
1.1. CAPTEURS DE CHAMP MAGNÉTIQUE

1.1.1. Champ magnétique

Un conducteur linéaire transportant un courant d'intensité I Ampères induit à une distance r un champ magnétique B donné par :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \text{ Tesla,}$$

où $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Henry/mètre, est la perméabilité du vide.

Un conducteur linéaire de longueur l parcouru par un courant I et soumis à un champ magnétique B subit une force F telle que :

$$F = BIl \cos \alpha \text{ Newton,}$$

où α est l'angle que forme le conducteur et la direction du champ B .

Une simple spire conductrice de diamètre d induit un champ axial défini par :

$$B = \frac{\mu_0 I d^2}{\sqrt{(d^2 + 4r^2)^3}} \text{ Tesla}$$

où r est la distance d'éloignement du centre de la spire.

Le champ magnétique au centre d'un solénoïde de longueur l et constitué de N spires est donné par :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \text{ Tesla.}$$

Le potentiel électrique induit par une bobine est donné par la loi de Faraday :

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt}$$

avec N : nombre de spires de la bobine,

Φ : le flux magnétique (Weber),
 A : la surface de la section droite de la bobine.

L'interaction entre un champ magnétique et la matière est décrite par les relations suivantes :

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H = \mu_0 H + J = \mu_0 (H + M)$$

où : μ_r est la perméabilité relative du milieu ($\mu_r = 1$ pour le vide),
 M le coefficient de magnétisation.

1.1.2. Matériaux magnétiques

Les matériaux ferromagnétiques contiennent des domaines pour lesquels les atomes ont la même direction de magnétisation. Cette propriété entraîne une grande perméabilité. La magnétisation est limitée par le champ de saturation B_s . Un matériau ferromagnétique perd ses propriétés magnétiques s'il est porté à une température égale ou supérieure à la température de Curie.

Dans de nombreux éléments monocristallins, cristallins, amorphes, alliages et composites, une faible coercivité et une haute perméabilité peuvent être atteintes. Ces matériaux sont dénommés matériaux magnétiques doux. Les ferrites douces ont une faible conductivité électrique, ce qui les rend bien adaptées aux applications hautes fréquences, les pertes de puissance par courants de Foucault étant faibles.

Un matériau ferromagnétique placé est attiré vers les champs forts par une force proportionnelle au produit du champ B par son gradient.

Les aimants permanents sont utilisés pour produire un champ magnétique à leur surface. Une forte coercivité et une haute rémanence de magnétisation sont requises pour ces matériaux magnétiques durs. Les aimants frittés sont principalement des alliages samarium-cobalt (SmCo) ($H_c \cong 1.2$ MA/m, $B_r \cong 0.1$ T, $|BH|_{\max} \cong 250$ kJ/m³, $T_{\max} \cong 300$ °C) et néodyme-fer-bore (NdFeB) ($H_c \cong 1.0$ MA/m, $B_r \cong 1.3$ T, $|BH|_{\max} \cong 350$ kJ/m³, $T_{\max} \cong 180$ °C). Les ferrites dures sont peu onéreuses mais moins fortes que NdFeB.

Dans le domaine des capteurs de grandeurs mécaniques et dans les systèmes actionneurs, les propriétés magnétostrictives des matériaux sont largement utilisées. Les contraintes appliquées modifient la perméabilité et inversement l'application d'un champ magnétique modifie l'état magnétique du matériau, sa forme et ses constants élastiques via le mécanisme de magnétostriction. Les fils et rubans amorphes sont particulièrement sensibles (large saturation magnétisation λ_s et faible champ de saturation H_s), par exemple Fe₅₀Co₅₀ ($\lambda_s = +70 \cdot 10^{-6}$, $H_s = 10$ kA/m). La magnétostriction est également utilisée dans les actionneurs (par exemple pour briser la glace en surface de structures par impacts mécaniques ou dans les générateurs d'ultrasons).

Capteurs de champs magnétiques

Les capteurs les plus courants sont les capteurs à effet Hall. Une technologie similaire est utilisée dans les magnétorésistances à semiconducteurs. Les autres types de capteurs sont les capteurs de type AMR et fluxgates. D'autres capteurs sont plus rarement utilisés dans les applications industrielles : les SQUID supraconducteurs extrêmement sensibles et les capteurs résonnants présentant une excellente stabilité absolue.

1.1.3. Capteurs à effet Hall

Lorsqu'un conducteur transportant un courant électrique est placé dans un champ magnétique, la distribution de potentiel dans le conducteur est modifiée. La tension mesurée dépend de l'orientation relative du courant et du champ magnétique et également de la direction suivant laquelle la mesure de tension est effectuée.

Deux cas de base sont particulièrement importants :

1. L'effet Hall. Le champ magnétique appliqué est orienté suivant l'axe z perpendiculaires à la direction x du courant. La tension de Hall est mesurée suivant l'axe y perpendiculaire aux axes x et z .

2. L'effet magnétostrictif transverse (effet Hall planaire). Le champ magnétique appliqué est orienté suivant l'axe y perpendiculaires à la direction x du courant. Les variations de tension sont mesurées suivant l'axe x . Cet effet très faible et peu stable est peu utilisé.

Bien que l'effet Hall existe dans les métaux, les composants usuels sont semiconducteurs et présentent une sensibilité bien plus élevée. Les capteurs à effet Hall sont utilisés pour mesurer des champs de 1 mT à 1 T dans une gamme de température de -100°C à $+100^{\circ}\text{C}$ et une gamme de fréquence du continu à 30 kHz. En association avec des aimants permanents, ces capteurs sont utilisés pour les mesures de position et de vitesse linéaire ou angulaire. Les capteurs à effet Hall sont largement utilisés dans les moteurs à courant continu sans contacts utilisés dans les magnétoscopes, les ventilateurs et moteurs de CD... et la mesure de courants électriques avec l'avantage de garantir une parfaite isolation galvanique entre le circuit mesuré et le circuit de mesure. Les systèmes automobiles actuels de sécurité ou les systèmes de freinage ABS utilisent des capteurs à roues dentées et pour ces capteurs la température ambiante peut atteindre 180°C avec des pointes à 200°C au niveau des jonctions.

Les capteurs intégrés à effet Hall sont robustes, insensibles aux poussières, vapeurs d'huile, bas coûts et compatibles avec les technologies des circuits intégrés (CMOS par exemple). Ils comportent le plus souvent des circuits de mise au biais, de réduction d'offset, de compensation en température d'amplification du signal et de discrimination de niveau. Les plus avancés des capteurs intègrent un traitement numérique du signal et sont programmables.

Quand une longue bande conductrice de courant est placée dans un champ magnétique uniforme, les électrons dans la bande sont affectés par la force magnétique de Lorentz, F :

$$F = q(v \times B)$$

où q est la charge élémentaire de l'électron, v la vitesse des porteurs de charges et B le champ magnétique.

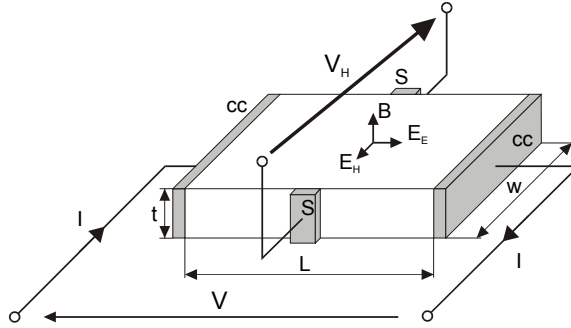


Figure 1.1. Capteur à effet Hall

La force de Lorentz due au champ magnétique est donnée par :

$$F_{mn} = q_n (v_{dn} \times B) = q_n \mu_n (E_e \times B)$$

avec :

$$v_{dn} = \mu_n E_e$$

où μ_n est la mobilité des électrons et E_e le champ électrique.

Les électrons se concentrent vers la face supérieure de la bande conductrice et par voie de conséquence, la concentration en électrons est plus faible sur la face opposée, créant ainsi un champ électrique transverse appelé champ de Hall. Ce champ E_H agit sur les électrons avec une force :

$$F_{en} = -q_n E_H$$

Pour un électron se déplaçant dans la bande suivant la direction x , ces deux forces se compensent. En combinant les équations précédentes on obtient :

$$E_H = \mu_n (E_e \times B)$$

Le champ électrique de Hall est perpendiculaire au champ électrique appliqué et au champ magnétique. L'amplitude du champ est également proportionnelle à la mobilité des porteurs. Le champ électrique externe peut être exprimé en terme de densité de courant en introduisant J_n comme suit :

$$E_H = -\mu_{Hn}(E_e \times B) = -\frac{r_H \mu_n}{q_n \mu_n}(J_n \times B) = -R_H(J \times B)$$

où est introduit le coefficient de Hall R_H , qui intègre la densité des porteurs de type n :

$$R_H = \frac{r_H}{q_n}$$

Nous disposons ainsi d'un autre critère de choix de matériaux pour réaliser un capteur à effet Hall. IL faudra utiliser un matériau semiconducteur faiblement dopé pour optimiser le coefficient de Hall. Le bon choix est un compromis entre un fort dopage pour optimiser J_n ($J_n \times B$ terme) et, à l'inverse, un faible dopage pour optimiser R_H .

La tension mesurée entre les faces de la bande conductrice est la tension de Hall, elle est donnée par :

$$V_H = \int_{S_1}^{S_2} E_H ds = \mu_{Hn} E_e B w$$

où w est la largeur de la bande et B la composante perpendiculaire du champ magnétique.

La densité de courant est :

$$J = \frac{I}{tw}$$

où I est le courant et t l'épaisseur de la bande. Ainsi la tension de Hall est donnée par :

$$V_H = \frac{R_H}{t} IB$$

Ainsi une plaque mince (petite valeur de t) produit une tension de Hall plus forte qu'une plaque épaisse. Il peu paraître surprenant que la tension de Hall ne dépende ni de la largeur ni de la longueur de la bande conductrice mais, par contre, le courant maximum admissible dépend directement de la section droite de la bande et donc de sa largeur w . La longueur du capteur n'affecte pas la valeur de la tension de Hall (sous réserve qu'il ne soit pas trop court).

La valeur typique de la tension de Hall dans un capteur standard est de l'ordre de $V_H \approx 60$ mV dans les conditions suivantes : $I = 1$ mA, $B = 0.1$ T, $n = 10^{22}$ m⁻³ et $t = 10$ μl.

1.2. CAPTEURS MAGNÉTIQUES POUR VARIABLES MÉCANIQUES

Dans cette section sont présentés les capteurs magnétiques de position et de distance, les détecteurs de proximité et de rotation. Pour terminer, sont abordés les capteurs de force, les capteurs de débit et les capteurs d'oxygène.

Les capteurs magnétiques sont utilisés pour les mesures de position linéaire et angulaires. Ils sont analogiques ou numériques. Les sorties numériques sont à deux niveaux (contacts de proximité) ou codés sur N bits (capteurs incrémentaux ou de position absolue). Ces capteurs permettent de mesurer la position d'aimants permanents (capteurs à induction), de matériaux magnétiques doux (LVDT, variation de reluctance), ou simplement de matériaux conducteurs (courants de Foucault).

Des capteurs spécifiques de position sont les compas magnétiques [63], qui utilisent le champ magnétique terrestre pour l'orientation et les systèmes de recherche [64], qui utilisent un champ magnétique artificiel pour l'orientation et la position. Les capteurs magnétiques pour la mesure de forces et de torsions utilisent l'anisotropie magnétique induite.

Capteurs de position à aimants permanents

Ce type de capteur mesure le champ d'un aimant permanent qui peut être attaché à la cible.

Suivant une variante, l'aimant est solidaire du capteur de champ et la cible est constituée de matériau ferromagnétique avec des pignons. Des capteurs à effet Hall, des AMR, des GMR ou des magnéto-résistances à semi-conducteurs sont utilisés pour mesurer les variations de champ dues aux mouvements des aimants ou des pignons.

1.2.1. Capteurs à courants de Foucault

La cible mesurée doit être conductrice mais pas nécessairement ferromagnétique. La bobine sensible alimentée par un oscillateur génère un champ magnétique alternatif. La bobine est généralement accordée par une capacité en parallèle. Le circuit LC oscille à la fréquence de résonance et si la cible conductrice est présente, les courants de Foucault créent un champ magnétique secondaire qui agit en opposition du champ de la bobine, ce qui entraîne une décroissance de l'amplitude de l'oscillateur.

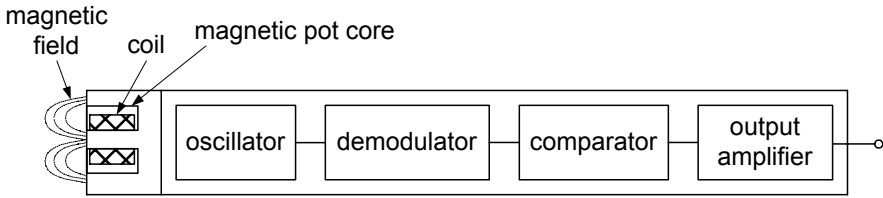


Figure 1.2. Capteur à courants de Foucault

1.2.2. LVDT

Le *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) est basé sur une variation du facteur de couplage entre les enroulements primaires et secondaires induits par le déplacement d'un noyau ferromagnétique. La configuration du capteur est montrée figure 1.3. Lorsque le noyau est en position centrale, l'enroulement primaire est également couplé avec les enroulements secondaires. Les enroulements secondaires étant connectés en opposition, le signal de sortie est nul. Lorsque le noyau se déplace, le couplage est déséquilibré entre les deux secondaires. Il en résulte un signal d'amplitude proportionnelle au déplacement, pour de petits déplacements. Le sens de déplacement est déterminé par analyse de la phase du signal de sortie par rapport à la référence de phase de l'onde excitatrice. Une différence de phase de 180° correspond à un changement de sens de déplacement.

Le domaine de mesure standard s'étend de $200\ \mu\text{m}$ à $50\ \text{cm}$. En pratique, la résolution peut être meilleure que $0.1\ \%$ ou inférieure à $1\ \mu\text{m}$. La fréquence d'excitation est comprise entre $50\ \text{Hz}$ et $20\ \text{kHz}$. La sortie du capteur est généralement obtenue par un PSD (*Phase Sensitive Detector*) et quelquefois traité par un processeur radiométrique. L'ensemble de l'électronique de traitement et d'excitation peut être intégrée dans le corps du capteur.

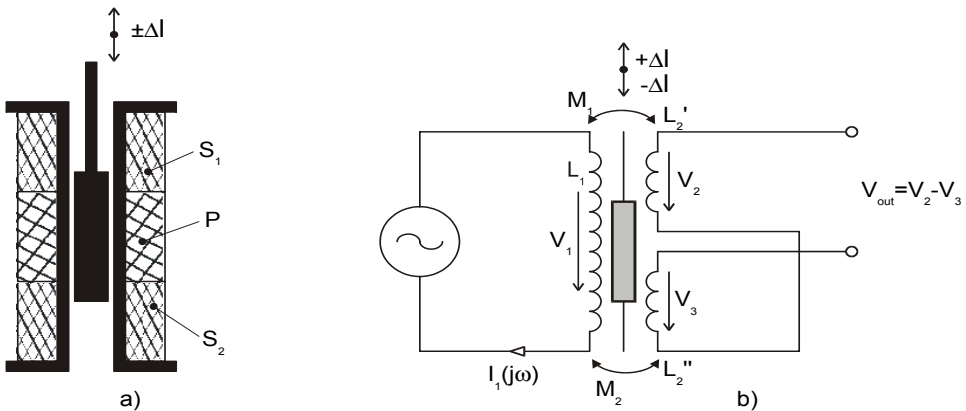


Figure 1.3. LVDT : a) Section coupe, b) Schéma électrique

1.2.3. Capteurs à reluctance variable

Le principe des capteurs à variation de reluctance est basé sur la variation de la distance entre pôles dans un circuit magnétique. Bien que moins précis que les capteurs de type LVDT, ils sont souvent utilisés avec des transducteurs mécaniques pour mesurer la pression, les déformations, les forces, torsions et autres paramètres mécaniques qui peuvent être transformés en déplacements mécaniques, compte tenu de leur configuration.

1.2.4. Capteurs de rotation

Ces capteurs sont produits et utilisés compte tenu de leur aptitude à fonctionner dans des conditions extrêmes, étant plus robustes que les capteurs à codage optique.

Les synchros sont des éléments électromécaniques qui reproduisent à distance la position du rotor. Ils sont constitués de trois enroulements disposés 120° . Ils combinent les propriétés de capteur et d'actuateur : une de leurs applications typiques est le contrôle de rotateur d'antenne.

Les résolveurs possèdent deux enroulements à 90° . Certains résolveurs numériques produisent des signaux (tensions) en quadrature (sinus/cosinus). Dans les résolveurs sans contacts un transformateur de rotation est utilisé pour alimenter le rotor. Les résolveurs peuvent supporter des températures de 20 K à 200°C , des niveaux de radiation de 10^9 rads, des accélérations de 200 g (canons de marine), le vide et des pressions extrêmes.

Inductosyn est un capteur linéaire similaire au résolveur. Il est constitué d'une règle et d'un curseur mobile contenant des bobinages aplatis. Les deux enroulements mobiles sont décalés d'un quart de la période mécanique du système. Le déplacement est mesuré par le couplage inductif entre les deux bobines. Inductosyn possède les avantages des capteurs incrémentaux (incrément d'un quart de période) et des capteurs analogiques (la réponse sinusoïdale en tension permet une mesure fine par interpolation avec une résolution pouvant atteindre $1/65000^{\text{ième}}$ de la période).

1.2.5. Capteur de position magnétostrictif

Les capteurs de position magnétostrictifs mesurent le temps de vol d'un train d'impulsions pour déterminer la position d'un aimant permanent mobile. L'élément sensible est un fil ou un tube (servant de guide d'onde) en matériau magnétostrictif. Le capteur est basé sur l'effet Wiedeman : si le courant passe dans le guide d'onde et qu'un champ magnétique continu et perpendiculaire est présent, une force de torsion est exercée sur le guide d'onde (figure 1.4).

Le principe du système de mesure est le suivant : lorsqu'un pulse de courant est appliqué, la force de torsion est générée dans la zone où se trouve l'aimant permanent et se

déplace à la vitesse de ~ 3 km/s le long du guide d'onde et est détectée par une petite bobine à induction placée en tête du capteur. L'hystérésis peut être aussi faible que $0,4 \mu\text{m}$, la linéarité intrinsèque est de l'ordre $0,02\%$ pleine échelle. Certains capteurs ont un système de linéarisation et de compensation en température intégré. La longueur maximum de ces capteurs est de 4 mètres.

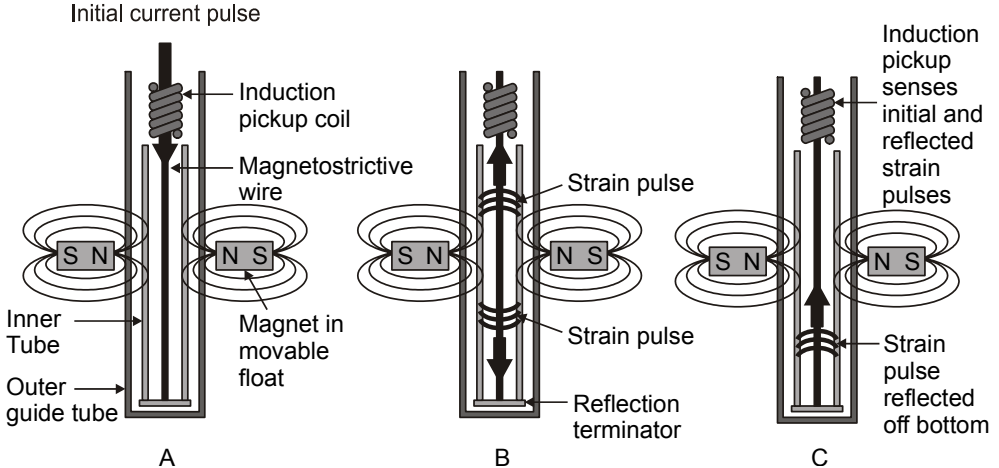


Figure 1.4. Capteurs de position magnétostrictifs

1.2.6. Contacts de proximité

Un contact de proximité peut être obtenu à partir de n'importe quel capteur de champ magnétique et d'un comparateur. De nombreux contacts sont basés sur l'effet Hall. Certains de ces contacts fonctionnent à variations de reluctance. Tous ces capteurs et contacts réagissent uniquement aux cibles ferromagnétiques avec une exception pour les contacteurs à courants de Foucault qui réagissent avec les matériaux conducteurs. Nous mentionnons plus bas deux capteurs très importants ayant des sorties naturellement bipolaires : les contacts Reed et les capteurs de Wiegand.

Contacts Reed

Ces contacts sont très simples, peu onéreux et totalement passifs. Ils sont constitués de deux bandes de matériaux magnétiques doux ou semi-durs scellées dans un tube de verre rempli de gaz neutre. On distingue deux types de contacts : les contacts normalement ouverts qui se ferment pour une valeur de champ prédéfinie par la force magnétique attractive entre les deux bandes et les contacts normalement fermés. Les deux types de contact présentent de l'hystérésis et la zone de contact présente une forme assez complexe (figure 1.5).

Les contacts de haute sécurité "équilibrés" utilisent deux contacts Reed, un normalement ouvert et un normalement fermé, à proximité de l'aimant. Si l'aimant se

déplace, un des deux contacts change d'état. Les contacts normalement ouverts sont généralement couplés avec une résistance qui permet de contrôler la continuité des fils de liaison.

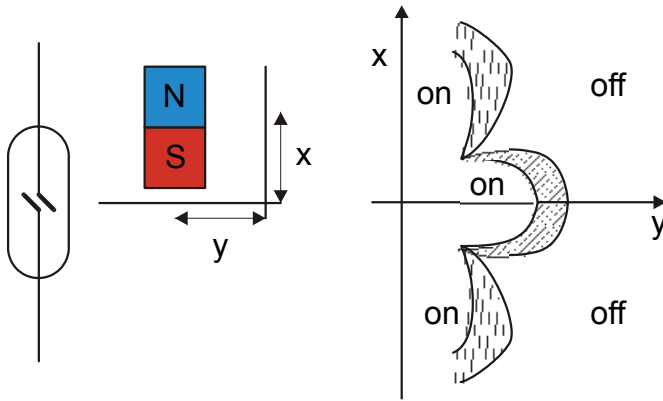


Figure 1.5. *Contacts Reed : zones de commutations pour un aimant parallèle à l'axe du capteur*

Capteurs de Wiegand

Un capteur de Wiegand produit un pulse haute tension lorsque le champ magnétique atteint un seuil donné. Le pulse de tension est indépendant des variations dynamiques du champ et le capteur est totalement passif, avec seulement une entrée et une sortie. Le capteur est constitué d'un fil de 0.3 mm en Vicalloy (Co52Fe38V12) torsadé. Cette configuration entraîne des déformations plastiques dans la zone de haute coercivité (partie externe) et des contraintes élastiques dans la partie centrale. Le pulse de tension est créé par une large variation de type Barkhausen au retournement de magnétisation de la partie centrale.

1.2.7. Débitmètre magnétique

Le débitmètre magnétique fonctionne suivant un principe proche de l'effet Hall : les ions présents dans le fluide sous contrôle se déplaçant à une vitesse v dans un champ magnétique orthogonal au déplacement sont déviés par la force $F_m = q.v.B$ orthogonale au champ et au déplacement du fluide. Les ions défléchis créent un champ électrique qui induit une force électrostatique $F_e = q.E$ en opposition. Les deux forces s'opposent et se compensent lorsque :

$$q v B = q E = q \frac{U}{D} ; \quad U = D B v$$

où D est la distance entre les deux électrodes et U la tension induite entre ces deux électrodes.

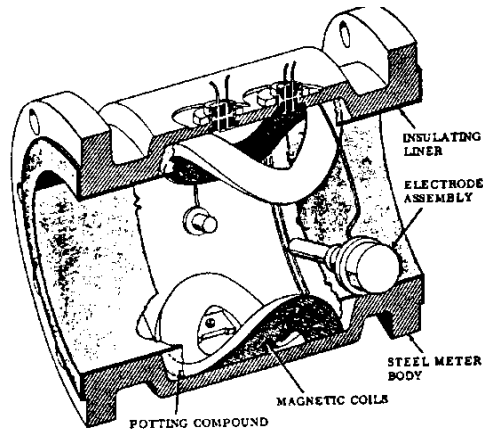


Figure 1.6. Débitmètre à induction

Ce principe de mesure implique des fluides conducteurs chargés en ions. L'utilisation d'un champ continu est à proscrire pour éviter les phénomènes d'électrolyse et de corrosion électrochimique. Généralement, le champ est modulé en ondes carrées et est créé par une bobine en forme de selle. La tension induite est très faible et le câble de liaison aux électrodes doit être soigneusement protégé contre les interférences.

Les débitmètres à induction sont également sans contacts lorsque les électrodes de mesure ne sont pas directement en contact avec le fluide. Ces capteurs sont généralement moins précis, mais sont immunes aux dégradations par effets corrosifs.

1.2.8. Capteurs magnétiques de force et de torsion

La figure 1.7 représente un capteur magnétique de force produit pendant plusieurs décades par ABB. Le capteur est un transformateur avec des enroulements primaires et secondaires perpendiculaires. Lorsque aucune force n'est appliquée, la structure est symétrique et aucune ligne d'induction ne traverse l'enroulement secondaire et la tension de sortie est nulle. Une force externe crée une anisotropie magnétique ; la perméabilité dans une direction augmente et les lignes d'induction sont distordues. L'enroulement secondaire est alors traversé par des lignes de champ, ce qui entraîne l'apparition d'un flux et d'une tension proportionnelle à la force externe. Les capteurs magnétiques de torsion sont basés sur le même principe : la torsion de l'arbre rotatif entraîne une anisotropie magnétique. Cette anisotropie est détectée par des bobines statiques.

Capteurs magnétiques d'oxygène

Ces capteurs utilisent les propriétés fortement paramagnétiques de l'oxygène. A température ambiante, l'oxygène a une susceptibilité magnétique supérieure aux autres gaz.

Un type de capteur utilise une cellule de référence remplie d'oxygène ou d'un autre gaz à teneur en oxygène connue. Cette cellule est attirée par le champ créé par un aimant permanent, la force d'attraction dépend de la quantité d'oxygène contenu dans l'atmosphère entourant la cellule. A la température de curie, l'oxygène perd ses propriétés paramagnétiques, ce qui peut également être utilisé pour la mesure. Certains capteurs d'oxygène mesurent le "vent magnétique" causé par le déplacement des molécules d'oxygène dans un gaz soumis à un fort gradient magnétique.

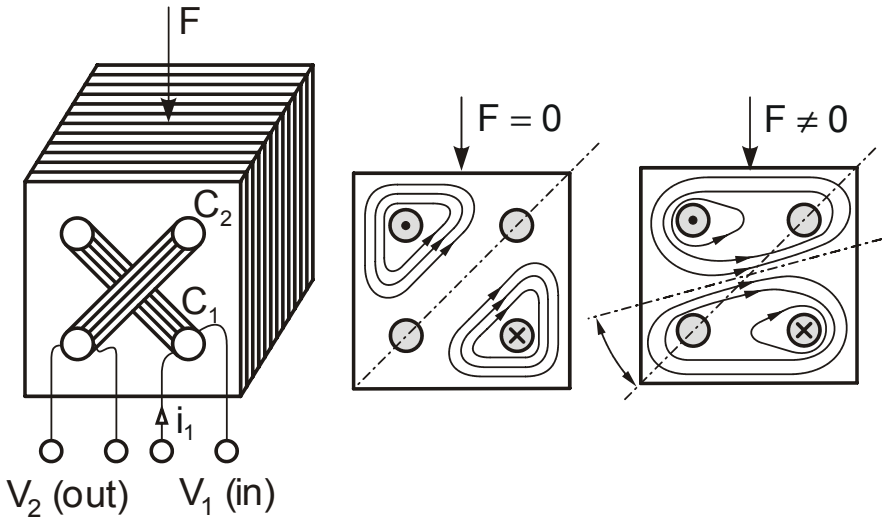


Figure 1.7. Capteur magnétique de force