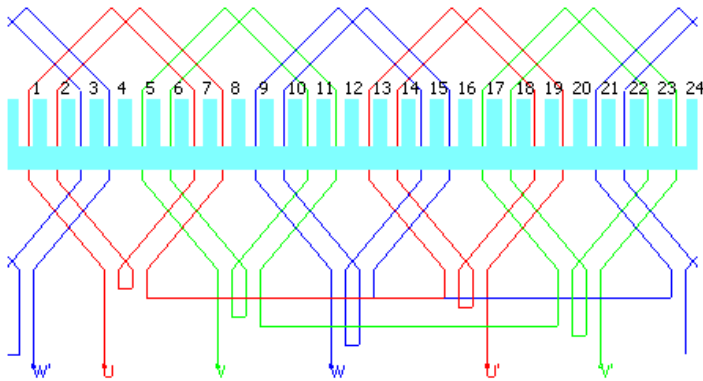


Le point faible de JMAG est qu'il ne calcule pas le point nominal. Cependant on peut remarquer que le couple à la vitesse nominale de 1475rpm est d'environ 30Nm, le couple nominal souhaité.

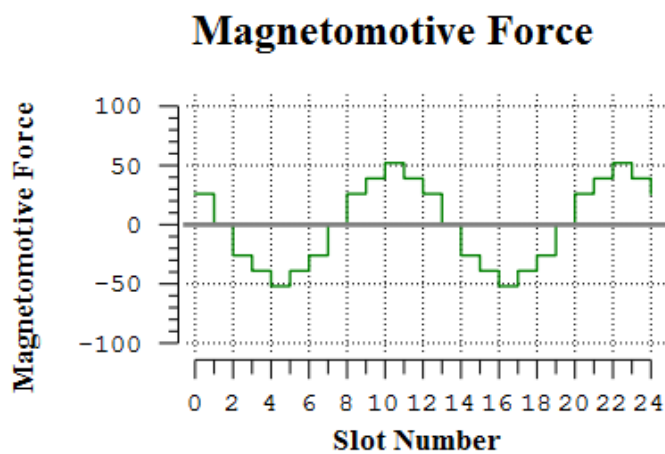
On peut de même modifier le type d'enroulement, introduisant manuellement un bobinage imbriqué à double couche. Pour le nombre de tours obtenu en Matlab (26), 2 strands, un facteur de remplissage d'environ 75% et un facteur de correction de 1.8 on obtient cette forme du couple, avec un couple de démarrage un peu supérieur mais une forme semblable :



Pour la définition de l'enroulement on se sert de la figure 8 :

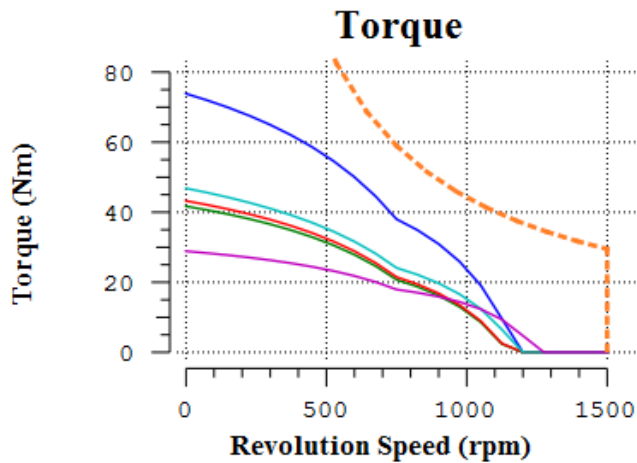


Par exemple, pour la phase U, on introduit manuellement 1-7, 2-8, 13-18, 14-19. Ce nouvel enroulement fait varier la forme de la force magnétomotrice :



10.2. Étude du modèle suggéré par JMAG

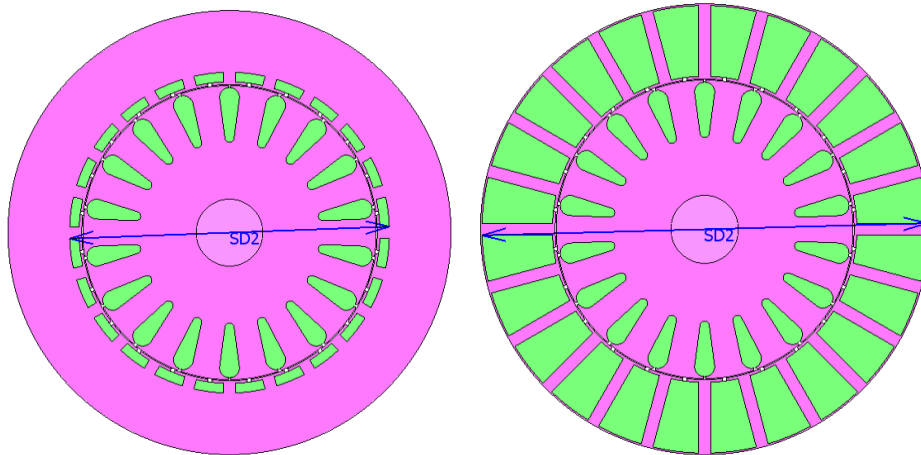
Le modèle suggéré par JMAG est, selon notre jugement, incomplet. Pour notre cahier des charges on obtient des courbes telles que celle-ci :



Ceci est dû à la petite taille du moteur suggéré et au faible nombre d'encoches, qui rendent le circuit magnétique trop petit et le champ dans l'entrefer moins semblable à une sinusoïde. Les résultats de notre modèle étant assez semblables à ce que l'on nous demandait, on partira de ce modèle pour étudier l'influence des variations dans la forme des encoches, leurs dimensions, les matériaux, etc.

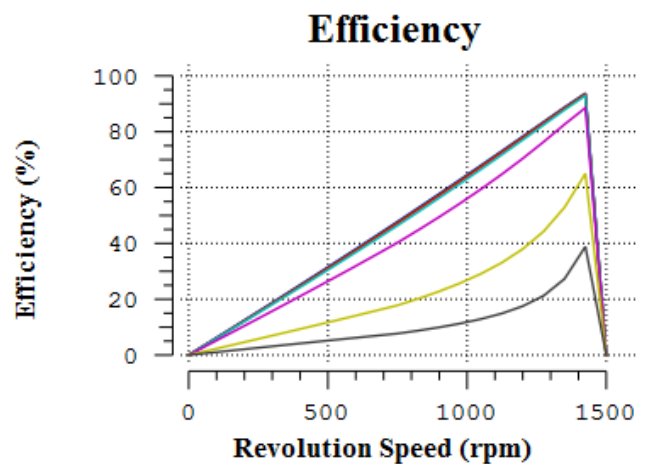
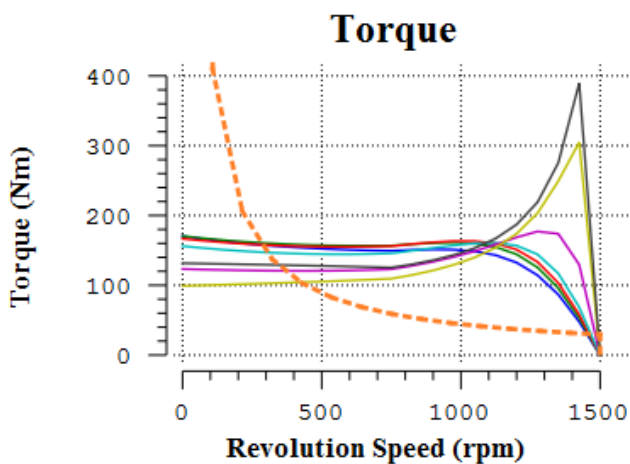
Cette erreur peut aussi avoir été dûe au fait que l'on n'a pas voulu donner des contraintes de couple et courant maximale. Peut-être le fait d'avoir laissé trop de paramètres en blanc a nui aux calculs.

10.3. Effets de la profondeur de l'encoche du stator



Nous avons eu un « outside diameter of coil » de 195mm

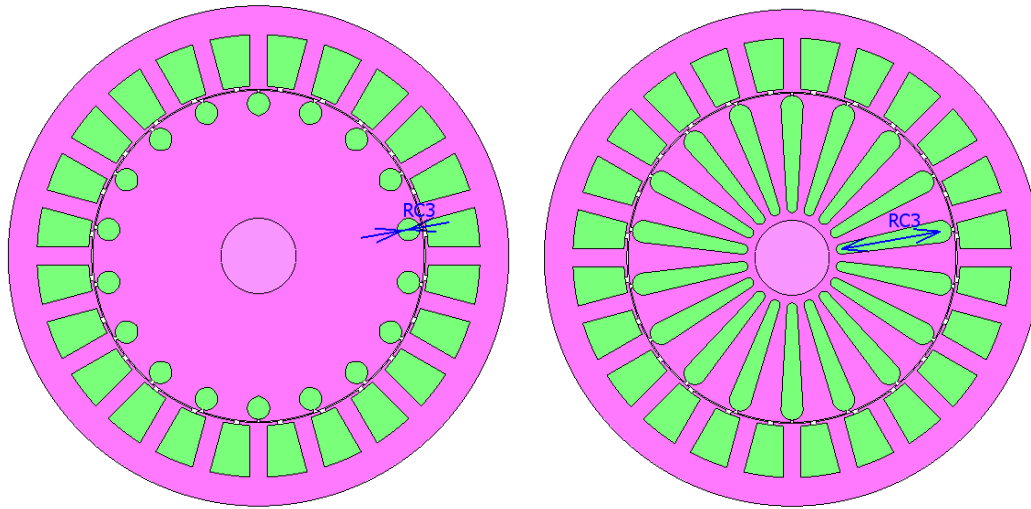
| Graph | Outside Diameter of Coil |
|--|--------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 160 |
| <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 170 |
| <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 180 |
| <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 190 |
| <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 200 |
| <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 210 |
| <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 220 |



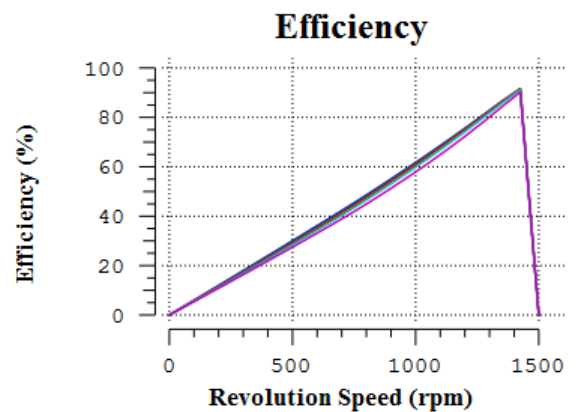
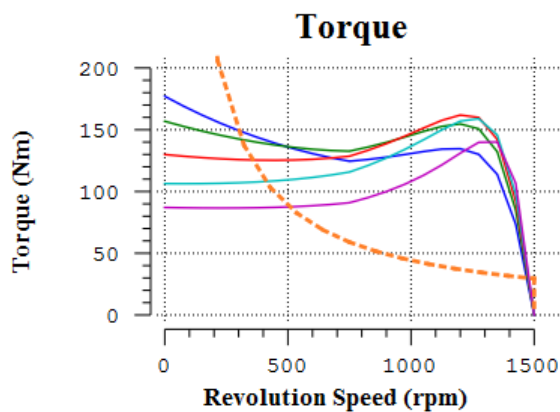
Les courbes deviennent pointues lorsque les encoches occupent la presque totalité du stator (l'épaisseur de la culasse devenant nulle). Toutes les pertes augmentent, le facteur de puissance diminue et l'efficacité est beaucoup pire.

10.4. Effets de la profondeur de l'encoche du rotor

Notre « distance between bar edge centers » fut de 20mm



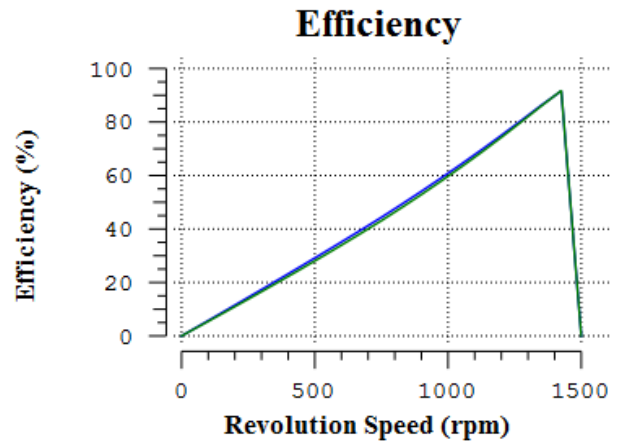
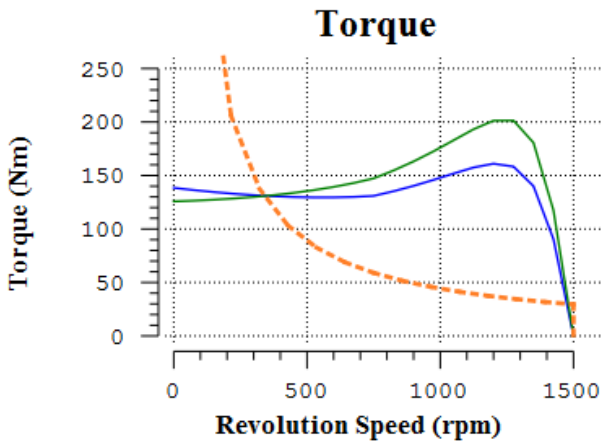
| Graph | Distance between Bar Edge Centers |
|--|-----------------------------------|
| 1 <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 3 |
| 2 <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 13 |
| 3 <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 23 |
| 4 <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 33 |
| 5 <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 43 |



Dans ce cas, les pertes restent plus ou moins les mêmes, ainsi comme la zone linéaire de la courbe de couple. La remarque plus importante qu'on tire est que, plus profonde est l'encoche du rotor, plus faible est le couple de démarrage.

10.5 Effets du matériau de la cage d'écureuil

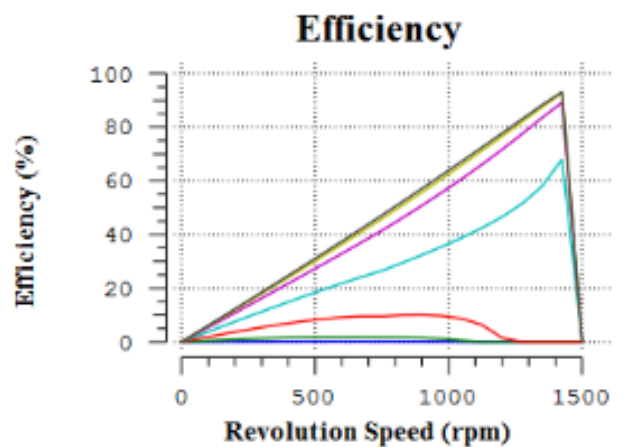
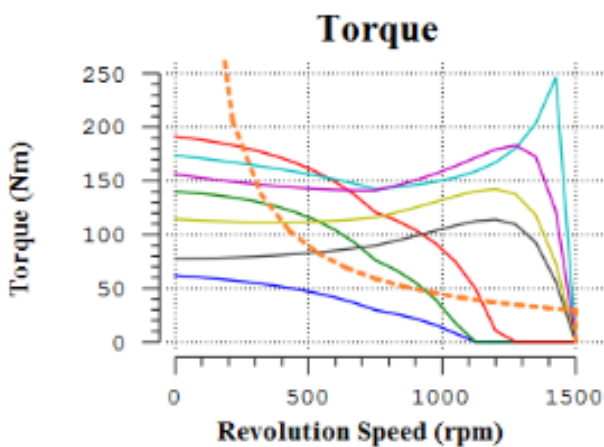
La courbe verte correspond au cuivre et la bleue à l'aluminium. Le cuivre présente un couple de démarrage plus faible et un couple maximum plus grand.



10.6 Effets de la longueur du moteur (profondeur, 3^{ème} dimension)

Notre valeur du « height » a été de 108mm

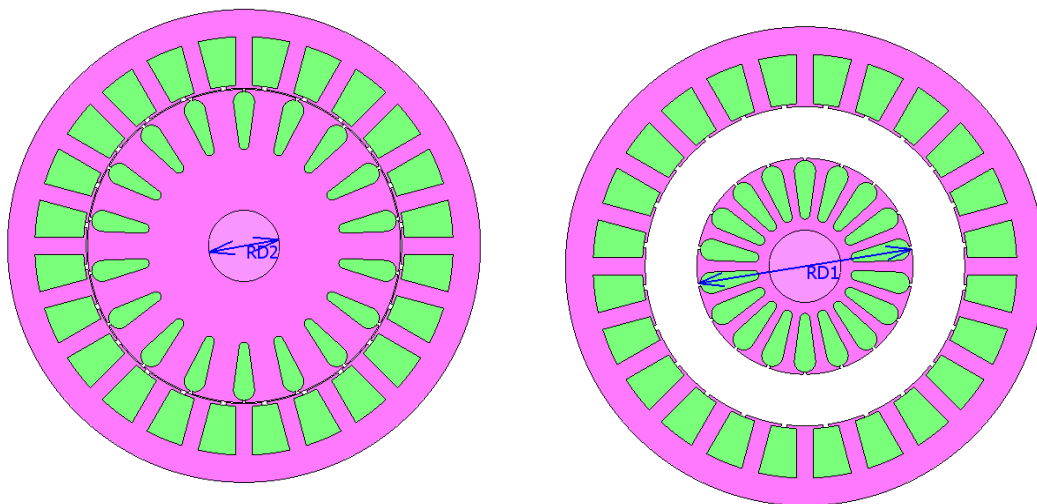
| Graph | Thickness |
|---------------------------------------|-----------|
| 1 <input checked="" type="checkbox"/> | 20 |
| 2 <input checked="" type="checkbox"/> | 40 |
| 3 <input checked="" type="checkbox"/> | 60 |
| 4 <input checked="" type="checkbox"/> | 80 |
| 5 <input checked="" type="checkbox"/> | 100 |
| 6 <input checked="" type="checkbox"/> | 120 |
| 7 <input checked="" type="checkbox"/> | 140 |










Dans ce cas on remarque que, lorsque la longueur du moteur augmente, on passe d'un couple insuffisant pour des petits longueurs à une courbe trop pointue et puis à des courbes qui semblent normales et dont le maximum et le couple de démarrage diminuent avec la longueur.

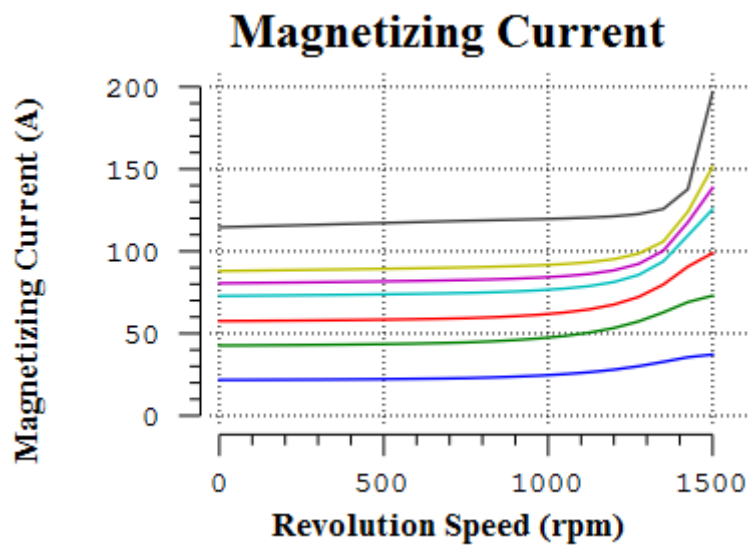
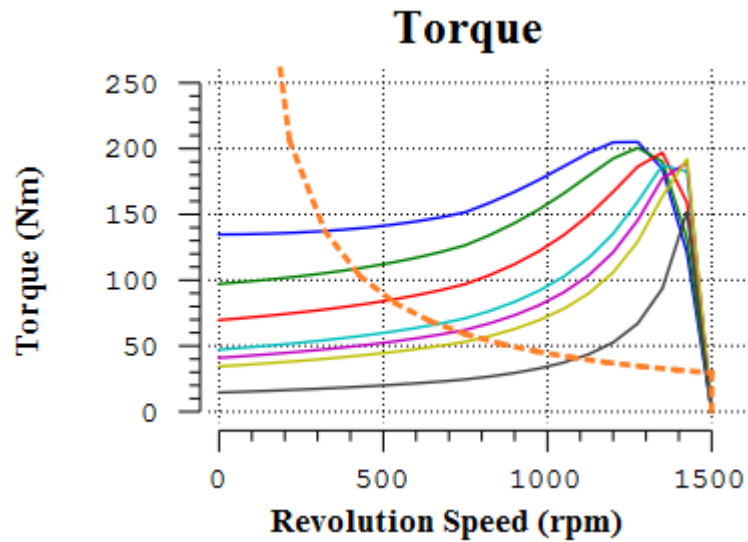
10.7 Effets de la longueur de l'entrefer

Pour cette étude on fait varier le diamètre extérieur du rotor, qui pour nous était de 146.75, soit un entrefer d'un millimètre. On part d'un entrefer presque nul (0.1 millimètres) jusqu'à un entrefer assez important (plus de 47 millimètres).



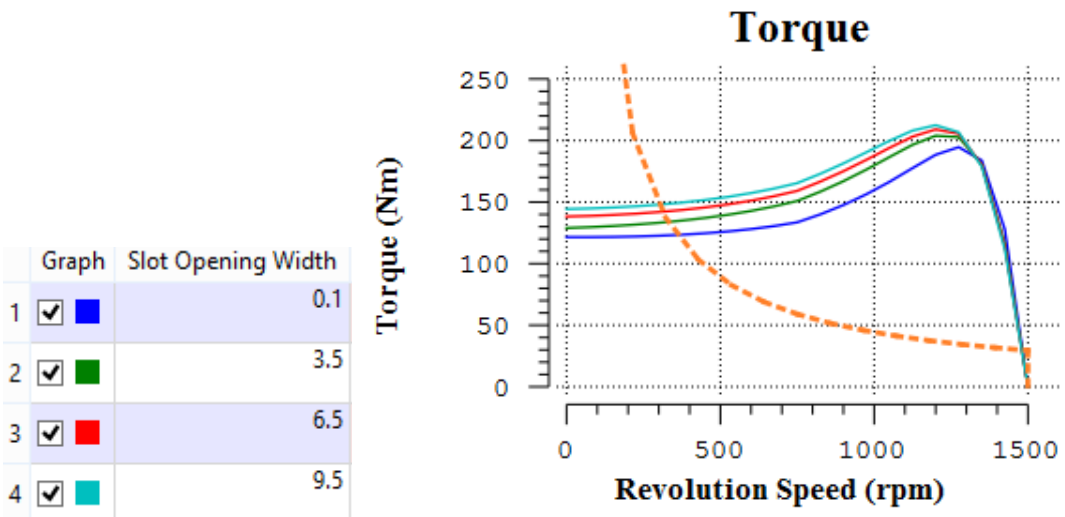
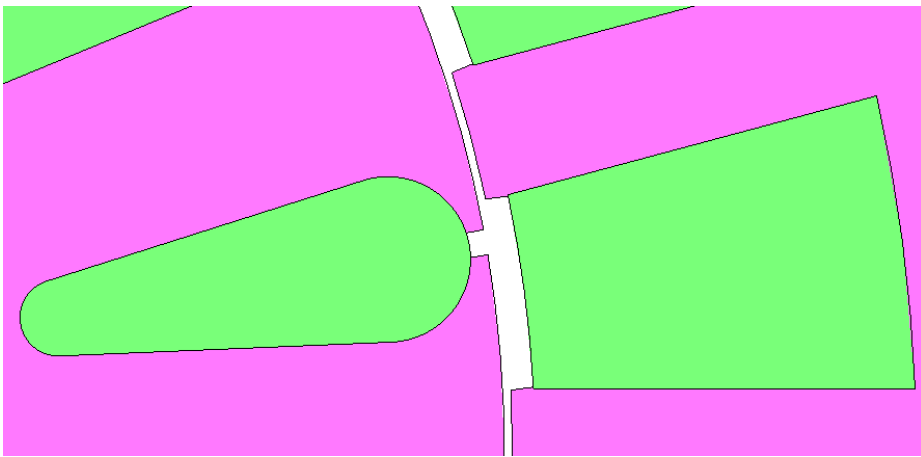
Dans cette simulation, on voit comme les courbes de couple deviennent beaucoup plus pointues et le couple de démarrage décroît. On a cru important montrer comment augmente le courant de magnétisation jusqu'à des valeurs très grandes. Ceci est dû au fait que, même avec une faible densité de flux et un entrefer étroit, la chute de potentiel magnétique dans l'entrefer est plus forte que dans le reste du circuit magnétique. C'est donc lui qui nécessite la plus grande partie du courant de magnétisation

| | Graph | Outside Diameter |
|---|---|------------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/>  | 147.6 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/>  | 139.6 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/>  | 131.6 |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/>  | 123.6 |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/>  | 119.6 |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/>  | 115.6 |
| 7 | <input checked="" type="checkbox"/>  | 100 |

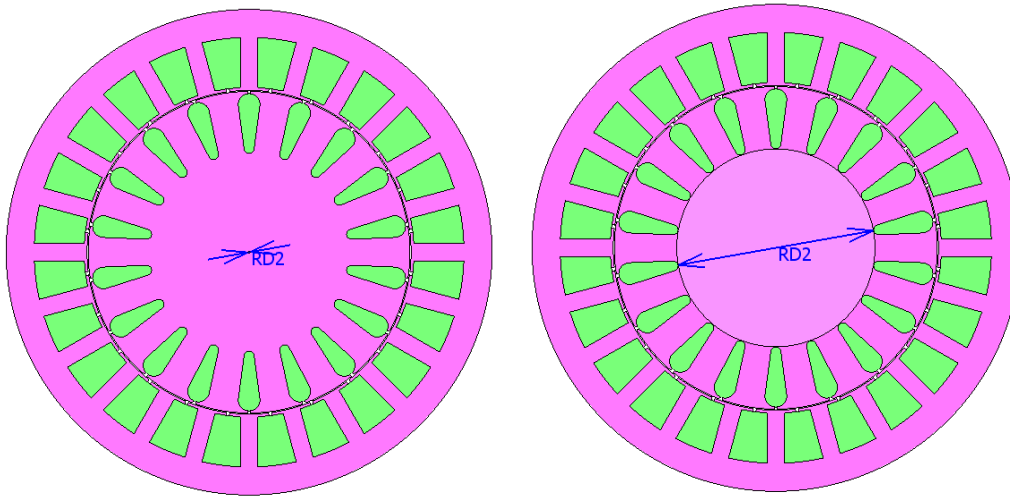


10.8 Effets de l'ouverture de l'encoche du stator

Cet analyse revient à peu près à analyser l'effet d'avoir une encoche du stator ouverte ou semi-ouverte. Les différences ne sont pas très grandes mais toutes les pertes sont réduites quand on ferme l'encoche. On ne montre pas un analyse similaire pour l'encoche du rotor puisque les effets sont les mêmes.

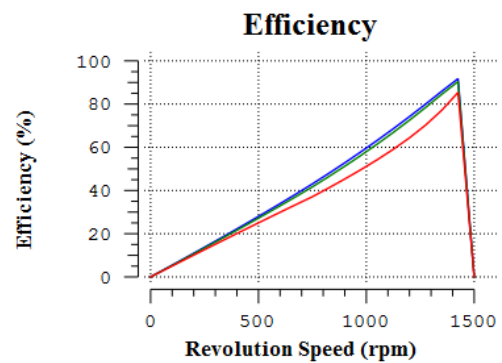
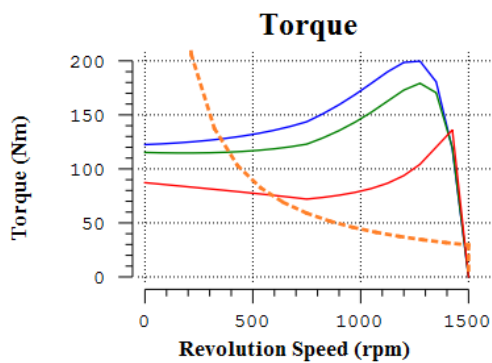


10.9 Effets de la largeur de l'axe



On peut voir comment il est important d'avoir une culasse assez grande pour le circuit magnétique :

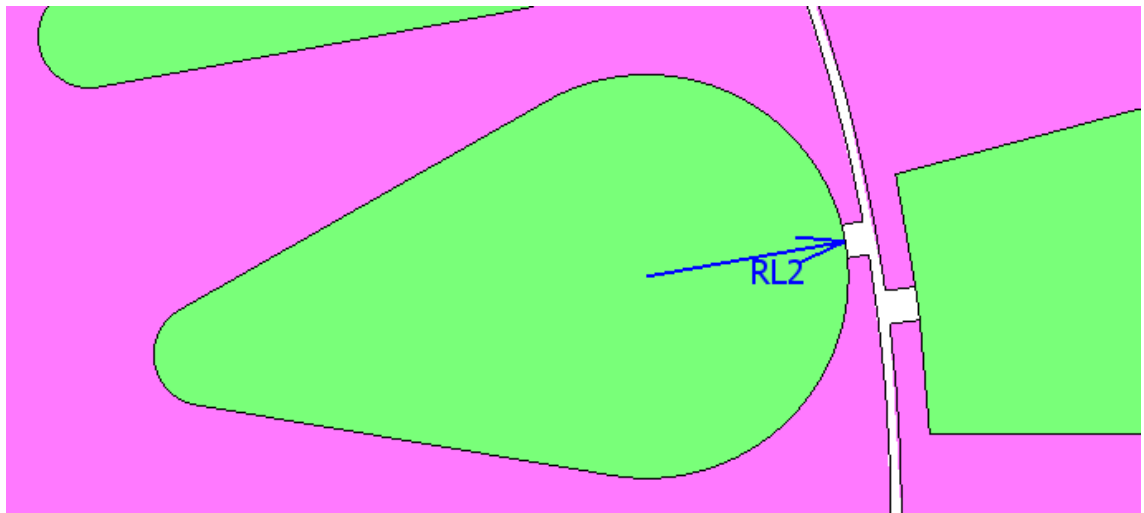
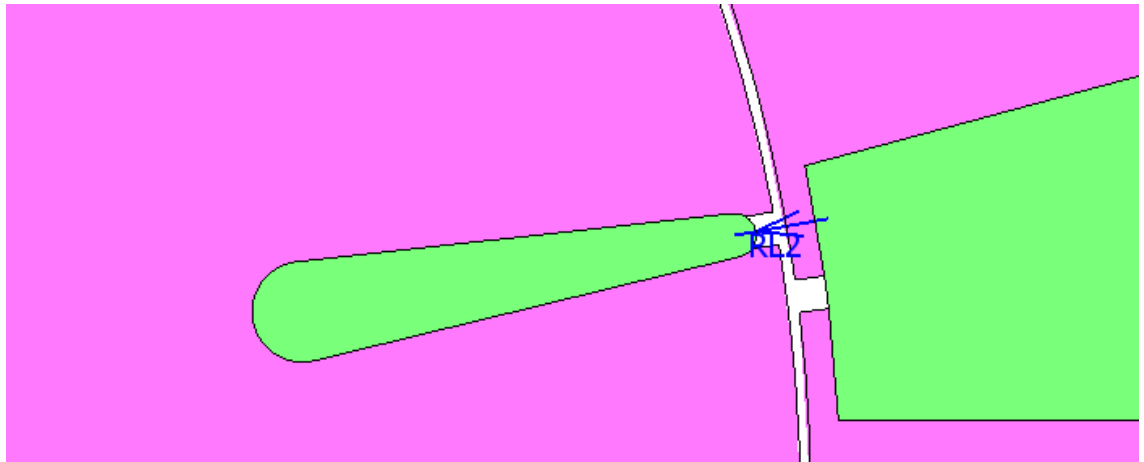
| | Graph | Shaft Diameter |
|---|--|----------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 1 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 80 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 90 |



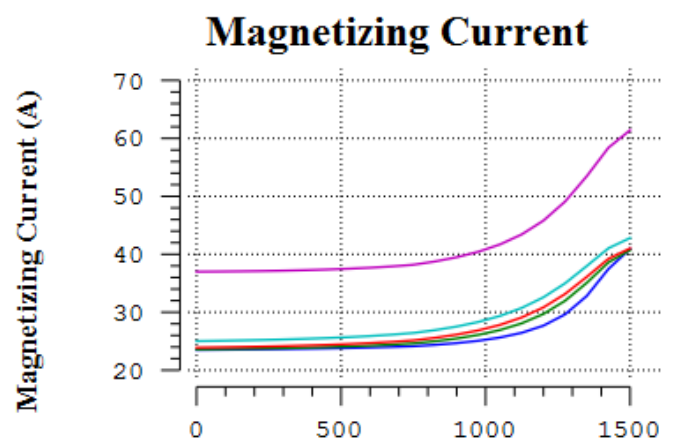
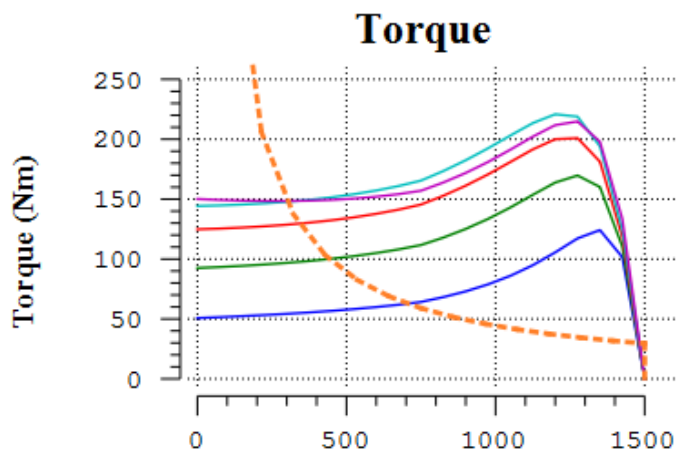
Les pertes dans le fer diminuent (il n'y a pas de culasse au rotor), le courant de magnétisation augmente et l'efficacité globale diminue. Notre valeur était de 33.36mm.

10.10 Effets de la grandeur du radius extérieur de l'encoche du rotor

Notre valeur était de 4.94mm. On voit comme ce radius fait augmenter le couple de démarrage et le couple maximal. S'il devient trop grand, il y a une hausse forte dans le courant de magnétisation.

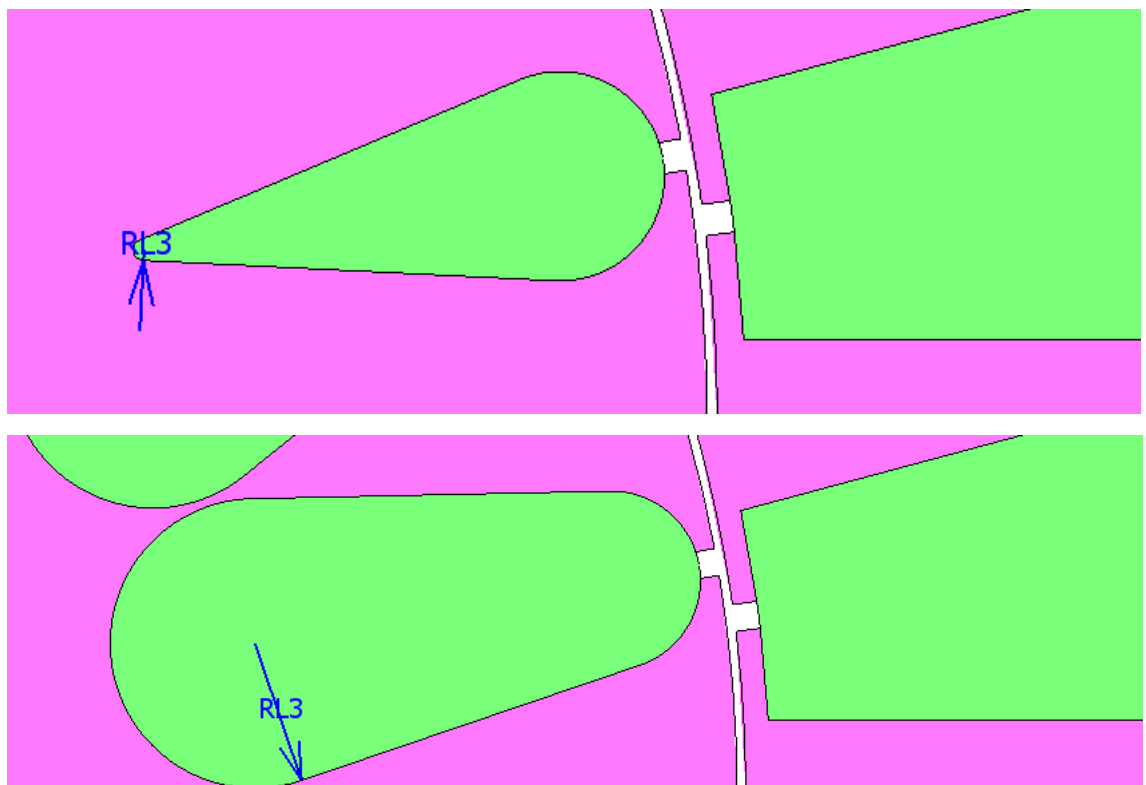


| | Graph | Bar Outer Center Depth | Bar Outer Side Radius |
|---|--|------------------------|-----------------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 1.94 | 1 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 3.94 | 3 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 5.94 | 5 |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 7.94 | 7 |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 9.94 | 9 |

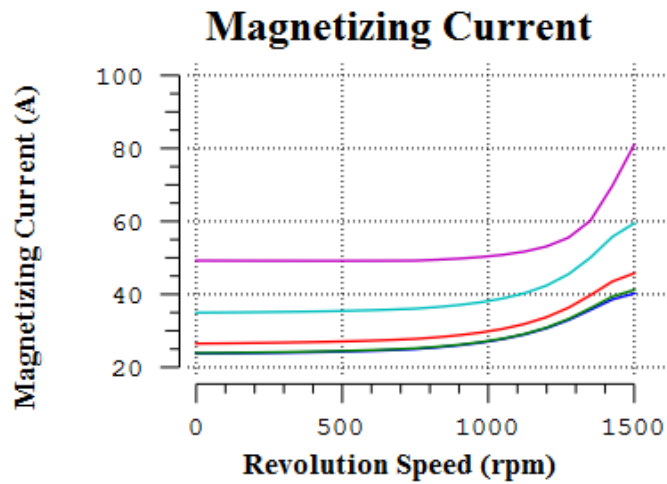
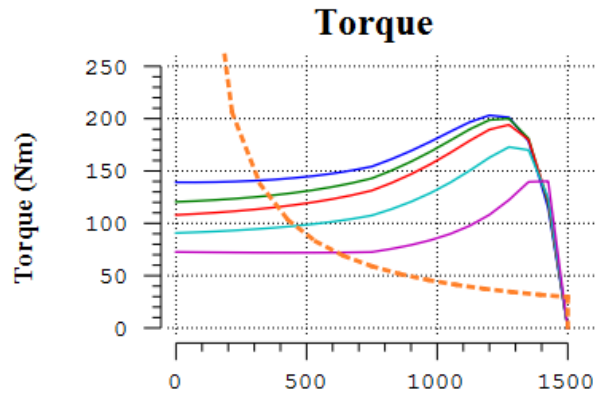


10.11 Effets de la grandeur du radius intérieur de l'encoche du rotor

Notre valeur était de 2.29mm. On tire des conclusions semblables aux précédentes.

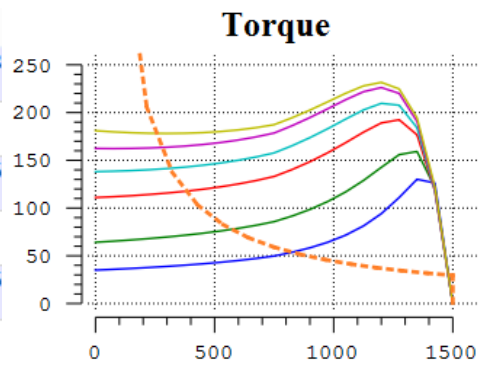


| | Graph | Bar Inner Side Radius |
|---|--|-----------------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 0.5 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 2.5 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 4.5 |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 6.5 |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 8 |



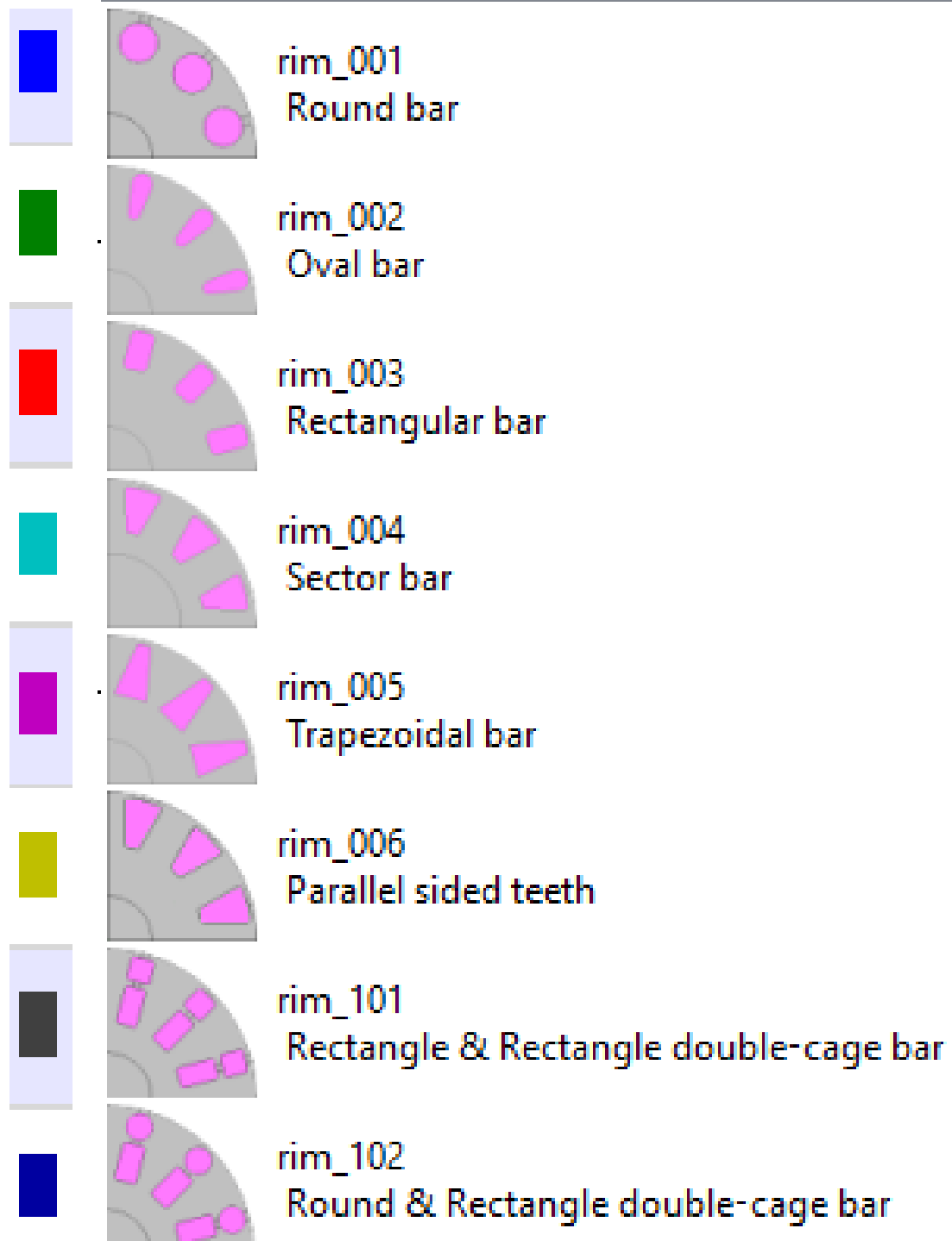
10.12 Effets du nombre d'encoches du rotor

| | Graph | Number of Secondary Conductor |
|---|--|-------------------------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 8 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 11 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 16 |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 21 |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 26 |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> ■ | 31 |

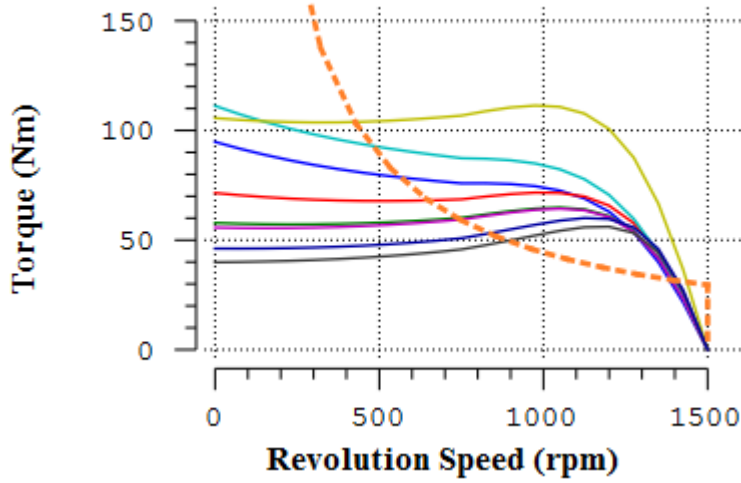


Pour des encoches de la même taille on obtient les résultats d'en haut. Dans le cas où il y a trop d'encoches, la taille réduite des dents fait que le courant de magnétisation augmente.

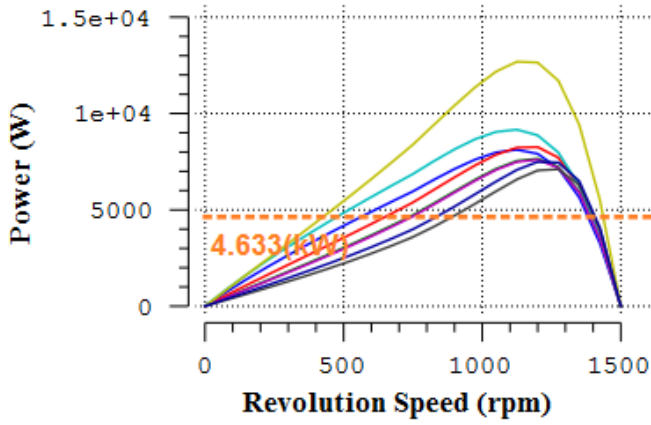
10.13 Effets de la forme d'encoche du rotor



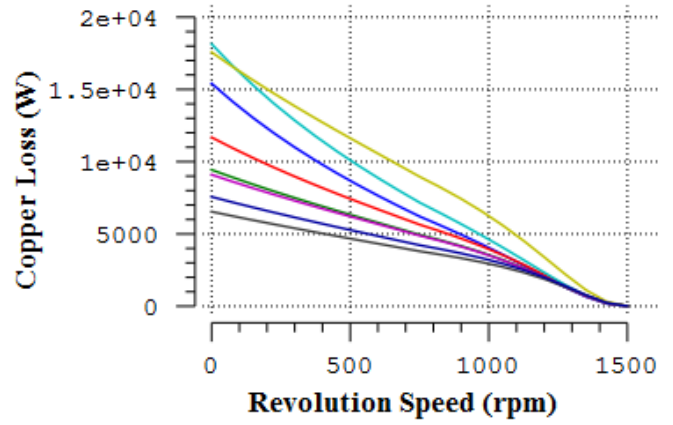
Torque



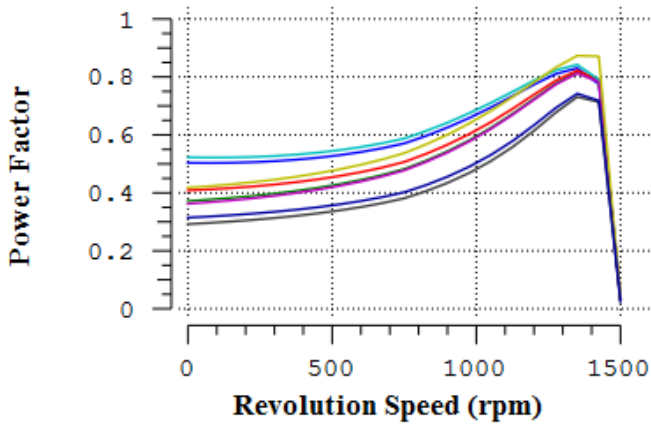
Power



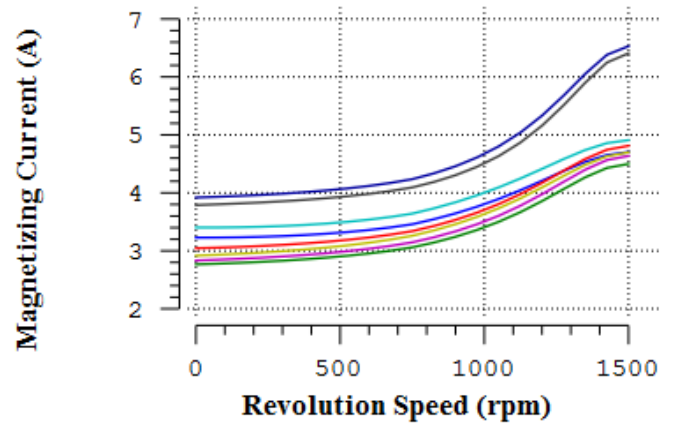
Copper Loss



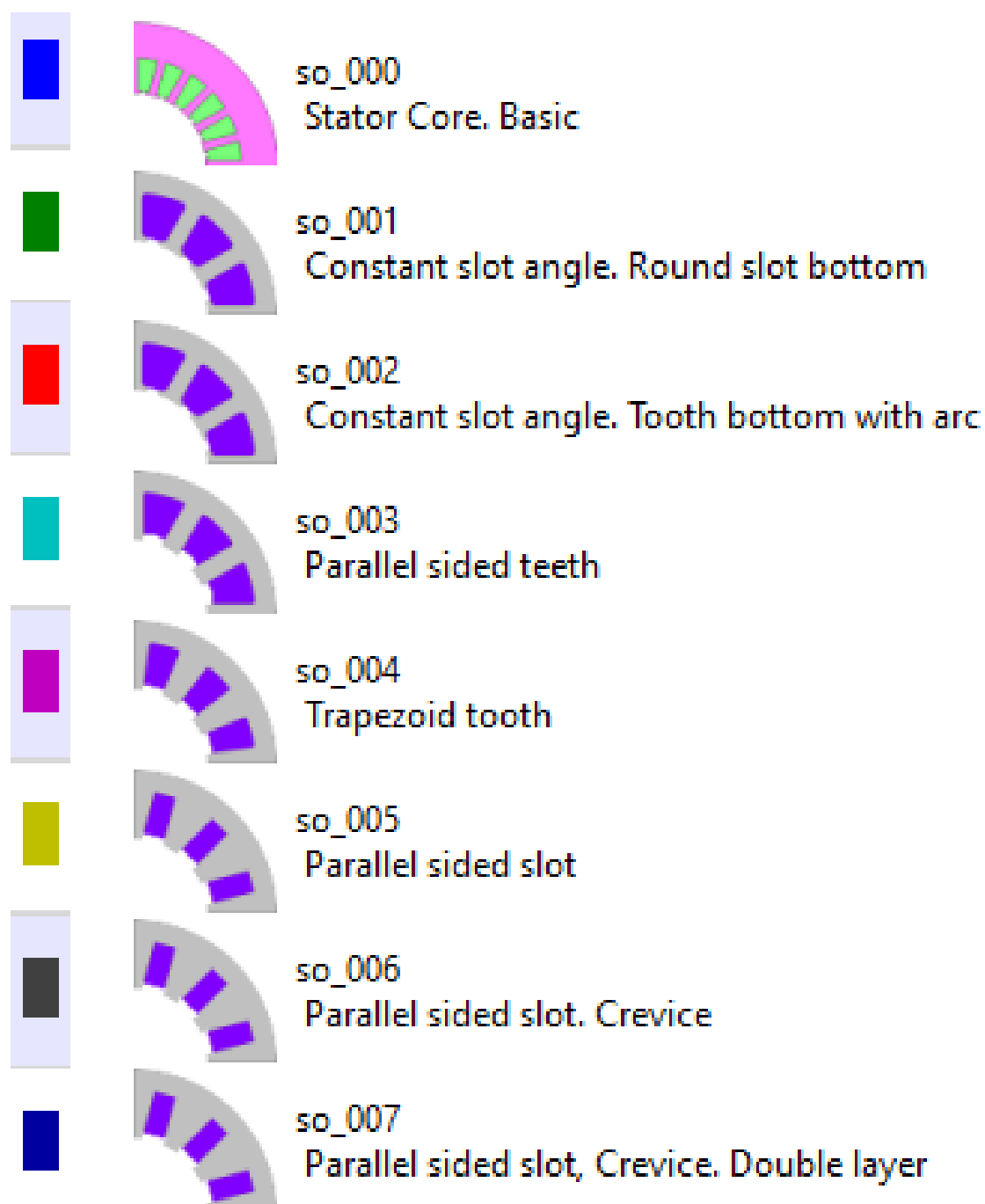
Power Factor



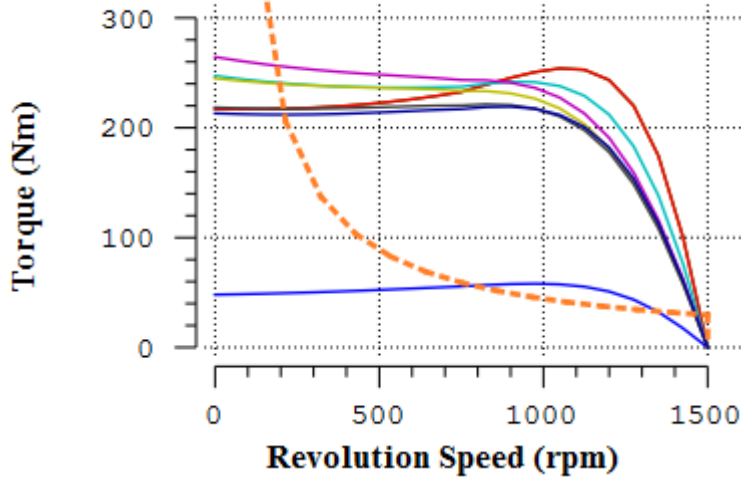
Magnetizing Current



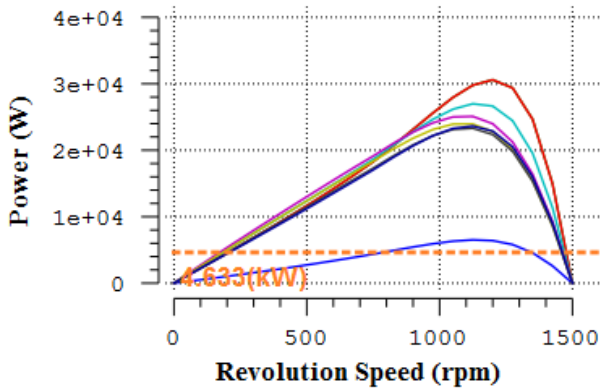
10.14 Effets de la forme d'encoche du stator



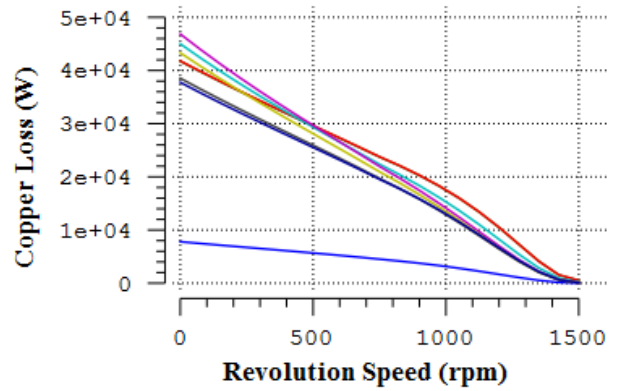
Torque



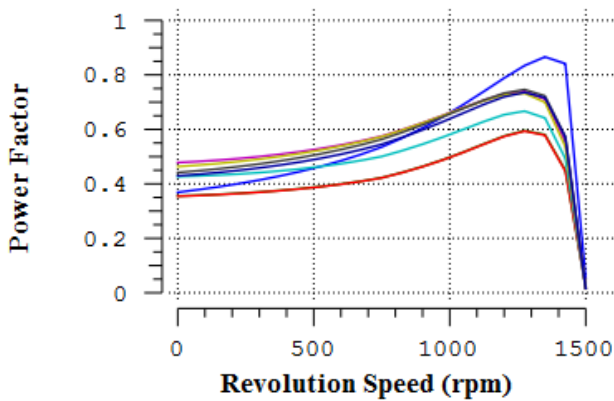
Power



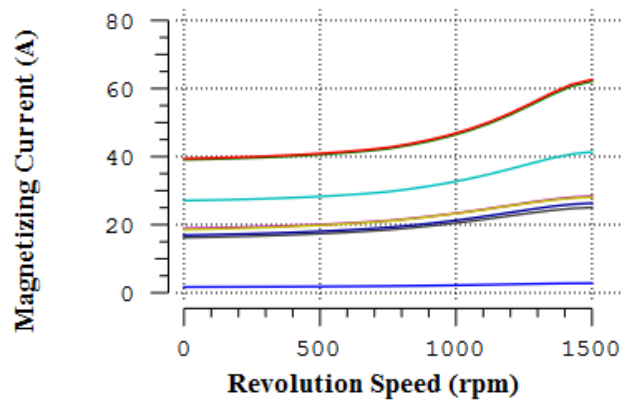
Copper Loss



Power Factor



Magnetizing Current



11. BIBLIOGRAPHIE

- Polycopié *TCEE (Traitement et conversion de l'énergie électrique)*. École Supérieure d'Électricité de Paris (SUPÉLEC).
- Polycopié *Machine synchrone et moteur à induction*. École Supérieure d'Électricité de Paris (SUPÉLEC).
- *Calcul des machines électriques tournantes*, DAVID R., SUPÉLEC et Université de Paris.
- *Polyphase motors, a direct approach to their design*, LEVY H., John Wiley & Sons.
- *Calcul pratique des alternateurs et des moteurs asynchrones*, LOUTZKY S., Éditions Eyrolles.
- *Elements of electrical machine design*, STILL A. et SISKIND C.S., McGraw Hill.
- *Conception des moteurs asynchrones triphasés*, École Polytechnique de Montréal.
- *Les moteurs à courant alternatif*, LAGRON L., Dunod.
- NEMA : *Motors and generators*. MGI.