



- Multiple possibilités de faire un bobinage
- Exemples particuliers liés à la microtechnique et certaines grosses machines
- Présentation de quelques bobinages spéciaux



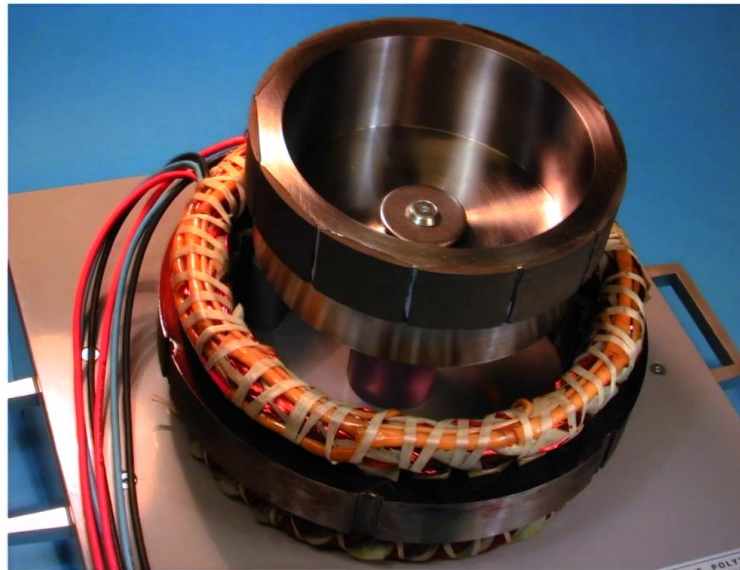
Madame, monsieur, bonjour. Dans cette leçon, nous allons voir plusieurs exemples de bobinage liés à la fabrication du champ tournant. Ce fameux champ tournant, champ magnétique tournant qui nous permet de faire l'interaction entre stator et rotor dans une machine tournante. Il y a de multiples bobinages, nous allons en voir quelques-uns, surtout des spéciaux, des particuliers liés à la microtechnique, mais aussi de très grosses machines pour voir les différences que nous pouvons trouver entre petites et grandes machines et surtout ces spécificités liées à la microtechnique lorsque le micromoteur fait que nous avons à trouver des trucs ou des solutions pour placer le bobinage à l'intérieur du stator.

Notes

Summary



0m 03s

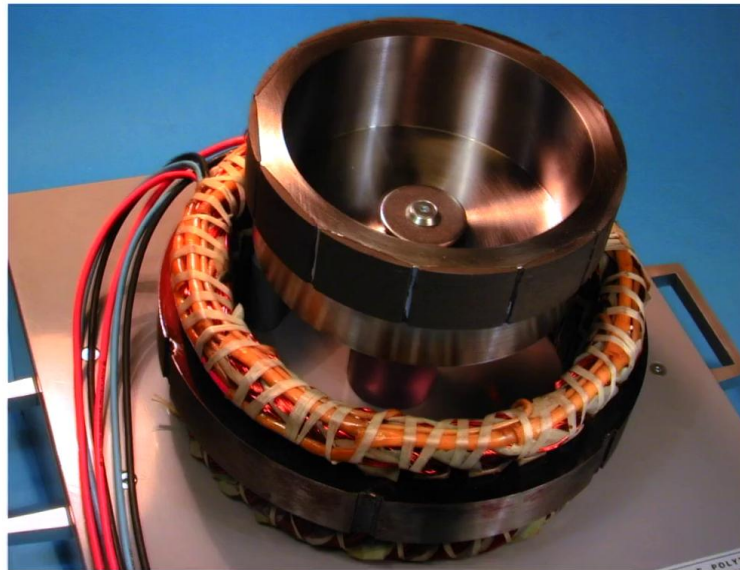


Voici un premier bobinage, je dirais assez classique, d'un bobinage réparti. Qu'est-ce que ça veut dire réparti ? Ça veut dire que le fil de cuivre va par exemple prendre ce chemin, se déplacer, puis redescendre sur une autre encoche, continuer sa course ici-dessous et remonter ensuite au-dessus. Ça signifie aussi que nous avons ici une partie non active, c'est-à-dire tout ce qui est au-dessus de la partie active qu'on appelle : « tête de développante » ou « tête de bobine ». Cette tête de bobine, comme on le voit ici, est épaisse. Vous avez ici la partie active, c'est-à-dire liée au stator. La partie active est faite de fer. Dans le fer circule le champ magnétique, le flux magnétique qui sert à créer le couple. Toute la partie de tête de bobine ne sert pas à la fabrication du couple et va surtout créer des pertes joules. On tente de minimiser cette distance le plus possible pour minimiser le volume de cuivre non utilisé pour la création de couples. Derrière, sur la photo, on a le rotor qui vient à l'intérieur du stator. On l'a ici démonté avec, sur la face métallique du rotor, les aimants permanents qui sont collés. Voici une autre image du même moteur avec le rotor placé pour être disposé à l'intérieur du stator.

Notes

Summary





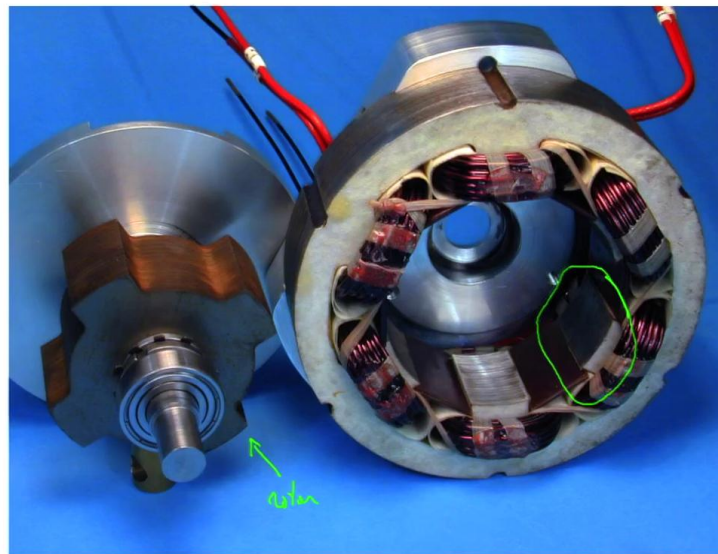
On le voit aussi ici, le nombre de fils de cuivre juste pour la connectique, pour connecter ces bobines entre elles, ramener tout ceci sur les trois phases principales avec le neutre prend énormément de place et donc crée finalement aussi une certaine difficulté pour minimiser en tout cas l'épaisseur du moteur.

Notes

Summary



2m 35s



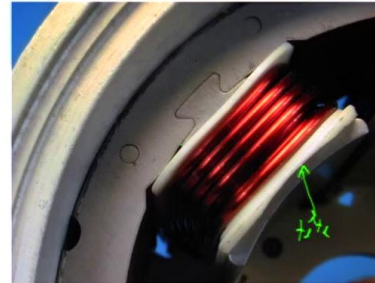
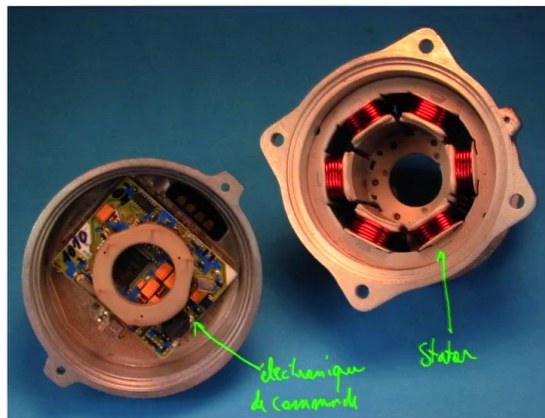
Une des solutions pour minimiser justement cette distance, c'est non pas de faire un bobinage réparti, mais un bobinage concentrique. Que veut dire concentrique ? On veut dire qu'autour d'une encoche ou autour d'une dent, la bobine va uniquement tourner autour de cette encoche. Ceci permet de minimiser grandement la tête de bobine, comme on le voit ici. L'épaisseur de la tête de bobine est extrêmement faible puisqu'on n'a pas besoin d'aller sur une autre encoche et faire des distances relativement importantes avec des surépaisseurs de cuivre qui s'ajoutent et qui s'ajoutent sur le stator. Mais faire un bobinage concentrique va impliquer une perte dans la tension induite de mouvement vue par le rotor. Le bobinage qui agit comme un filtre va ici filtrer un peu plus. C'est ce qu'on appelle le facteur de bobinage. Et ce facteur de bobinage qu'on calculera dans une autre leçon, comme on le verra, diminue en fonction du fait qu'on va faire un bobinage concentrique ou un bobinage réparti. Le rotor qui est ici mis à gauche est un rotor purement en fer, c'est donc un moteur réluctant ici avec un bobinage concentrique.

Notes

Summary



2m 56s

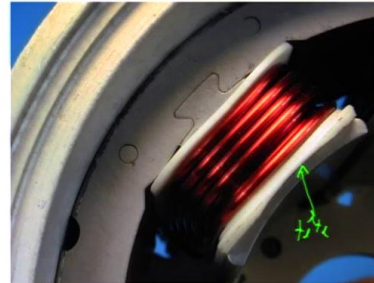
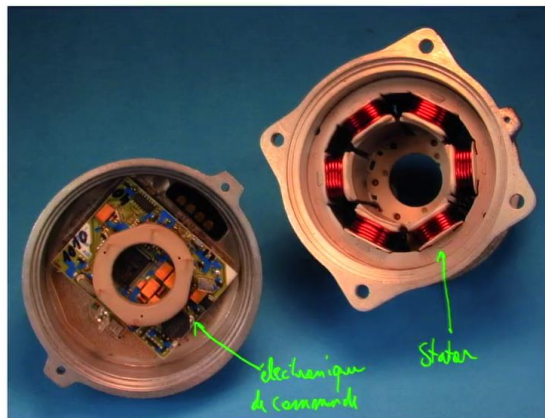


Une autre manière intéressante, c'est les trucs de construction, si on peut dire. Vous avez ici un moteur synchrone à aimant permanent, auto-commuté, qui est utilisé pour une pompe de centrale de chauffage. Qu'est-ce qu'on voit sur cette image ? On voit un stator ici avec bobinage concentrique, c'est assez clair. On pourrait même se dire avec une place entre les bobines relativement grande, donc on a laissé du vide. En fait, on a laissé du vide juste pour nous faciliter la construction. On a ici l'électronique de commande. Cette électronique de commande vient directement se fixer sur l'arrière du stator, se connecte automatiquement aux bobines pour les alimenter. Maintenant, quel est le truc ? Si on regarde l'image de droite, on voit ici une drôle de forme qu'on appelle la forme en queue d'aronde, bien connue des ébénistes du XVII<sup>e</sup> siècle qui faisaient des constructions en bois sans clous, sans vis, puisque les vis n'existaient pas à cette époque, mais sans clous, pour tenir deux pièces de bois entre elles. Ici, l'idée est de pouvoir monter la bobine en dehors du stator, faire ce fameux bobinage autour du boîtier blanc qui est ici, fixer ce boîtier blanc à l'intérieur de la pièce en fer ici, qui est la tête de bobine, puis glisser cette tête de bobine dans le stator pour le monter.

Notes

Summary





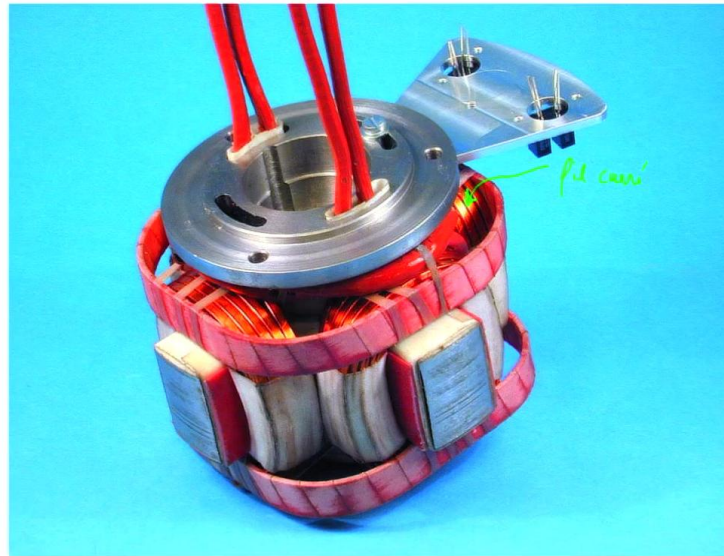
De cette manière très élégante, on construit un stator sans fixation aucune, sans devoir mettre de rivets, sans devoir mettre de fixation après coup comme une goupille ou comme une vis, mais à la manière dont les ébénistes faisaient leurs pièces de bois à l'époque.

Notes

Summary



5m 57s

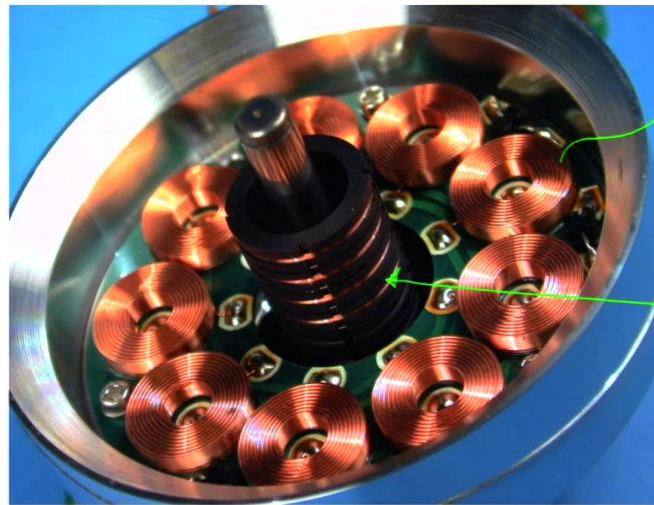


Autre manière de gagner, on va dire, encore de la place, de mettre de plus en plus de cuivre à l'intérieur du volume à disposition dans le stator, c'est d'utiliser un fil, non pas de section circulaire, mais un fil de section carré ou rectangulaire. Comme on le voit ici, le bobinage qui est fait sur ce moteur est un bobinage avec un fil carré qui permet d'avoir une densité de cuivre plus importante sur ce stator. Ici, c'est un stator à rotor extérieur, le stator est à l'intérieur si on veut. Le rotor va se mettre autour et va se mettre à tourner autour. C'est un moteur de phases ici.

Notes

Summary





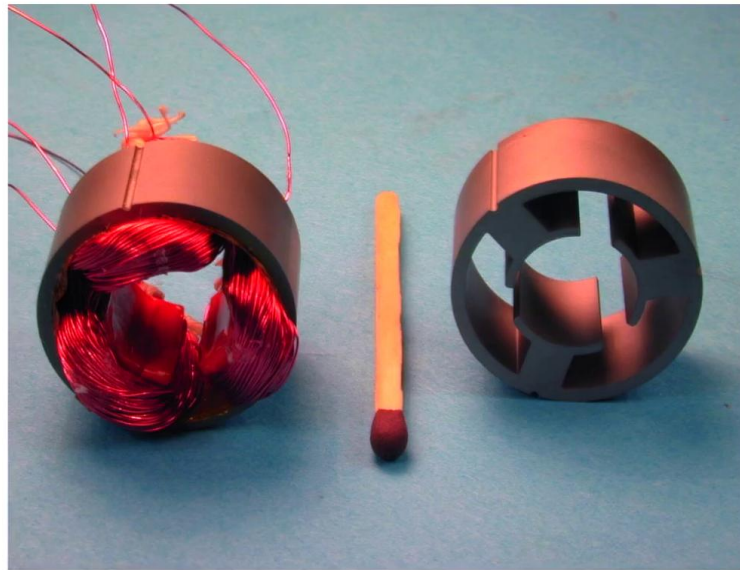
Un tout autre moteur très particulier. Ici, vous avez un moteur assez ancien avec un bobinage, si on veut, dans l'entrefer. Les bobines sont ici placées dans l'air. On a un aimant permanent qui est posé par-dessus. Cet aimant permanent va tourner. C'est un moteur dit : « axial » dans ce cas-là. On a aussi une petite particularité sur ce système qui est un système de tête magnétique pour lire des bandes magnétiques. On a en effet ici quatre bobines que l'on voit très bien ici, disposées sur l'arbre et ceci, c'est une des bobines du transformateur. En effet, on utilise une bobine ici au primaire, on a une autre bobine fixe sur la partie qui ne tourne pas et on transmet de l'information et/ou de l'énergie entre le primaire et le secondaire. On appelle ça un transformateur à air et qui permet de transmettre des données sans contact. Voilà une jolie manière aussi de placer des bobines et d'intégrer ces bobines à l'intérieur d'un système électromécanique.

Notes

Summary



6m 57s



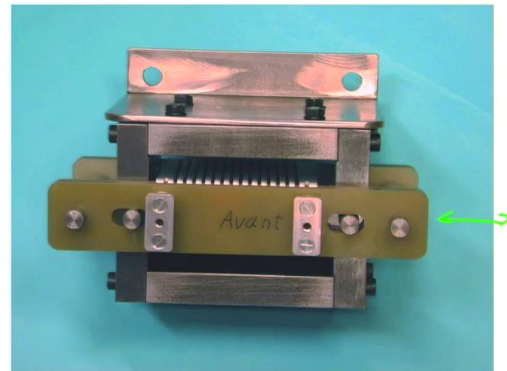
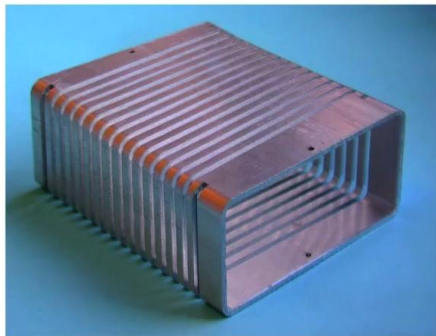
Pour des systèmes miniatures, quand on descend ici en taille. Là, on parle d'un moteur d'une vingtaine de millimètres, un tout petit moteur utilisé pour une pompe cardiaque qui doit donc se glisser à l'intérieur de l'aorte, entrer dans le ventricule gauche pour pouvoir faire une pompe qui aide ensuite à pomper le sang. C'est donc une assistance ventriculaire. Vous avez ici une allumette pour vous montrer la taille de ce moteur. Vous avez le stator à droite non-bobiné, à gauche bobiné. Dans sa plus simple expression, finalement, trois encoches. On met les bobines autour de ces trois encoches et la manière qui nous permet de gagner dans les développantes ou les têtes de bobine, c'est donc de faire un bobinage concentrique, comme on l'a vu dans les toutes premières images de cette leçon. Ici, le bobinage a été fait à la main. On le voit d'ailleurs sur l'image puisque la densité, finalement, de cuivre qu'on arrive à mettre dans le volume est un peu moindre par rapport à ce qu'une machine aurait pu faire pour aligner les fils de cuivre les uns avec les autres. Ici, comme c'est fait à la main, on a une juxtaposition qui ne se fait pas de manière tout à fait correcte et la quantité de cuivre par unité de volume baisse un tout petit peu quand un prototype qui est fait comme ici à la main, un prototype qui a été fait à l'EPFL.

Notes

Summary



8m 11s



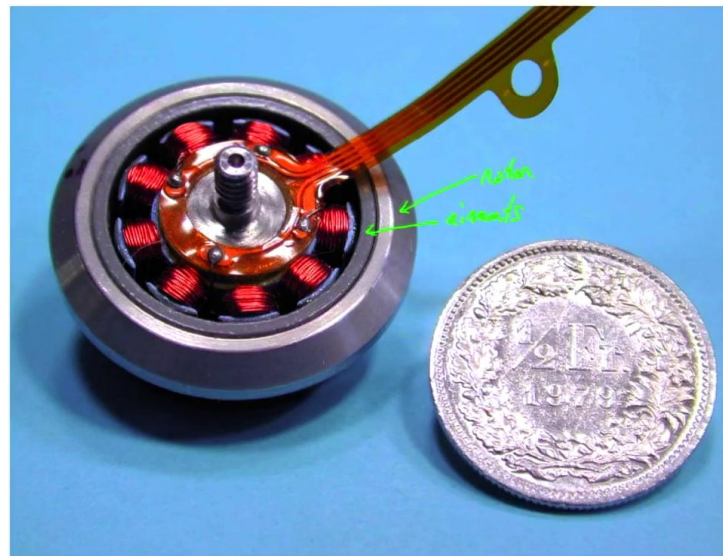
Une tout autre manière de voir les choses, c'est pourquoi utiliser du cuivre, finalement, pour faire une bobine ? Vous avez ici à droite un moteur linéaire, une partie linéaire. Cette pièce ici circule à gauche ou à droite. On a donc un système électromécanique et pour faire interagir ce système, on a une bobine mobile. Cette bobine mobile est faite d'un seul tenant, d'une seule pièce monobloque massive et c'est l'image de gauche. Mais comme vous pouvez le voir, cette bobine même massive, n'est pas faite en cuivre. Elle est faite ici en aluminium. Pourquoi ? Évidemment, pour son poids plus faible, sa masse plus faible, on passe de 8 800 kilos par mètre cube à 2 700 kilos par mètre cube pour l'aluminium. On a une dynamique qui va être bien plus grande. En contrepartie, il va falloir payer une augmentation de la résistivité puisque la résistance résistivité de l'aluminium est une fois et demie plus grande que celle du cuivre. On va avoir des pertes joules nettement plus importantes. C'est donc un compromis à choisir entre une grande dynamique, perte joule, température finale de l'objet ou de la bobine en mouvement, mais c'est une solution intéressante à avoir dans l'esprit qu'il est possible de faire un bobinage autrement qu'avec du cuivre.

Notes

Summary



9m 35s

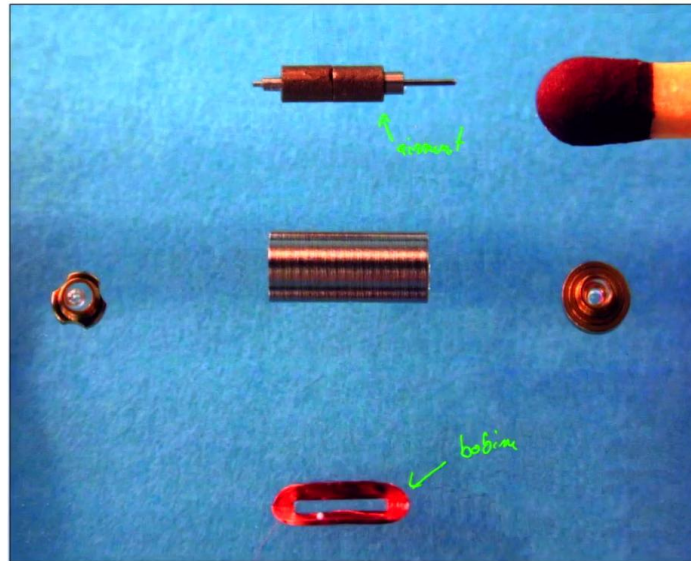


Voilà encore une très belle intégration d'un bobinage. Voici un micromoteur qui tourne à environ 10 000 tours par minute, utilisé dans les disques durs d'ordinateur, avec ici un rotor extérieur. Voici le rotor avec ici la bague ou les aimants. En fait, c'est un aimant, mais qui est après polarisé en huit pôles distincts. Ici, on a huit pôles ou quatre paires de pôles. Et on a un bobinage ici, concentrique, très clair, avec des développantes ou des têtes de bobine extrêmement courtes. Le bobinage ici est fait à la machine serrée et on voit qu'on a des moteurs extrêmement plats, on peut dire. C'était ici la nécessité du cahier des charges de ce type de moteur.

Notes

Summary



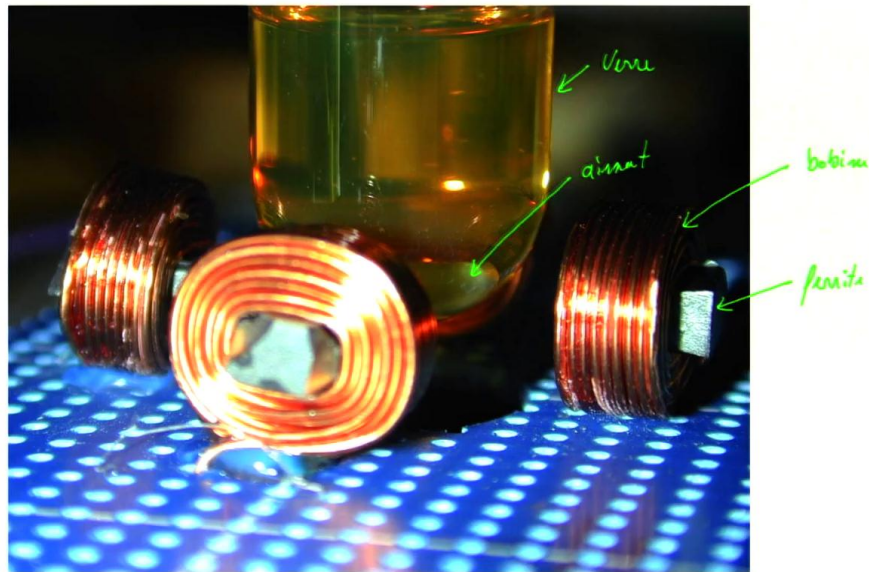


Voici un moteur encore plus petit. Vous avez ici la tête de l'allumette pour vous donner le diamètre. Ce diamètre est de trois millimètres extérieurs. Vous avez ici, des bobines. Enfin, ici, une seule bobine présentée. Mais dans le moteur, on a trois bobines placées à 120 degrés. On a le rotor qui est un cylindre d'aimant, deux pôles qui tournent et on a à gauche et à droite les roulements qui permettent de maintenir le système et de faire tourner ce moteur à presque 100 000 tours par minute. Une des très grandes difficultés ici, si, du point de vue fabrication, l'entreprise qui a fait ce moteur est très habile en microtechnique, connaît la tradition horlogère suisse et donc permet finalement d'avoir des roulements à billes, ici même à billes, qui permettent de faire tourner ce moteur à 100 000 tours par minute. La grande difficulté de ce moteur, c'est de finalement se connecter à la bobine, même de souder un fil d'alimentation sur le fil extrêmement fin de la bobine qui est ici présenté sur l'image, fait souvent fondre le bobinage lui-même. On doit faire ce genre de soudure de manière extrêmement rapide, précise et souvent par des personnes qui ont un savoir-faire pour faire ce type de manipulation.

Notes

Summary





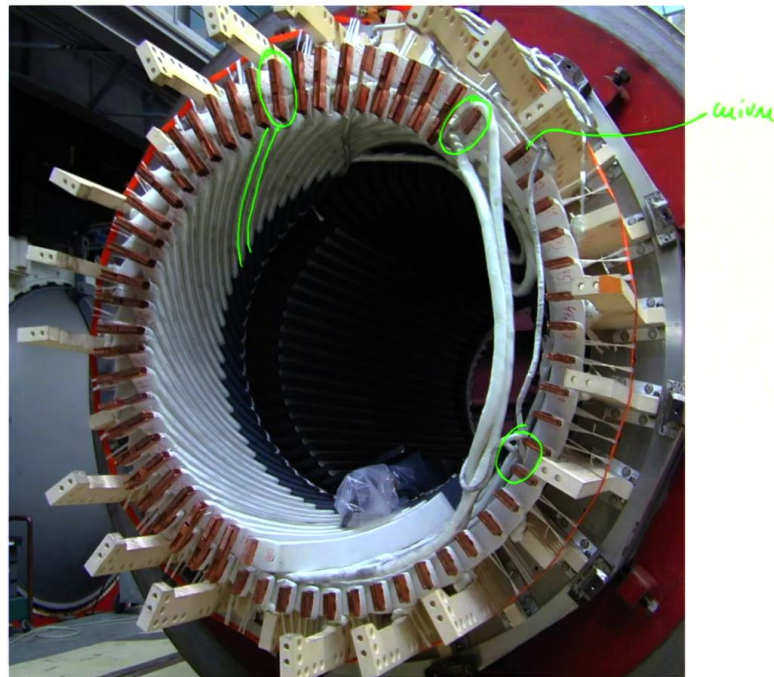
Voilà encore une tout autre manière de faire un champ tournant. Vous avez ici une éprouvette derrière l'image. Ça, c'est du verre. Dans ce verre, on met une gélule magnétique, en fait un aimant qui va tourner. C'est bien connu des chimistes ou des étudiants qui font des TP de chimie, on veut faire un mélangeur et il faut ensuite, en dessous, mettre un champ magnétique qui tourne pour faire tourner l'aimant et ainsi brasser ce qu'on a mis dans l'éprouvette, dans le verre. Voilà une manière de faire. On a placé ici des bobines, on en a placé quatre pour faire un champ tournant avec deux phases, c'est le minimum. Et ici, une pièce en fer ou en ferrite qui permet de conduire un tout petit peu mieux le champ magnétique. On canalise ainsi les quatre pôles ici du bobinage pour réaliser un champ magnétique, certes, mauvais puisque le champ magnétique va se refermer dans l'air, à l'extérieur, en fait, de ce dispositif, mais suffisant pour faire tourner l'éprouvette. En fait, l'idée de cette démo était d'avoir une sorte de rac remplie d'éprouvettes et de faire brasser de manière identique dans chaque éprouvette, de manière homogène dans chaque éprouvette et donc d'avoir une sorte de réseau de bobines tel que montré sur cette photo, mais pour 20, 30 éprouvettes en même temps.

Notes

Summary



# Stator d'un générateur de puissance

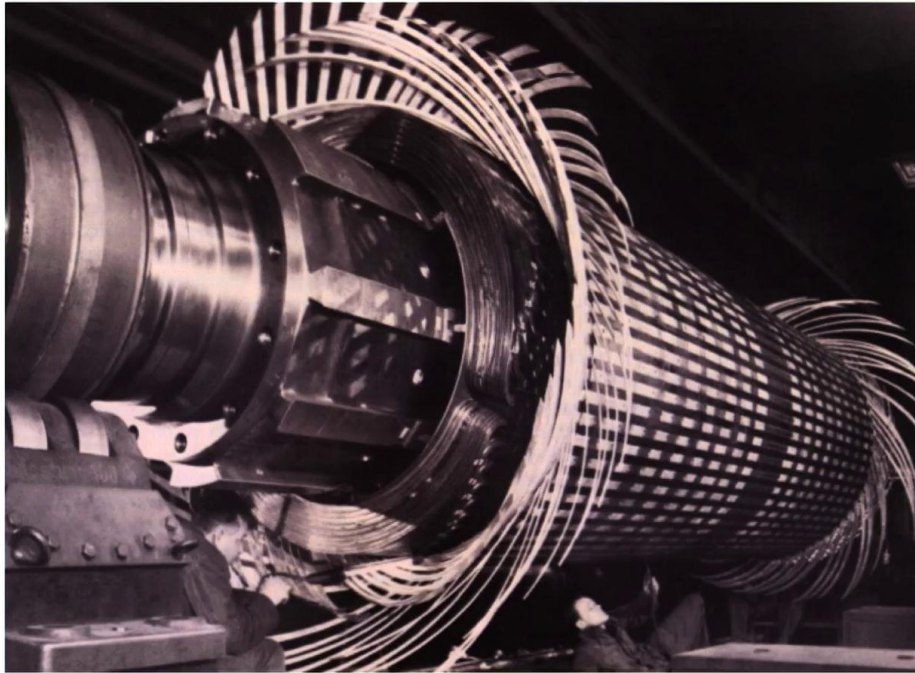


Passons maintenant aux toutes grosses machines, juste pour vous montrer les grandes différences. Ici, très clairement, vous avez uniquement le stator de cette machine. C'est un générateur de puissance. Voilà le stator avec ses multiples encoches. Pourquoi de multiples encoches ? Parce qu'on va utiliser tout l'espace qu'on a à disposition pour y mettre du cuivre, c'est l'idée. On a finalement toujours trois phases dans ces grandes puissances, on va répartir. Là, on a typiquement un bobinage réparti dans toutes ces encoches, dans tout ce stator. Là, on a différentes images pour nous montrer la construction de ce stator. On commence par le stator tout nu, préparé à accueillir dans chacune des encoches le cuivre. On a ici le cuivre qui n'est plus sous forme d'un bobinage classique avec du fil que l'on bobine à la manière d'une machine à coudre ou du fil. On a des barres ici de cuivre. Ces barres de cuivre sont placées, disposées à l'intérieur de ces encoches et on le voit après, il faut connecter ces barres entre elles. Il y a tout un travail d'accueillir ces barres à l'extérieur du stator, de les faire twister comme c'est indiqué ici. Vous voyez ici le twist qui part ici à l'arrière pour chacune de ces barres, puis la partie ici, connexion, où chacune de ces barres va être interconnectée par des câbles ou des fils, ici carrément des câbles, pour les connecter entre eux.

Notes

Summary





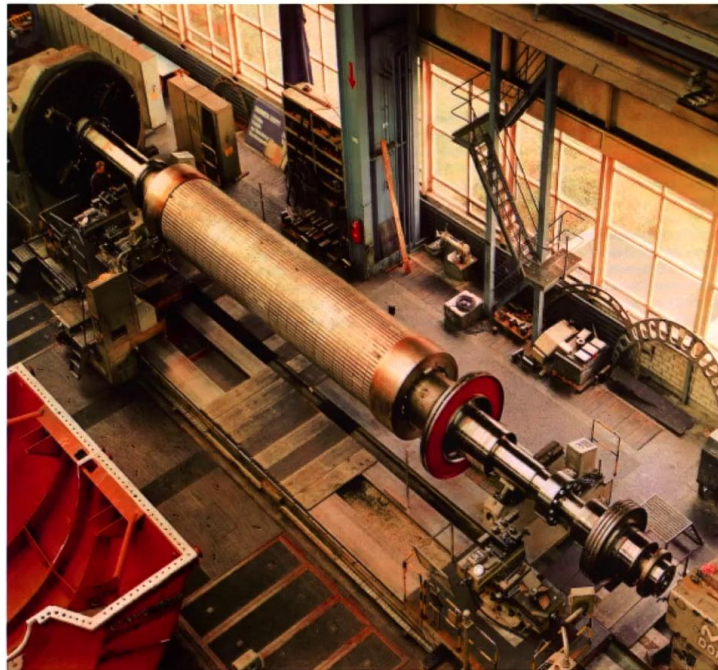
Voilà l'anneau de connexion final. Vous avez aussi ici, en rouge, vous voyez ici très clairement, en rouge, on a mis de l'isolant sur chacune de ces barres pour éviter tout court-circuit entre les barres de cuivre. Et toute cette construction mécanique est compliquée pour finalement pouvoir relier ces barres de cuivre entre elles. Et vous voyez aussi que tout ceci prend de la place. La tête de bobine d'un tel moteur, là, est très importante, mais finalement, on ne peut pas être réduite plus que ça dans un moteur de cette taille. C'est dans les micromoteurs qu'on se permet de réduire, finalement, le facteur de bobinage pour nous permettre de réduire la taille, mais pas ce qu'on peut se permettre dans ces dimensions et dans ces puissances de faire ce type de compromis. Une autre possibilité que j'aimerais aussi vous montrer, c'est le fait d'avoir au rotor, ça, c'est un très gros générateur de puissance, et on peut avoir au rotor également du bobinage. On peut avoir un rotor bobiné et pas seulement au stator. C'est juste pour que vous le sachiez aussi.

Notes

Summary



# Rotor bobiné d'un générateur de puissance



Ce même rotor est ici placé à l'horizontale. La plupart des générateurs aujourd'hui se mettent à la verticale pour des raisons mécaniques de vibration mécanique et de simplicité de tenue.

Notes

Summary



17m 22s

# Stator et rotor géant du barrage d'Itaipu (Brésil)



Pour finir, un stator et rotor géants, quand on est parti du tout petit pour vous montrer aussi le tout gros. Vous avez ici le rotor. Ce rotor a été placé sur le barrage d'Itaipu, un des générateurs du barrage d'Itaipu au Brésil. Vous avez ici le rotor et ici le stator. Et surtout, ici en bas, les hommes, les ouvriers qui sont au bord du stator et qui regardent à l'intérieur du trou alors que sur le rotor, vous avez même aussi encore un bonhomme. Le pont roulant est ici en train de placer le rotor au-dessus du stator pour l'assemblage final de la machine.

Notes

Summary





- Multitude de possibilités pour réaliser un bobinage.
- En fonction de la géométrie du moteur, telle ou telle configuration sera choisie.
- Lorsque les moteurs sont petits, le facteur de remplissage diminue.

Voilà, j'ai terminé avec mes exemples. Vous avez vu une multitude de possibilités avec ces bobinages qui peuvent être répartis, qui peuvent être concentriques, qui peuvent être en cuivre, qui peuvent être en aluminium. On voit qu'en fonction de la géométrie du moteur, on doit finalement adapter le choix du bobinage que l'on va prendre pour telle ou telle considération ou spécification du moteur. Lorsque les moteurs sont petits, en général, le facteur de remplissage, la quantité de cuivre qu'on peut mettre par unité de volume, va diminuer. Si on le fait à la main, c'est même encore plus flagrant sur les images que je vous ai montrées tout à l'heure. Merci.

Notes

Summary



18m 16s