



- Conditions pour l'obtention d'un champ tournant
- Génération d'un champ pulsant
- Génération d'un champ tournant



Mesdames, messieurs, bonjour. Dans ce module, nous allons étudier le champ tournant qui est la base pour toutes les machines électriques et l'interaction entre rotor et stator. Nous allons étudier en particulier les conditions d'obtention d'un couple comment ou Qu'est ce qu'il faut pour avoir finalement un champ tournant dans la machine. Comment on génère tout d'abord un champ pulsant et comment grâce à ces champs pulsant nous pouvons fabriquer un champ tournant que nous verrons être une onde magnétique tournante.

Notes

Summary



0m 04s

Système Polyphasé, minimum de 2 phases

→ champ tournant

→ Conversion  $E_{el} \rightarrow E_{mec}$

$E_{mec} \rightarrow E_{el}$

Les conditions pour un champ tournant c'est tout d'abord d'avoir un système polyphasé. Nous verrons que ce système polyphasé doit au minimum contenir deux phases. Le nombre de phases pourra être de 2 3 ou de n'importe quel autre nombre mais au minimum de 2. Ainsi nous aurons la possibilité d'avoir un champ tournant. On a une particularité avec cette conversion électromécanique qui va nous fabriquer ce champ tournant. Cette particularité est très très extraordinaire. Finalement quand on compare à toute conversion chimique ou autre type de conversion, c'est le fait que on a une réversibilité parfaite. C'est à dire que l'énergie électrique va être convertie en énergie mécanique via ce champ tournant. Mais de même l'énergie mécanique peut être convertie en énergie électrique ce qui nous permet d'avoir les deux sens possibles dans cette conversion avec un niveau très élevé d'ailleurs du rendement de ces deux conversions.

Notes

Summary



0m 38s

- Système triphasé symétrique
- 6 encoches  $\rightarrow$  3 phases
- $\rightarrow$  décalées de  $120^\circ$

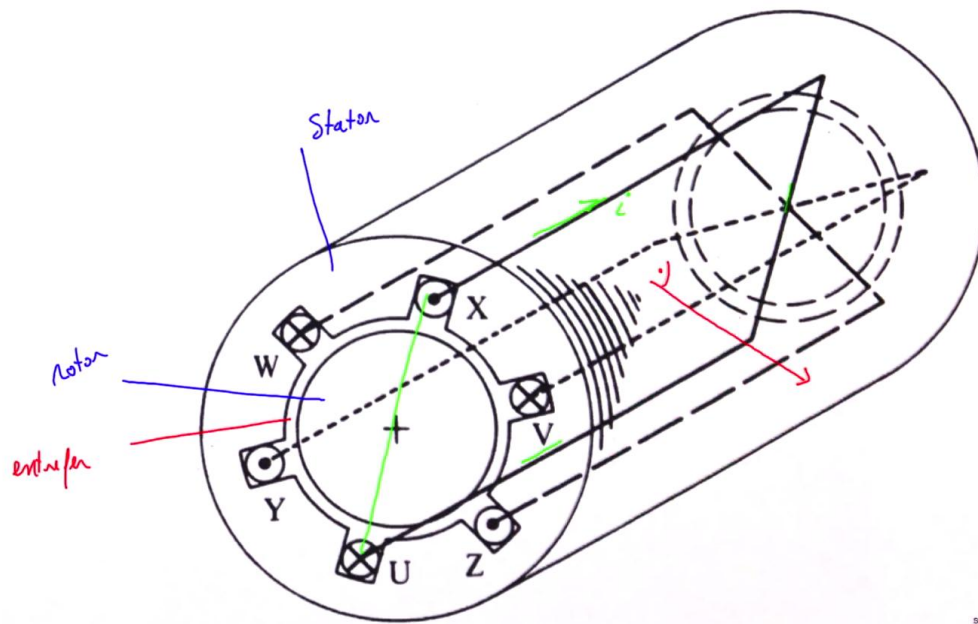
Comment maintenant générer ce champ tournant ? Cette génération du champ tournant va être faite au travers d'un exemple tout d'abord et l'exemple le plus simple possible. Cet exemple le plus simple possible c'est de prendre un système triphasé symétrique. Dans ce système triphasé symétrique, pour avoir la version la plus simple et facile d'un stator, nous allons prendre six encoches et dans ces six encoches incorporées donc trois phases. Et si l'on souhaite que ces trois phases et ces six encoches soient totalement symétriques, alors nos trois phases sont mécaniquement décalées de 120 degrés. Ainsi on fabrique la machine la plus simple la plus organisée et la plus symétrique que l'on puisse trouver.

Notes

Summary



1m 55s



Source : Traité d'Électrostatique Vol IX, Electromécanique, Marcel Jufer, PPUR, 1998

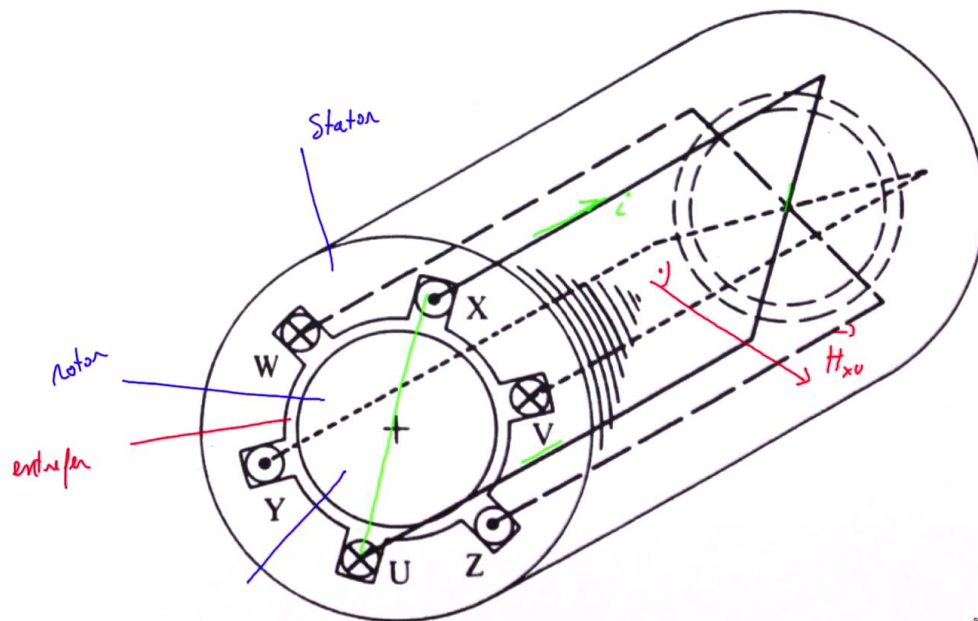
Voici donc une image de ce stator donc je vous présente un tout petit peu les différents éléments qu'on peut voir ici. Tout d'abord un stator sur lequel sont montés nos phases. On voit les six encoches ici x v z u y et w. On a un rotor au centre qui va pour le moment ne pas trop nous intéresser. Puisque ce qui va nous intéresser maintenant c'est la génération du champ tournant dans l'entrefer entre le stator et le rotor. cet entrefer et donc ici et ce que nous voyons là par exemple entre X et U, nous avons notre première phase. Donc imaginer ici un certain nombre de spires qui circulent dans cette encoche X et U pour former une bobine que l'on va appeler ici une phase. On a donc comme indiqué précédemment trois phases et chacune de ces phases est décalée de 120 degrés. Maintenant sachant qu'on a une bobine ici entre X et U qui se referme ici devant comme indiqué si je fais passer maintenant du courant dans cette bobine X U j'ai un plan formé par cette bobine est de ce plan, nous savons que si une bobine est parcourue par un courant on va alors générer un champ magnétique qui va être créé par cette bobine. Si j'essaye de dessiner ce champ tournant il va être perpendiculaire au plan donc, par exemple, ici perpendiculaire au plan de la bobine.

Notes

Summary



2m 54s



Source : Traité d'électrotechnique Vol IX, Electromécanique, Marcel Jufer, PPUR, 1998

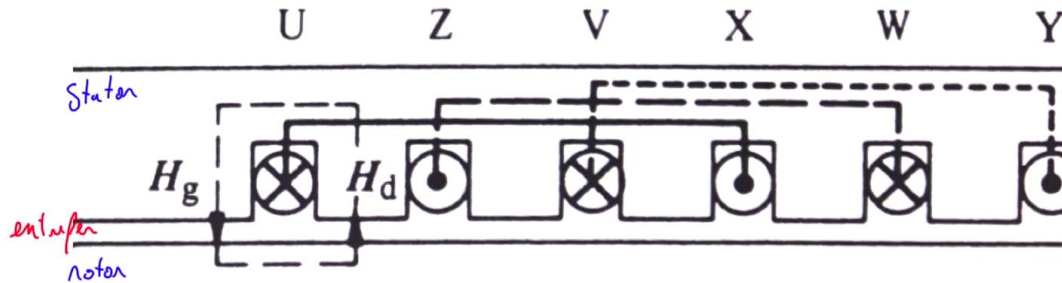
Si on est parcouru par un courant  $I$  on a un vecteur ici  $H$  qui est généré par l'encoche, appelons ceci  $x u$ . Ce champ  $H \times U$ , nous allons le calculer tout à l'heure, va dépendre évidemment du courant qui circule dans cette bobine. Et comme nous allons avoir trois bobines déphasé de 120 degrés nous aurons trois champs magnétiques qui vont s'additionner s'ajouter et nous allons calculer la résultante dans l'entrefer. Mais ce type de dessin est relativement complexe puisqu'on doit imaginer toutes ces choses dans un environnement tridimensionnel 3D. Ce que je vous propose c'est pour simplifier la lecture on va couper le stator à un endroit par exemple défini entre  $y$  et  $u$ . Imaginons prendre des ciseaux, en couple stator, et on va dérouler ce stator pour le mettre à plat.

Notes

Summary



4m 48s



Hypothèses :  $\mu_{\text{fer}} = \infty$   
 champ  $\perp$  à la surface  
 pas de fuites et franges

Source : Traité d'électrotechnique, Marcel Jullien, PPUR, 1998

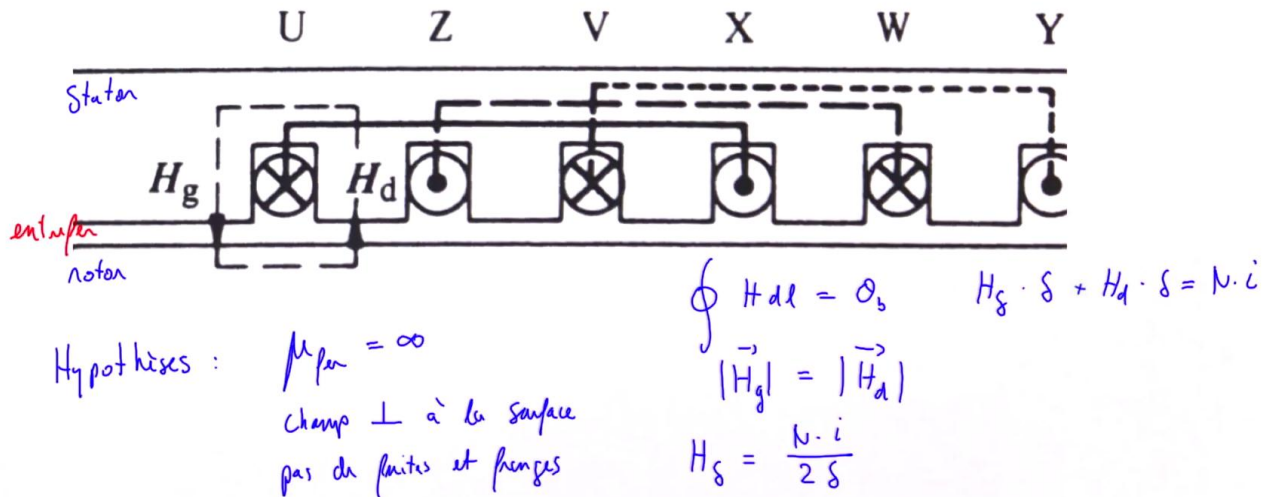
Voici donc notre stator déroulé entre u et y avec nos encoches ici présentes et donc plus facilement nous allons pouvoir ici nous concentrer sur les éléments importants. Et ce que je souhaite faire avec vous c'est maintenant calculer le champ magnétique ce fameux champ magnétique que je vous ai montré tout à l'heure dans le plan de la bobine X U. Comment le calculer analytiquement ? Et on l'a dessiné ici on a un champ magnétique qui va tout d'abord à gauche qui remonte ensuite à droite et qui se referme sur cette boucle. Donc je rappelle qu'ici nous avons le stator et qu'ici nous avons le rotor et que là nous avons l'entrefer. Pour les calculs, nous allons faire un certain nombre d'hypothèses. La première hypothèse c'est que pour faire ce calcul nous allons considérer le fer comme idéal donc la perméabilité du fer dans notre système est considérée comme infinie. En somme seule l'entrefer va être pris en compte ici. Ensuite le champ magnétique ou les lignes de champ seront perpendiculaires à la surface. Et enfin nous n'avons pas de fuite et pas de franges. Ceci nous permet de simplifier grandement le calcul pour déterminer ce champ magnétique  $H_g$  ou  $H_d$ . En somme quel est le champ qui circule dans notre fer.

Notes

Summary



5m 53s



Source : Traité d'électrotechnique, Marcel Jufer, PPUR, 1998

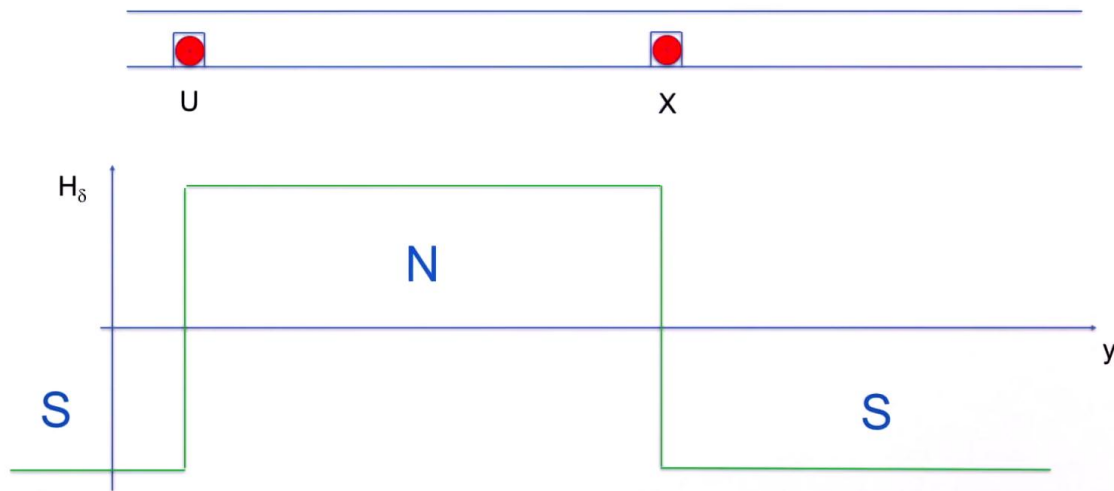
Pour ce faire on applique la loi Ampère qui nous dit que la somme des HDL est égale au potentiel magnétique dans la bobine. En fait cette somme et cette somme étant donné qu'on ne tient pas compte du fer se résume à la composante gauche du champ magnétique entrefer Delta Plus à composante droite du champ magnétique entrefer Delta et ce potentiel dans la bobine c'est n fois i. On a ici ensuite la possibilité de calculer ce champ. H G qui est le même que le champ HD. Donc ce que l'on peut écrire c'est que HG est égal au champ H D. Et ceci nous permet d'écrire finalement que tout ceci est égal à H delta aux champs dans l'entrefer et ce H Delta est égal à la norme au nombre de spires fois le courant I divisée par deux Delta. Voilà finalement l'amplitude de mon vecteur qui est créée par la bobine X U. Chaque bobine aura bien sûr un champ magnétique différent. On a trois phases. On aura donc trois champs magnétiques. Mais comme on va avoir un système symétrique nous aurons à chaque fois le même courant et donc la même valeur de la grandeur de ce vecteur h Delta.

Notes

Summary



7m 45s



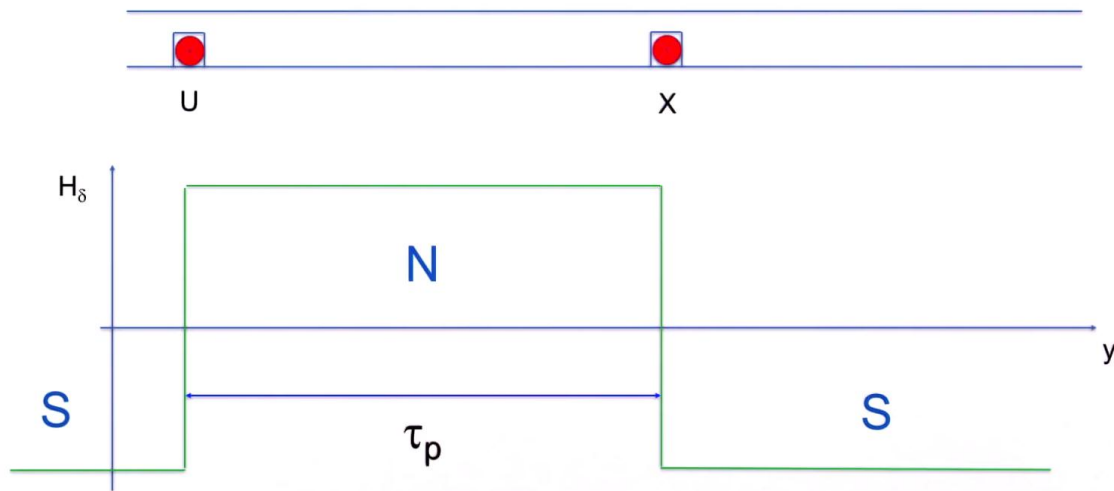
Pour mieux visualiser ce qui va se passer maintenant, je vous propose une petite analyse schématique pour comprendre et par là aussi nous allons définir un certain nombre de choses ce qui se passe lorsque du courant circule entre l'encoche u et l'encoche X que j'ai simplifié ici sur ce schéma et j'ai enlevé les autres encoches qui sont représentées sur le dessin précédent. Je dessine ici un graphique, un graphique avec en abscisse y c'est à dire l'abscisse curviligne. Donc je me déplace le long de l'entrefer lorsque je vais à droite de l'abscisse ici de ce graphe. Et en ordonnée je montre le champ magnétique que l'on voit dans l'entrefer lorsqu'on est un petit bonhomme qui se déplace sur l'entrefer. En faisant circuler un courant électrique entre u et x on crée donc un champ magnétique. Voilà ce champ magnétique créé c'est à dire entre U et X. En nous baladant dans un certain sens on voit une certaine polarité du champ magnétique et quand on voit les 180 autres degrés mécaniques sur lequel on se balade, on voit l'autre composante de la polarité du champ magnétique. Alors par exemple ici, j'ai défini que lorsque l'on était positif on était avec un nord et quand on était négatif on était avec un Sud évidemment.

Notes

Summary



9m 22s

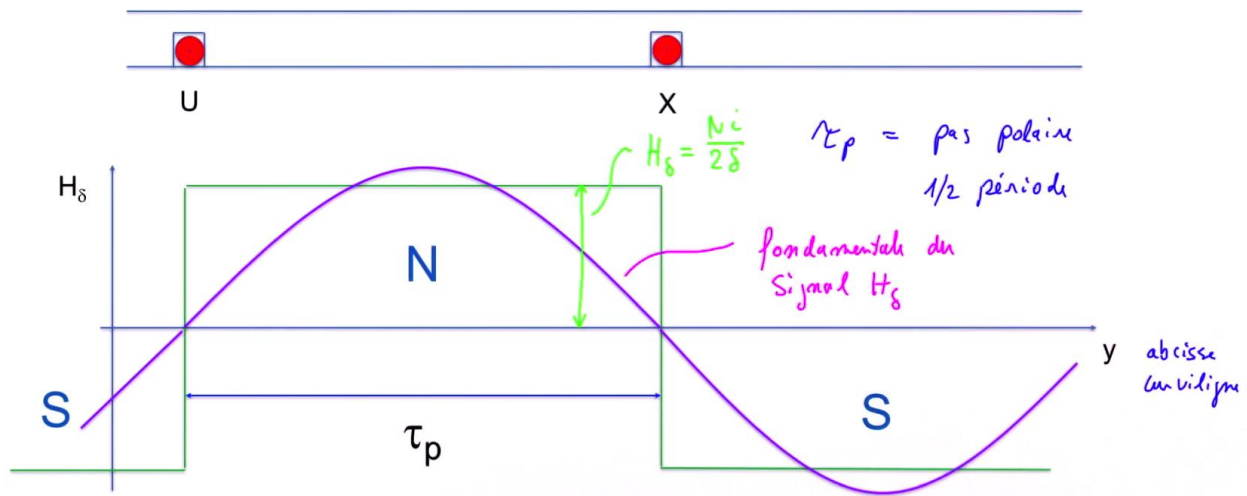


Le contraire est aussi possible. C'est une manière de vous expliquer que pendant la moitié du parcours sur 180 degrés mécaniques on a fabriqué un nord et évidemment on a sur l'autre partie un sud. Maintenant en conversion électromécanique, d'ailleurs comme dans tout autre discipline, il est assez difficile d'utiliser des fonctions carrées puisqu'on va avoir des effets liés aux transitions extrêmement brutales entre le Sud et le Nord. Comme dans toute analyse de signaux, on a la possibilité d'utiliser la transformée de Fourier et donc d'utiliser le fondamental par exemple de ce signal qu'on a ici en vert. On peut encore ajouter quelque chose. La largeur du Nord et la largeur du Sud définit ce que l'on appelle un pôle puisqu'on a ici le pôle Nord et le pôle Sud. On va appeler ce pôle  $Ta p$  et  $Ta p$  par définition va être le pas polaire. On voit qu'en faisant 360 degrés le long de l'entrefer on a balayé donc deux pas polaires un Nord et un Sud. Le signal carré que nous avons ici nord sud qui représente le champ magnétique se prête extrêmement peu à un calcul analytique pour faire finalement plus tard le calcul du champ tournant.

Notes

Summary





Nous avons la possibilité sachant que tout signal peut être analysé par une analyse de Fourier, on a la possibilité d'extraire de ce signal le fondamental et le fondamental n'est autre qu'un signal sinusoïdal ou Co sinusoïdal bien plus simple à manipuler avec les calculs. C'est ce que nous allons faire ici et j'ai dessiné le signal fondamental de notre signal vert qui est ici un sinus qui représente la première harmonique du signal vert représentant le champ magnétique  $H_G$ . On a donc ici par définition, on peut l'écrire : Le pas polaire. Et ce pas polaire représente une demi période du signal. En l'occurrence ici on a deux pôles un Nord un Sud et on a balayé tout l'entrefer pour faire de U à X et revenir à U. On va aussi indiquer ici que ceci est la fondamentale du signal de  $H_{\Delta}$ . Et encore pour préciser que X est l'abscisse curviligne. On peut encore dire que la valeur maximum que l'on a ici de ce signal carré, nous la connaissons, puisque c'est celle que nous venons de calculer. Dans la présentation juste avant c'est à dire que cette hauteur n'est autre que mon  $H$  dans l'entrefer que nous avons calculé comme étant le nombre de spires fois le courant sur  $2\Delta$ .

Notes

Summary



$$H_{ux} = \frac{4}{\pi} H_{\delta} \sin \frac{\pi y}{\tau_p} = \frac{4}{\pi} \frac{N \cdot i}{2\delta} \sin \frac{\pi y}{\tau_p}$$

$$i = \hat{I} \sin \omega t$$

$$H_{ux} = \frac{4}{\pi} \frac{N \hat{I}}{2\delta} \sin \frac{\pi y}{\tau_p}$$



Qu'est ce que c'est que cette équation fondamentale. Ce signal sinusoïdal qui représente le champ magnétique dans l'entrefer pour une phase donnée. Si j'écris ceci j'obtiens ce champ magnétique entre U et X qui vaut mon H Delta crête que nous avons calculé précédemment. Et maintenant la table numérique me donne l'indication pour le fondamental d'un signal carré qui vaut 4 sur Pi sinus de Pi y sur Ta p. Maintenant on a évidemment ce champ magnétique H Delta qui dépend du courant alors je vais remplacer maintenant ici par la valeur que nous avons calculé précédemment. Et cette valeur c'est n fois i sur deux Delta multipliée toujours par mon sinus y Pi sur Ta p. Maintenant le courant i peut être constant ou peut être variable il peut être par exemple sinusoïdal. Admettons que notre courant I dans cette phase soit de type I crête sinus Omega t. Alors mon champ magnétique fondamental dans l'entrefer va se transformer. Je précise encore on va mettre un petit 1 ici sur l'équation pour bien indiquer qu'on parle du fondamental. Donc mon H u x fondamental devient 4 sur Pi, la constante reste devant, n fois mon i crête cette fois ci sur 2 Delta qui multiplie sinus Pi y sur Ta p.

Notes

Summary



$$H_{ux} = \frac{4}{\pi} H_0 \sin \frac{\pi y}{2p} = \frac{4}{\pi} \frac{N \cdot i}{2\delta} \sin \frac{\pi y}{2p}$$

$$i = \hat{I} \sin \omega t$$

$$H_{ux} = \frac{4}{\pi} \frac{N \hat{I}}{2\delta} \sin \frac{\pi y}{2p} \cdot \sin \omega t$$

Onde pulsante

position  
mécanique

temps  
électrique

Et maintenant on a encore la variation du courant sinus  $\Omega t$ . Qu'est ce qu'on voit ici on voit tout d'abord une dépendance ici à la mécanique ou à la position mécanique puisque cette variable se sinus  $\pi y$  sur tout dépend de l'endroit où on se trouve dans l'entrefer puisque l'on a  $y$  qui est l'abscisse curviligne et ensuite ici on a une partie qui dépend du temps et de finalement du signal électrique. C'est en effet l'alimentation de la phase qui est ici représentée par ce sinus  $\Omega t$ . Ce signal que nous avons là est une onde pulsante. C'est à dire qu'elle reste à un endroit donné mais elle Pulse avec le temps grâce ou à cause de ce sinus  $\Omega t$  en deuxième partie de l'équation liée à l'alimentation que nous mettons dans la phase. Alors que nous allons faire maintenant c'est avec cette première équation de la première phase imaginer ce qui va être dans les deux autres phases et voir ce qui se passe lorsqu'on additionne ces trois ondes pulsantes à l'intérieur de l'entrefer.

Notes

Summary

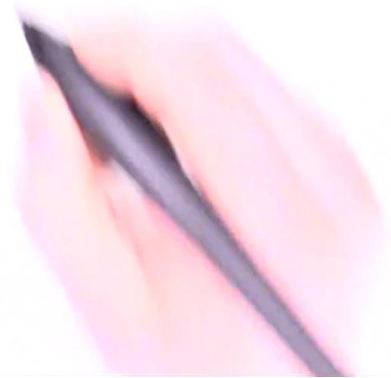


$$^1 H_{ux} = ^1 \hat{H} \sin \frac{\pi y}{\lambda_p} \cdot \sin \omega t$$

on va prendre les 2 autres phases, et les alimenter avec 2 autres sinus mais déphasés de 120° chacun

$$^1 H_{uy} = ^1 \hat{H} \sin \left( \frac{\pi y}{\lambda_p} - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$^1 H_{uz} = ^1 \hat{H} \sin \left( \frac{\pi y}{\lambda_p} - \frac{4\pi}{3} \right) \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$



Je réécris donc ici maintenant l'équation que nous venons de calculer pour la voir en clair et pour simplifier l'écriture l'amplitude je la note uniquement H crête comme ceci alors on a notre sinus puis y sur Ta p multiplié par mon sinus Oméga t. Qu'en est il maintenant dans les deux autres phases. Donc on va prendre les deux autres phases et les alimenter avec deux autres sinus mais déphasé de 120 degrés chacun. Alors pour la deuxième équation, donc H v y. On obtient toujours la même amplitude mais sinus de Pi y sur Ta p. Et là on a vu que mécaniquement ma phase était décalée de 120 degrés donc je peux écrire ici décalé et en plus on vient de le dire alimenté avec un sinus décalé également de 120 degrés. Et puis la dernière phase H w z va nous donner le même type d'équation mais décalée encore 120 degrés. Pi y sur Ta p moins 4 pi sur 3. Et là l'alimentation Oméga t moins 4 pi sur 3. Ce que je souhaite faire maintenant c'est additionner ces 3 ondes pulsantes. Comme on l'a dit précédemment chacune de ces composantes crée en fait une onde le stationnaire qui ne bouge pas.

Notes

Summary



17m 52s

Sachant que  $\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} (\cos(x-y) - \cos(x+y))$

$$H_u = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t\right) \right]$$

$$H_v = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t\right) + \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t\right) \right]$$



Mais nous savons grâce à la trigonométrie un produit de sinus, sinus x fois sinus y peut aussi être écrit comme une somme de cosinus mais dont les arguments se soustraient ou s'additionnent. Alors vous allez me dire ça rend l'équation plus compliquée mais vous allez voir ça va nous permettre de faire un certain nombre de simplifications. Alors tout d'abord ma première équation va se transformer ainsi je vais l'appeler juste H U. Maintenant, toujours fondamentale c'est une demi qui vient devant. C'est la valeur crête puis on a mon sinus X et sinus y alors le sinus X c'est p sur Ta p, y c'est Oméga t. On doit donc d'abord faire la soustraction. Donc on a cosinus de Pi y sur Ta p moins Oméga t moins cosinus de la Somme. Donc Pi y sur Ta p plus Omega t. Vous allez me dire ça c'est encore plus compliqué. Attendez vous allez voir avec les deux autres ce que cela nous réserve comme surprises. On a ensuite H v qui va nous donner le même début. Alors on a le cosinus avec la soustraction des arguments est ce qui va être particulier ici c'est qu'on a pi y sur Ta p moins 2 Pi sur 3 mais de même on a Oméga t moins 2 pi sur 3. En soustrayant les deux Pi sur 3 ce décalage de 120 degrés disparaît.

Notes

Summary



Sachant que  $\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} (\cos(x-y) - \cos(x+y))$

$$H_u = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t\right) \right]$$

$$H_v = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

$$H_w = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} + \omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

+

$$H_{tot} = \frac{3}{2} \hat{H} \cos\left(\frac{\pi y}{\tau_p} - \omega t\right) - 0$$

onde magnétique progressive

onde rétrograde

Il reste p y sur Ta p moins Omega t moins cosinus alors là on a la somme de tout pi y sur Ta p plus Oméga t moins 4 pi sur 3. Et enfin la dernière. H W, même début. Et là aussi le cosinus de Pi y sur Ta p moins Omega t voit son argument de 4 pi sur 3 disparaître puisqu'on l'a à la fois dans la partie de position de la partie du temps moins cosinus du doute, donc Pi y sur Ta p plus Omega t moins 2 pi sur 3. Maintenant je fais la somme de tout ceci pour finalement calculer le champ magnétique total. Donc ici je fais un grand plus. Qu'est ce que j'obtiens ? Tout d'abord les trois demi ici de H. Et vous voyez que les trois cosinus dans la première partie de l'équation sont les trois fois les mêmes. Donc j'ai mis trois demi de H de cosinus de Pi y sur Ta p moins Oméga T moins et là j'ai 3 cosinus décalés de 120 degrés chacun. Si je additionne trois cosinus décalés de 120 degrés chacun j'obtiens 0. Et voilà la chose extraordinaire. On obtient donc une onde magnétique qui devient progressive. Ceci est une onde magnétique progressive. Ou autrement dit une onde tournante. Cette onde tournante est maximisée ici et on a une autre partie moins 0 qui est minimisée ou qui est supprimée on l'appelle l'onde rétrograde.

Notes

Summary



Sachant que  $\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} (\cos(x-y) - \cos(x+y))$

$$H_u = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\lambda_p} - \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{\lambda_p} + \omega t\right) \right]$$

$$H_v = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\lambda_p} - \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{\lambda_p} + \omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right]$$

$$H_w = \frac{1}{2} \hat{H} \left[ \cos\left(\frac{\pi y}{\lambda_p} - \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi y}{\lambda_p} + \omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

+

---


$$H_{tot} = \frac{3}{2} \hat{H} \cos\left(\frac{\pi y}{\lambda_p} - \omega t\right) - 0$$

onde magnétique progressive

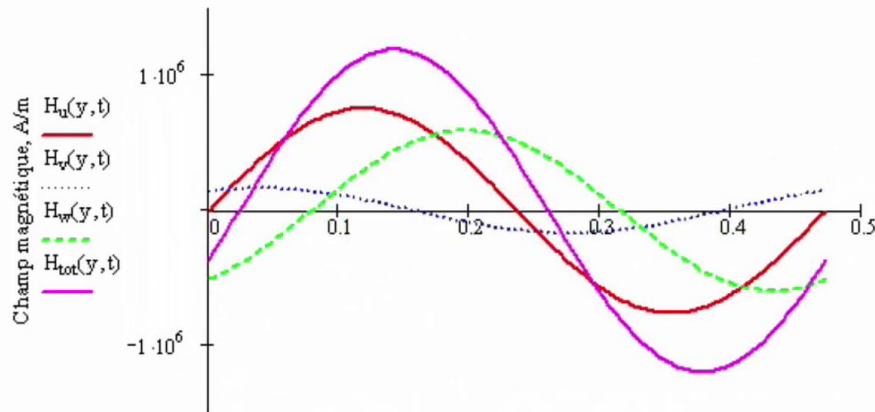
onde rétrograde

Si elle était présente, elle créerait alors une partie de champ magnétique qui va dans le sens opposé. Evidemment ce n'est pas ce qu'on souhaite, et dans le cas parfait où tout est symétrique on le voit l'onde magnétique progressive s'additionne parfaitement donne le maximum alors que l'onde magnétique rétrograde est ici nulle.

Notes

Summary





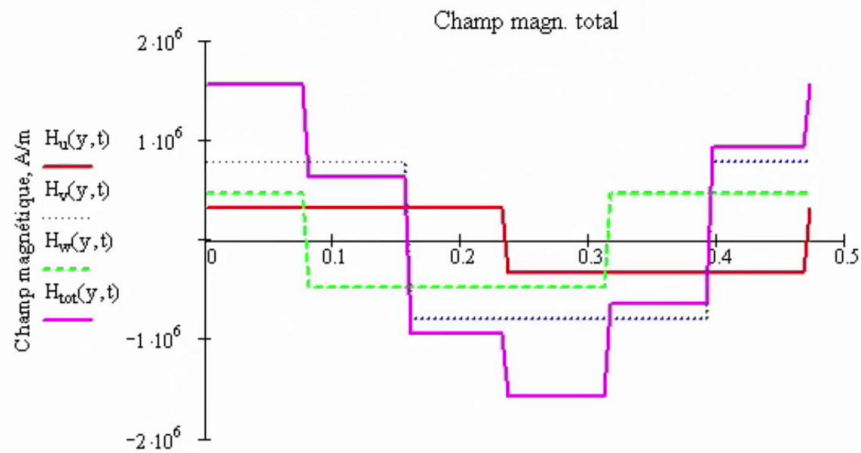
Ici je vous représente les trois champs magnétiques pulsants, ces trois équations  $H_U$ ,  $H_V$ ,  $H_W$  que j'ai représenté par trois couleurs différentes. Et ce que vous voyez ici ce sont ces trois formes ou signaux qui varient dans le temps à cause du  $\Omega t$  ou du sinus  $\Omega t$ . Mais vous voyez que ces trois ondes restent au même endroit, elles ne bougent pas. C'est pour ça qu'on les a appelés des ondes stationnaires. Ces trois ondes stationnaires sont décalées dans l'espace de 120 degrés et sont décalées dans le temps de 120 degrés. Si maintenant je vous présente la somme de ces trois donc la composante  $H$  totale que nous avons calculée précédemment. Vous avez ici en violet la composante totale. Et ici vous avez clairement cette onde magnétique progressive ou onde tournante ou champ tournant qui est la somme des trois composantes stationnaires. Ici je l'ai fait pour un courant sinusoïdal. Il se peut aussi qu'on ait un courant qu'il soit différent, d'une différente forme et je vous propose ici par exemple de voir ce qui se passe lorsque je mets un signal carré mais variable dans le temps.

Notes

Summary



24m 37s



Vous avez ici ce signal carré pour chacune des phases. Là aussi on retrouve un champ pulsant. Chacune de nos phases crée une onde stationnaire mais non tournante. Mais lorsqu'on fait la somme là aussi on va avoir une onde un peu cabossée. C'est clair. C'était plus joli avec le sinus mais qui est néanmoins progressive et qui avance dans l'espace. Donc ce qu'on voit ici c'est que quoi qu'il arrive la somme de 3 ondes stationnaires va nous donner une onde tournante.

Notes

Summary



26m 06s



- Un minimum de 2 phases est nécessaire pour obtenir un champ tournant
- On cherche à maximiser l'onde magnétique progressive et minimiser l'onde magnétique rétrograde
- Le champ magnétique tournant est une onde progressive

Voilà pour conclure on voit que la création de ce champ magnétique se fait lorsqu'on a au minimum deux phases. On a fait tout notre calcul ici avec un système à trois phases. Vous pourrez faire un exercice pour voir par vous même comment calculer ce déphasage pour deux phases. On va chercher chaque fois à maximiser l'onde magnétique progressive et à minimiser l'onde rétrograde. Et enfin ce que l'on a vu ici c'est que c'est ce champ magnétique ou ce champ tournant est en fait en terme physique, une onde progressive. Merci.

Notes

Summary



26m 41s