

$$W_{mag} = \int_{\psi} i \, d\psi = \int_{N\phi} \frac{\theta}{N} N \, d\phi = \int \theta \, d\phi$$

$\psi = N\phi$
 $N' = \theta$

Bonjour. Nous arrivons au bout de notre quête d'une expression générale de l'énergie magnétique. Dans cette leçon, nous allons encore généraliser les expressions obtenues la dernière fois, afin de pouvoir les appliquer à n'importe quelle géométrie, d'actionneur, de transducteur ou de moteur, sans avoir besoin de considérer des flux constants. Je repars de notre expression de l'énergie magnétique, que nous avons établie la dernière fois. Puis, cette expression, elle dépend de deux grandeurs « électriques » ou dépendantes du bobinage, c'est le courant, et le flux totalisé. Si je les écris, En les remplaçant ou en fonction de grandeurs magnétiques, c'est que le flux totalisé, c'est le nombre de spires fois le flux, et puis que le produit du nombre de spires et du courant me donnent le potentiel magnétique. J'introduis ces deux expressions dans mon expression d'énergie magnétique et j'obtiens Le courant, c'est θ/n . Puis, le flux, c'est le ψ , c'est n fois ϕ . Puis, on a fait un changement de variable. En variable d'intégration, ça va être le flux. Puis, les n se simplifient. Maintenant, j'ai une expression qui dépend de grandeurs magnétiques.

Notes

Summary



0m 04s

$$W_{mag} = \int_{\psi} i d\psi = \int_{N\phi} \frac{\partial}{\partial N} N \cdot d\phi = \int \theta d\phi$$

$\psi = N\phi$
 $N_i = \theta$



Changement de variable $\phi \rightarrow B$
 $\phi = B$

Je vais la localiser, en quelque sorte, ça veut dire que je vais la considérer au niveau d'un petit élément de mon circuit magnétique. J'ai un tout petit élément du circuit magnétique, dont la surface est dA . Je vais mettre la surface en vert. Ça, c'est dA . C'est un tout petit tube de flux dans lequel le flux est constant. Sa longueur, ça va être dl . Dans ce tube de flux, on a un flux magnétique, dont la densité est B . Induction B . Le champ magnétique qui lui est associé, c'est H . Avec une perméabilité entre les deux qui n'est pas forcément linéaire, on peut calculer $B = \mu H$, mais μ n'est pas une fonction linéaire, on est dans le cas le plus général possible. Ce qu'on va faire, c'est qu'on va essayer de faire un changement de variable pour remplacer notre variable d'intégration ϕ par B . Puis, on va écrire toutes nos expressions en fonction. Je fais un changement de variable. Et j'écris donc que si le flux $= B$. Qui est l'induction dans mon tube de flux, fois l'air du tube de flux dA , je vais avoir que la dérivée du flux ça va être égal à la dérivée de B fois mon petit élément dA .

Notes

Summary



$$W_{mag} = \int_{\psi} i d\psi = \int_{\psi} \frac{\theta}{N} N d\phi = \int \theta d\phi$$

$\psi = N\phi$
 $Ni = \theta$



Changement de variable $\phi \rightarrow B$

$$\phi = B dA \rightarrow d\phi = dB \cdot dA \quad \theta = H dl$$

$$dW_{mag} = \int_0^B H dl dB \cdot dA = \int_0^B H dB \cdot dA$$

Puis, je remplace ça dans mon équation d'énergie magnétique, L'énergie magnétique contenue dans mon petit tube infinitésimal, qu'on va appeler dW_{mag} , parce que c'est pour ce petit élément infinitésimal, ça va être l'intégrale de 0 à B. J'ai fait le changement de variable. De θ à θ , on peut le calculer à partir du potentiel magnétique aux bornes de ce petit élément. Le potentiel magnétique aux bornes de ce petit élément c'est comme par la loi d'Ampère, l'intégrale de Hdl , ou si comme dans notre cas, on suppose que le champ magnétique est constant parce que c'est tout petit. à Hdl . Je remplace. θ , c'est Hdl . Le flux, je l'ai calculé ici, c'est dB fois dA . Puis, je regroupe les termes. J'ai des termes qui sont liés à l'intégrale de 0 à B, qui est l'intégrale qui parcourt la courbe B-H. Et puis, j'ai des termes qui sont liés au fait que, je suis dans un élément de volume qui est de toute petite taille ou de taille infinitésimale dont l'aire est dA et dont la longueur est dL . Au bornes duquel on a θ , comme différence de potentiel magnétique, à l'intérieur duquel circule un flux ϕ . Si j'écris ça et que je regroupe les termes, on a une intégrale de 0 à B, de HdB . Puis, les termes de dimension, c'est dl fois dA .

Notes

Summary



5m 02s

$$W_{\text{mag}} = \int_{\psi} i \, d\psi = \int_{H\phi} \frac{\partial}{\partial N} N \cdot d\phi = \int \theta \, d\phi$$

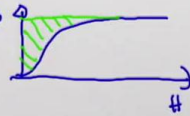
$\psi = N\phi$
 $N_i = \theta$



Changement de variable $\phi \rightarrow B$
 $\phi = B \, dA \rightarrow d\phi = dB \cdot dA \quad \theta = H \, dl$

$$dW_{\text{mag}} = \int_0^B H \, dl \, dB \cdot dA = \int_0^B H \, dB \underbrace{dl \cdot dA}_{dV}$$

$$= \int_0^B H \, dB \cdot dV$$



$$W_{\text{mag}} = \iiint dW_{\text{mag}}$$

Ça, c'est dV . C'est le volume de mon petit élément infinitésimal. Mon énergie magnétique de mon petit volume, ça va être l'intégrale de 0 à B , de HdB fois dV . Je peux le calculer en faisant l'intégrale sur ma courbe B - H . C'est vraiment le B et le H dans mon petit élément de volume infinitésimal. Chaque fois que vous avez un autre petit élément de volume infinitésimal, vous aurez bien la même courbe B - H s'il s'agit du même matériau. Mais des valeurs de B et des valeurs de H qui peuvent être très différentes d'un petit élément à un autre petit élément et donc il faudra faire l'intégrale sur le volume, c'est ce qu'on fera après. Ma courbe B - H , je la dessine. La première chose qu'il faut faire pour pouvoir calculer l'énergie magnétique contenue dans ce petit volume, c'est de faire l'intégrale. Comme la dernière fois, sur cette partie-ci de ma courbe. On a des termes qui sont vraiment les termes infinitésimaux, pas des termes globaux comme avant. J'ai fait mon intégrale. Une fois que j'ai fait ça, je peux calculer l'énergie magnétique. Là, je dois faire une intégrale sur le volume. Pour chacun des petits volumes infinitésimaux qui vont dépendre de l'endroit où je me trouve dans la géométrie.


Notes

Summary



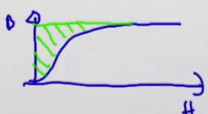
$$W_{\text{mag}} = \int_{\psi} i \, d\psi = \int_{\psi=N\phi} \frac{\partial}{\partial N} N \cdot d\phi = \int \theta \, d\phi$$

$N_i = \theta$



Changement de variable $\phi \rightarrow B$
 $\phi = B \, dA \rightarrow d\phi = dB \cdot dA \quad \theta = H \, dl$

$$dW_{\text{mag}} = \int_0^B H \, dB \cdot dA = \int_0^B H \, dB \frac{dl \cdot dA}{dV}$$

$$= \int_0^B H \, dB \cdot dV$$


$$W_{\text{mag}} = \iiint dW_{\text{mag}} \, dV$$

cas linéaire
 $B = \mu H \Rightarrow dW_{\text{mag}} = \int_0^B \frac{B}{\mu} \, dB \cdot dV = \frac{B^2}{2\mu} \cdot dV$

Co-énergie
 $dW_{\text{mag}}' = \int_0^H \theta \, dH \cdot dV$

Je pourrais mettre X,Y,Z, comme variable dépendante. Ça dépend des coordonnées qu'on veut utiliser, fois dV . Ça me donne l'énergie magnétique de mon système électromécanique. Donc je vais avoir la possibilité de faire une intégrale complète, même sur des systèmes qui sont relativement complexes. Qu'est-ce qui se passe lorsqu'on a un cas linéaire ? Dans le cas linéaire, on va avoir, que, $B = \mu H$, avec un μ constant, et donc, mon énergie magnétique, ça va être une intégrale plus simple à calculer. Avec un μ constant, avant on a supposé que ceci va être non-linéaire, si on suppose que μ est constant, on est dans le cas linéaire, l'intégrale de $B \, dB$ me donne $B^2/2$. Donc je vais avoir cette expression aussi. Qu'est-ce qui se passe maintenant pour la co-énergie magnétique ? Je ne refais pas toute la démonstration. J'écris directement le résultat dans le cas non-linéaire. Ce coup-là, on a la variable d'intégration qui n'est plus le flux mais le courant. Qu'est-ce qui est proportionnel au courant avec la loi d'Ampère ? C'est le champ magnétique et on a l'intégrale de dH fois dV . Si on regarde ce que ça donne au niveau graphique, la co-énergie magnétique, ça va être cette partie-ci de l'aire, sous la courbe.


Notes

Summary



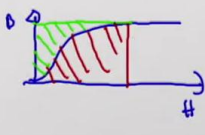
$$W_{\text{mag}} = \int_{\psi} i \, d\psi = \int_{\psi=N\phi} \frac{\theta}{N} N \cdot d\phi = \int \theta \, d\phi$$

$Ni = \theta$



Changement de variable $\phi \rightarrow B$
 $\phi = B \, dA \rightarrow d\phi = dB \cdot dA \quad \theta = H \, dl$

$$dW_{\text{mag}} = \int_0^B H \, dl \, dB \cdot dA = \int_0^B H \, dB \, \frac{dl \cdot dA}{dV}$$

$$= \int_0^B H \, dB \cdot dV$$


$$W_{\text{mag}} = \iiint dW_{\text{mag}} \, dV$$

cas linéaire
 $B = \mu H \Rightarrow dW_{\text{mag}} = \int_0^B \frac{B}{\mu} \, dB \cdot dV = \frac{B^2}{2\mu} \cdot dV$

Coénergie

$$dW_{\text{mag}}' = \int_0^H \theta \, dH \cdot dV$$

linéaire

$$dW_{\text{mag}}' = \int_0^H \mu H \, dH \cdot dV = \frac{\mu H^2}{2} \cdot dV$$

Si on est linéaire, on a notre co-énergie magnétique. On va remplacer B par μH et on a que ça vaut $H^2/2$ fois μ fois dV . Donc on se rend compte que cette expression-ci, H^2 fois μ , ou cette expression-là, B^2/μ , elles sont égales, dès le moment où on dit que B est égal à μH . Je vais avoir dans le cas linéaire ma co-énergie et mon énergie qui vont être égales. C'était assez attendu. Là, on a vraiment nos deux expressions pour l'énergie et pour la co-énergie magnétique, qu'on peut calculer dans tous les cas.

Notes

Summary





- Energie magnétique:

$$dW_{mag} = \int H dB dV$$

- Coénergie magnétique:

$$dW'_{mag} = \int B dH dV$$

La boucle est bouclée, on a obtenu une expression générale de l'énergie magnétique. Cette expression n'est pas forcément facile à appliquer sans un logiciel de calcul par éléments finis pour des systèmes saturés. Par la suite, on va utiliser des expressions globales pour calculer des forces mais ça, c'est la suite. C'est le sujet du prochain chapitre de ce cours.

Notes

Summary



13m 24s