

Chapitre 3. Les appareils de mesure

Introduction

Un appareil de mesure est un système qui traduit un phénomène physique non ou difficilement accessible à nos sens, en un autre phénomène pouvant être visualisé et estimé.

Il existe deux grandes classes d'appareils:

- Les appareils à déviation ou analogiques : par leur principe de fonctionnement, donne théoriquement une valeur de la grandeur à mesurer exactement proportionnelle à cette grandeur.
- Les appareils des mesure numériques ou logiques : ils donnent une valeur représentant la grandeur à mesurer au pas de quantification près. Cette valeur est donnée sous une forme de nombre (affichage numérique).

3.1. Appareils de mesure analogiques

Un appareil de mesure comporte généralement un ou plusieurs inducteurs fixes (aimant permanent ou électro-aimant) agissant sur un équipage à cadre mobile autour d'un axe fixe.

La technologie interne de ces appareils repose sur trois éléments:

- La suspension de l'équipage mobile ;
- Le dispositif de lecture qui peut être à aiguille ou à spot lumineux ;
- Le dispositif d'amortissement qui peut être magnétique ou par air.

Selon leur terminologie, il existe plusieurs types d'appareils analogiques, à savoir:

- Les quotientmètres (balance électrique) ;
- Appareils intégrateurs (compteur, fluxmètre) ;
- Appareils électroniques ;
- Appareils analogiques à affichage numérique ;
- Appareils à déviation.

On s'intéressera dans ce qui suit à l'étude des appareils analogiques à déviation.

3.1.1. Classification des appareils à déviation

La classification usuelle des appareils à déviation utilise la nature du phénomène physique qui régit le fonctionnement de l'appareil. On distingue plusieurs types d'appareils, dont les principaux types sont:

3.1.1.1. Appareils magnéto-électriques

L'inducteur fixe est un aimant fixe en forme de U , la déviation de l'aiguille est proportionnelle au courant moyen qui traverse une bobine placée à l'intérieur du champ magnétique créé par l'aimant fixe.

Symbole: 

3.1.1.2. Appareils ferromagnétiques

Le principe de fonctionnement d'un appareil ferromagnétique est basé sur l'action d'un champ créé par un circuit parcouru par un courant sur une ou plusieurs pièces de fer doux et dont certaines sont mobiles. On distingue deux types d'appareils : à attraction ou à répulsion.

Pour le type d'appareil à attraction, le principe utilisé est l'action magnétique produite par une bobine fixe traversée par un courant sur une palette en fer doux (organe mobile) montée sur deux pivots. Cet équipement mobile est muni d'une aiguille et d'un dispositif d'amortissement .

Pour le type d'appareil à répulsion, le champ magnétique créé par la bobine fixe agit sur deux palettes placées dans ce champ qui subissent une aimantation de même sens. La répulsion des deux palettes fait dévier l'aiguille.

Un appareil ferromagnétique est très simple à construire, robuste, utilisable en courant continu et en alternatif. La graduation de son échelle est non linéaire.

Symbole: 

3.1.1.3. Appareils électrodynamiques

Un appareil électrodynamique est formé principalement par un circuit fixe (généralement deux demi bobines) créant un champ magnétique à l'intérieur duquel se déplace un cadre mobile de faible inertie monté sur deux pivots et entraînant une aiguille.

Les appareils électrodynamiques sont non polarisés. Ils sont utilisables en courant continu et en courant alternatif. Ils sont généralement utilisables pour la fabrication des wattmètres.

Symbole: 

3.1.1.4. Appareils électrostatiques

Ce type d'appareils est caractérisé par une force exercée par l'armature fixe d'un condensateur sur son armature mobile. Ce type d'appareils est toujours utilisée en voltmètre. Lorsqu'on applique une tension entre les deux plaques de cet appareil, l'une se charge positivement et l'autre négativement, ce qui produit une force d'attraction qui tend à faire tourner la plaque mobile qui est solidaire d'une aiguille. Ils sont utilisables en courant continu et en courant alternatif et possèdent une échelle non linéaire.

Symbole: 

3.1.1.5. Appareils thermiques

Le principe de fonctionnement de ce type d'appareils est basé sur la dilatation d'un fil conducteur qui s'échauffe lors du passage d'un courant électrique d'intensité I . Cet effet est la conséquence directe de la puissance dissipée par effet joule dans le fil à dilatation. Le fil à dilatation utilisée est généralement en bronze ou un alliage platine et argent.

Le appareils thermiques sont non polarisés, utilisable en courant continu et en courant alternatif.

Symbole: 

3.1.2. Galvanomètre à cadre mobile

3.1.2.1. Description

Il est formé d'un cadre rectangulaire $abcd$ sur lequel on a enroulé N spires d'un fil fin en cuivre.

Les extrémités de cet enroulement sont soudées à deux fils très fins f et f' qui servent :

- de fils de suspension du cadre;
- de fils de connexion;
- de fils de torsion, exerçant sur le cadre un *couple de rappel*, qui tend à ramener le cadre dans la position d'équilibre qu'il occupe lorsqu'il n'est traversé par aucun courant.

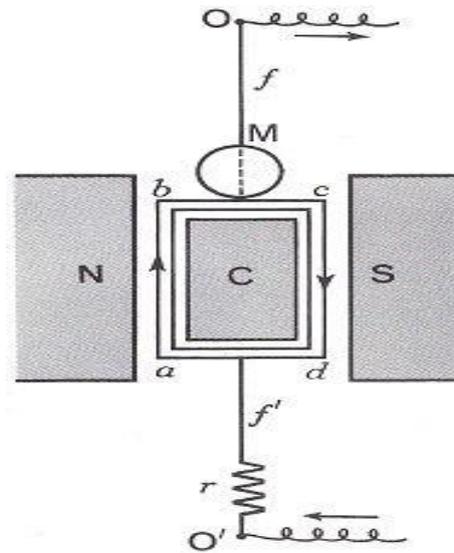
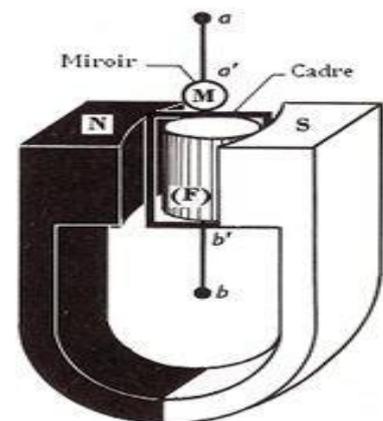


Figure 3.1. Galvanomètre magnéto-électrique.

Le cadre peut se mouvoir dans l'entrefer d'un aimant en forme de U muni de deux pièces polaires évidées de façon à laisser entre elles une cavité cylindrique; dans cette cavité on dispose un cylindre de fer doux qui canalise les lignes d'induction.

Entre les pièces polaires et le cylindre, les lignes d'induction sont dirigées suivant les rayons des deux cylindres coaxiaux : *le champ est radial.*



De ce fait, quelle que soit la position du cadre dans l'entrefer:

- les vecteurs induction magnétique \vec{B} en tous les points des côtés verticaux ab et cd du cadre sont toujours perpendiculaires à ces côtés et contenus dans le plan des spires;
- l'intensité B de ces vecteurs induction magnétique est pratiquement constante.

En fin, un miroir M , solidaire du cadre, permet d'observer des petites rotations de l'équipage mobile par la méthode optique dite *méthode de Poggendorff*.

3.1.2.2. Equation d'équilibre du cadre

Si aucun courant ne passe dans le cadre, celui-ci prend une position d'équilibre correspondant à une torsion nulle des fils de suspension.

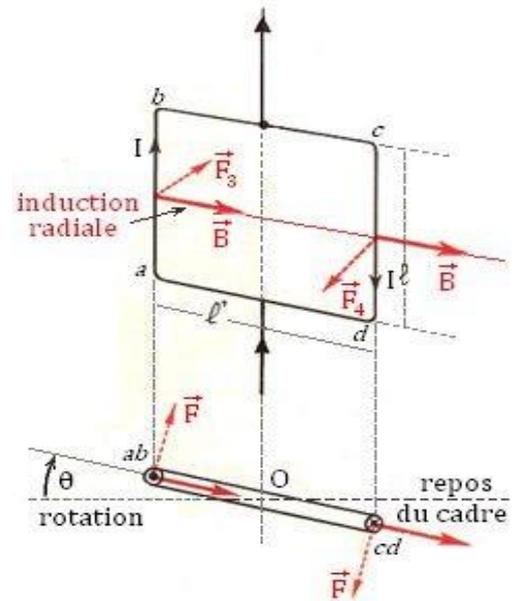
Quand un courant parcourt le cadre, celui-ci tourne et s'immobilise dans une position d'équilibre définie par l'égalité de deux moments :

- C_M : moment du couple électromagnétique (couple moteur);
- C_r : moment du couple de torsion (couple résistant = couple de rappel).

a. Couple électromagnétique

- Les côtés horizontaux ad et bc , de longueur l' , sont soumis à une induction sensiblement horizontale, donc à des forces de Laplace F_1 et F_2 à peu près verticales qui n'ont aucun effet de rotation sur le cadre.

- Les côtés verticaux ba et cd , de longueur l , étant perpendiculaires aux lignes d'induction sont soumis à des forces de Laplace F_3 et F_4 normales au plan des spires, de sens contraires et ayant pour intensité commune:



$$F = F_3 = F_4 = I.B.l \quad (3.1)$$

Ces deux forces forment donc un couple de moment:

$$C_M = F.l' = I.B.l.l' = I.B.S \quad (3.2)$$

($S = l.l'$: désigne la section du cadre mobile)

Comme le cadre comprend N spires identiques, le *moment du couple électromagnétique* résultant s'écrit:

$$C_M = N.I.B.S \quad (3.3)$$

$$C_M = N.I.\phi_0 \quad (3.4)$$

(C_M en mètre-newton; I en ampère; S en mètre carré; B en tesla)

ϕ_0 : le flux qui traverse le cadre mobile).

b. Couple de torsion

Le couple électromagnétique fait tourner le cadre dans le sens des forces $F_{3'}$ et $F_{4'}$. Au cours de cette rotation, les fils de suspension sont *tordus* d'un angle α et exercent un *couple de rappel* (couple de torsion) proportionnel à cet angle. Le moment de ce couple de sens contraire est:

$$C_r = K' \cdot \alpha \quad (3.5)$$

(C_r en mètre-newton; C : constante de torsion en mètre-newton par radian; α en radian).

c. Équilibre

A l'équilibre:

$$C_M = C_r \quad (3.6)$$

De cette égalité, nous déduisons l'expression de la déviation α du cadre qui correspond au courant d'intensité I :

$$\alpha = \frac{N \cdot \phi_0}{K'} I \quad (3.7)$$

K' : représente le couple résistant spécifique du ressort, il est exprimé en J/rad .

Nous constatons que le cadre tourne d'un angle proportionnel à l'intensité du courant.

d. Lecture des angles

La rotation du cadre est mesurée par la méthode de Poggendorff.

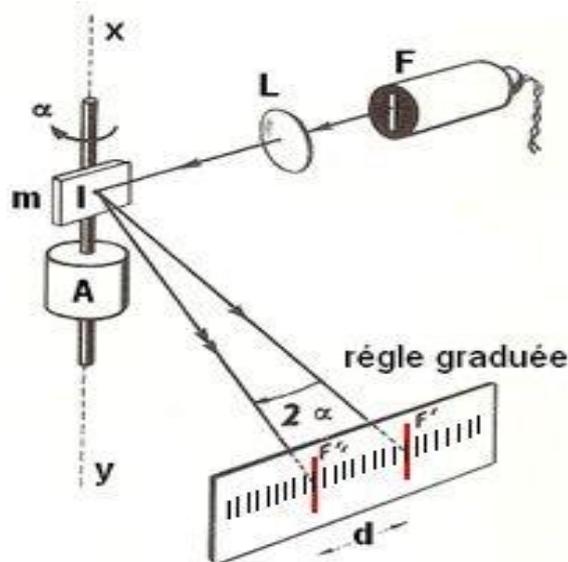


Figure 3.2. Le dispositif de lecture d'un galvanomètre magnéto-électrique.

Le cadre est surmonté d'un petit miroir M qui donne d'une fente fine éclairée un trait lumineux, le spot, sur une règle graduée translucide. Si le cadre tourne d'un angle α , le rayon réfléchi tourne d'un angle 2α et le spot passe alors de F' en F'' . Nous avons donc ; si l'angle α est petit, $\tan \alpha \approx 2\alpha$ radian et, par suite :

$$\alpha \approx \frac{d}{2D} \quad (3.8)$$

L'équation (3.7) devient alors:

$$I = \frac{K'}{N \cdot \phi_0} \frac{d}{2D} \quad (3.9)$$

3.1.2.3. Sensibilité

Le galvanomètre est d'autant plus sensible que, pour une même intensité I , l'angle de rotation α est plus grand :

$$S_i = \frac{\alpha}{I} \quad (3.10)$$

S_i : sensibilité en courant de l'élément moteur.

De la relation donnant α , nous déduisons:

$$S_i = \frac{N\phi_0}{K'} \quad (3.11)$$

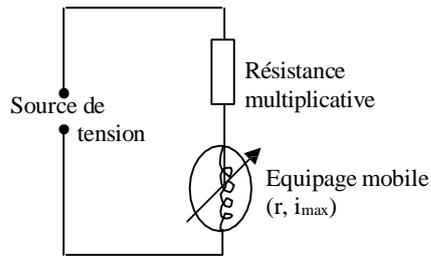
Pour améliorer la sensibilité, il faudra augmenter B, N, S et diminuer K' .

3.1.3. Les multimètres passifs

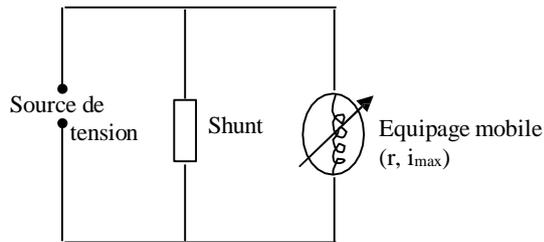
Un multimètre passif est constitué de l'élément moteur, de résistances et d'une pile. Pour la mesure de résistance, il sera donc disposé de plusieurs résistances selon les calibres qu'on veut. Pour qu'un équipage mobile de l'élément moteur puisse mesurer une tension, il suffit de monter une résistance multiplicatrice avec lui (résistance additionnelle).

Lorsqu'on veut mesurer un courant, il faut monter un shunt à ses bornes (résistance placée en parallèle).

Dans ces deux cas, les résistances servent à limiter le courant de passage dans l'équipage mobile en maximum qu'il peut supporter.



- La résistance en série pour mesurer une tension.



- La résistance en parallèle pour mesurer un courant.

3.1.3.1. Structure de l'ampèremètre magnétoélectrique

L'ampèremètre analogique le plus répandu est l'ampèremètre magnéto-électrique, il utilise un galvanomètre à cadre mobile.

En courant continu

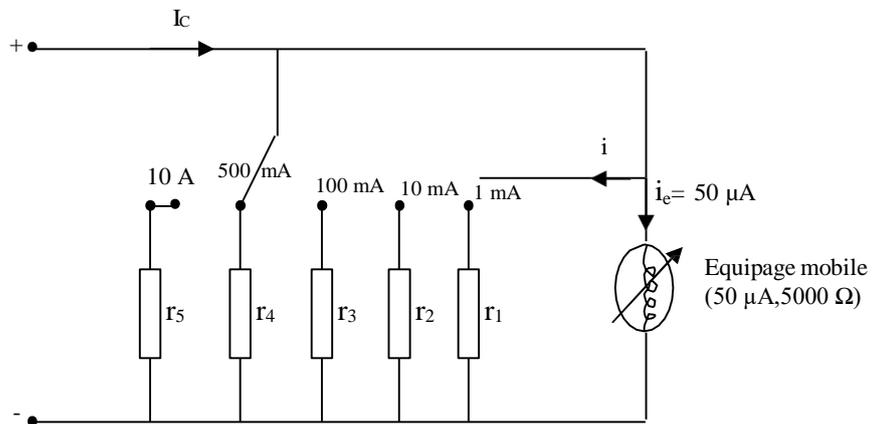


Figure 3.3. Circuit ampèremètre magnétoélectrique.

Calcul des résistances de shunt:

- La tension aux bornes des différentes résistances:

$$V_e = r_e \cdot i_{e\max} \tag{3.12}$$

$$V_e = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 5000 = 0.25 \text{ V}$$

i : courant traverse différentes résistances, I_C : courant de calibre.

$$i = I_C - i_{emax} \tag{3.13}$$

- Calibre 1 mA: $r_1 = \frac{V_e}{I_C - i_{emax}} = \frac{0.25}{1\text{mA} - 50\mu\text{A}} = 263.16 \Omega$
- Calibre 10 mA: $r_2 = \frac{0.25}{10\text{mA} - 50\mu\text{A}} = 25.13 \Omega$
- Calibre 100 mA: $r_3 = \frac{0.25}{100\text{mA} - 50\mu\text{A}} = 2.5 \Omega$
- Calibre 500 mA: $r_4 = \frac{0.25}{500\text{mA} - 50\mu\text{A}} = 0.5 \Omega$
- Calibre 10 A: $r_5 = \frac{0.25}{10\text{A} - 50\mu\text{A}} = 0.025 \Omega$

Remarque: Pour un ampèremètre, on remarque que plus le calibre augmente, plus la valeur de résistance interne est faible. Un ampèremètre doit donc avoir la plus petite résistance possible.

3.1.3.2. Structure du voltmètre magnétoélectrique

Un voltmètre magnétoélectrique est constitué d'un galvanomètre, donc un milliampèremètre magnétoélectrique très sensible, en série avec une résistance additionnelle de valeur élevée (de quelques $k\Omega$ à quelques centaines de $k\Omega$). On réalise un voltmètre à plusieurs calibres de mesure en changeant la valeur de la résistance additionnelle.

a. En courant continu

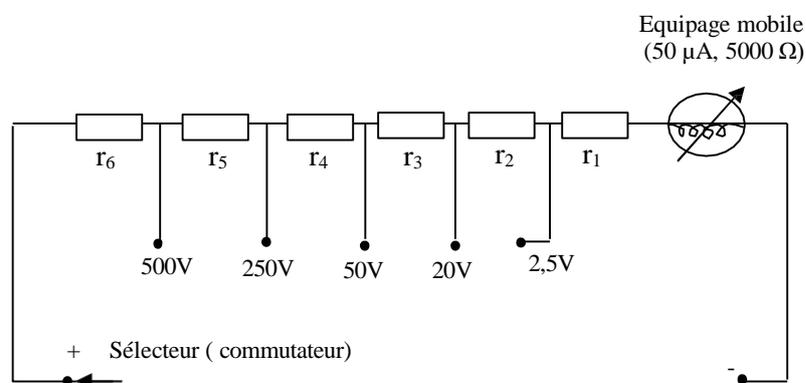


Figure 3.4. Circuit voltmètre magnétoélectrique en courant continu.

Calcul des résistances multiplicatrices:

$$2.5V = (r_1 + r_e) \cdot i_{max} \quad (3.14)$$

$$i_{max} = 50 \mu A$$

$$r_e = 5000\Omega$$

- $10 V = (r_1 + r_2 + r_e) \cdot i_{max} \Rightarrow r_2 = 150 k\Omega$
- $50 V = (r_1 + r_2 + r_3 + r_e) \cdot i_{max} \Rightarrow r_3 = 800 k\Omega$
- $250 V = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_e) \cdot i_{max} \Rightarrow r_4 = 4 M\Omega$
- $500 V = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_e) \cdot i_{max} \Rightarrow r_5 = 5 M\Omega$
- $1000 V = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 + r_e) \cdot i_{max} \Rightarrow r_6 = 10 M\Omega$

Remarque: On remarque que la résistance interne du voltmètre est grande quand le calibre augmente. Un voltmètre doit avoir la plus grande résistance interne possible.

b. En courant alternatif

En comparant le circuit du voltmètre continu au circuit-voltmètre alternatif, on remarque que la principale différence est que l'équipage mobile simple a été remplacé à une combinaison équipage redresseur.

Le redresseur est habituellement une diode au germanium.

Calcul des résistances du circuit équipage redresseur:

Le calibre le plus faible est de 2.5 V, c'est une tension suffisante pour débloquer la diode.

Une bonne linéarité doit avoir un courant de pleine échelle de 200 μA .

$$R_{eq} = R_{er} \quad (3.15)$$

R_{er} : résistance d'équipage redresseur

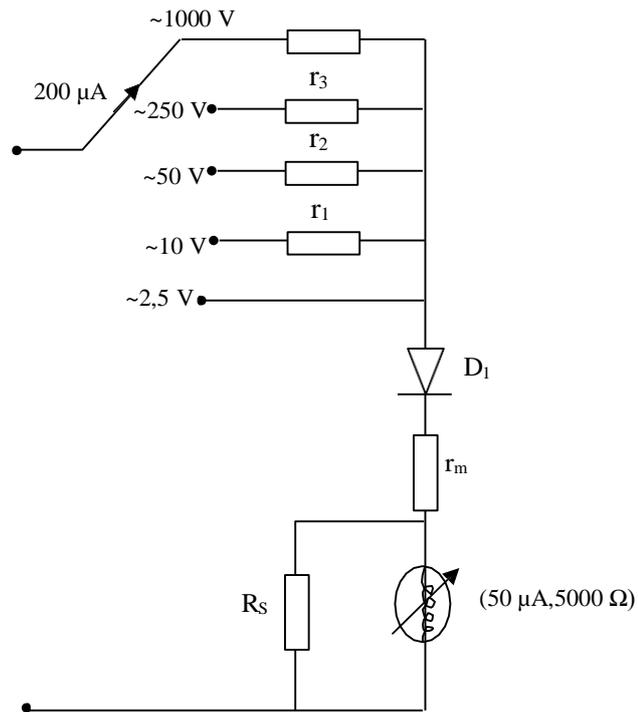
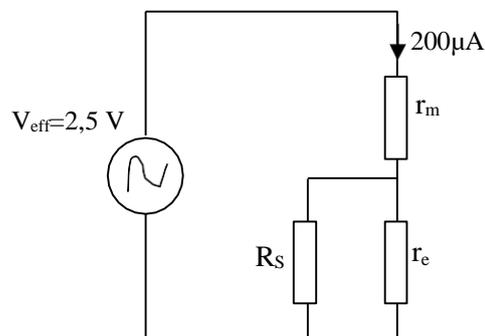


Figure 3.5. Circuit voltmètre magnétoélectrique en courant alternatif.

$$R_{eq} = R_{er} = r_m + (r_e // R_s) \quad (3.16)$$



- Redressement simple alternance: $V_{eff} = 2.22 V_{moy}$
- Redressement double alternance : $V_{eff} = 1.11 V_{moy}$

$$R_{er} = \frac{2,5}{2,22 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 5631 \Omega$$

$$V_s = V_e = 5000 \cdot 50 \mu A$$

$$R_s = \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3}{(200 - 50) \cdot 10^{-6}} = 1666 \Omega$$

$$r_m = R_{er} - (R_s // 5k\Omega) \Rightarrow r_m = 4481 \Omega$$

Le calibre de 2.5V crée une chute de tension de 2.5V, donc la chute de tension engendrée par les résistances multiplicatrices égale à :

$$r_1 = \frac{10 - 2,5}{2,22.200 \cdot 10^{-6}} = 16,891 k\Omega$$

$$r_2 = \frac{50 - 2,5}{2,22.200 \cdot 10^{-6}} = 106,98 k\Omega$$

$$r_3 = \frac{250 - 2,5}{2,22.200 \cdot 10^{-6}} = 557,432 k\Omega$$

$$r_4 = \frac{1000 - 2,5}{2,22.200 \cdot 10^{-6}} = 2,25 M\Omega$$

3.1.3.3. Le wattmètre

Le wattmètre est un appareil qui mesure la puissance consommée des appareils en charge dans un circuit. Dans cette partie de cours, on va étudier le wattmètre électrodynamique, il est appelé ainsi parce qu'il comporte un élément moteur électrodynamique.

La bobine fixe faite en grand fil constitue le circuit courant de résistance interne appelée R_A , le cadre mobile fait en fil fin constitue le circuit tension de résistance appelée R_V .

Sur le devant de l'appareil, on trouve une paire de borne pour relier le circuit courant en série avec le récepteur et une autre paire de borne pour relier le circuit tension en parallèle avec le récepteur.

Deux montages sont possibles; il s'agit d'un montage aval et d'un montage amont.

3.1.3.3.1. Fonctionnement du wattmètre électrodynamique en courant continu

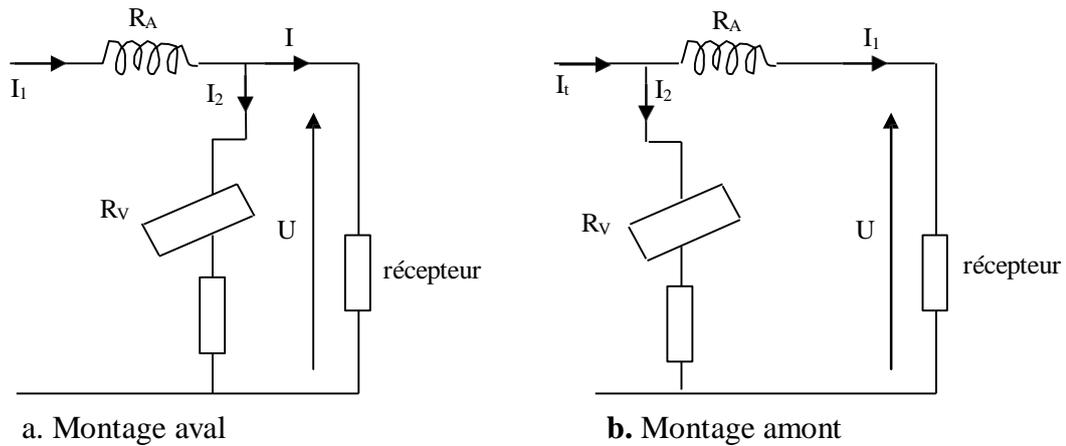


Figure 3.5. Wattmètre électrodynamique en courant continu.

Théoriquement: $P = U.I$ (3.17)

a. Montage aval

$$I_1 = I_2 + I \Rightarrow I_1 = I + \frac{U}{R_7}$$

$I_2 = U/R_V$, R_V : résistance du cadre plus la résistance en série.

$$\alpha = P_c = K.I_1.I_2 \quad (3.18)$$

(P_c : puissance en continu)

$$P = K.I_1.I_2$$

$$P = K \left(I + \frac{U}{R_7} \right) \cdot \frac{U}{R_7} = K \left(\frac{UI}{R_7} + \frac{U^2}{R_7^2} \right) \quad (3.19)$$

$$P = \frac{K}{R_7} \left(UI + \frac{U^2}{R_7} \right) \quad (3.20)$$

Remarque: On remarque que le wattmètre va indiquer la puissance absorbée par récepteur $U.I$ augmentée de la puissance consommée par son circuit tension $\left(\frac{U^2}{R_V} \right)$.

b. Montage amont

$$P = K \cdot I_1 \cdot I_2 \quad (3.18)$$

On a: $I_1 = I$

$$I_2 \cdot R_V = R_A \cdot I_1 + U \Rightarrow I_2 \cdot R_V = R_A \cdot I + U \quad (3.21)$$

$$I_2 = \frac{R_A}{R_V} I + \frac{U}{R_V} \quad (3.22)$$

$$\alpha = P = K \cdot I_1 \cdot I_2 = K \cdot I \left(\frac{R_A}{R_V} I + \frac{U}{R_V} \right) \quad (3.23)$$

$$\alpha = \frac{K}{R_V} (U \cdot I + R_A \cdot I^2) \quad (3.24)$$

Remarque: On remarque que le wattmètre va indiquer la puissance absorbée par le récepteur $U \cdot I$ augmentée de la puissance consommée par son circuit courant ($R_A \cdot I^2$).

3.1.3.3.2. Fonctionnement du wattmètre électrodynamique en alternatif

En courant alternatif, elle est mesurée la puissance active (moyenne):

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.25)$$

On suppose que les consommations propres des circuits courant et tension sont nulles.

$$u(t) = U_{eff} \sqrt{2} \cos \omega t \quad (3.26)$$

$$i(t) = I_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.27)$$

La déviation α : puissance moyenne.

$$\alpha = P_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T K \cdot i_1 \cdot i_2 dt = P_{active} \quad (3.28)$$

On prend: $i_1 = i$, $i_2 = \frac{U}{R_7}$

$$\alpha = P_{moy} = \frac{K}{T} \int_0^T I_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi) \frac{U_{eff} \sqrt{2} \cos \omega t}{R_7} dt \quad (3.29)$$

$$P_{moy} = \frac{2K}{R_7} U_{eff} \cdot I_{eff} \frac{1}{T} \int_0^T \cos \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi) dt$$