

Méthode moderne de captage isolé d'un courant fort : shunt électronique à flux nul

par Jean-Pierre CARON et Michel VROMAN
L.G.E.S. - E.N.S.A.M. CER, 59000 Lille

INTRODUCTION

Les convertisseurs statiques d'énergie électrique mettent en œuvre des composants semi-conducteurs de puissance commandés en commutation ; des composants passifs : bobines et condensateurs dont les missions sont le stockage et la restitution de l'énergie, le filtrage de courants ou de tensions.

Ils sont équipés de régulateurs électroniques et de systèmes de surveillance de divers paramètres physiques ; parmi ceux-ci, l'INTENSITÉ des courants électriques FORTS joue un rôle fondamental.

Le CAPTAGE de ces courants dans de bonnes conditions est devenu indispensable ; il s'agit de transmettre et de reproduire avec précision leur image sous la forme d'un courant ou d'une tension dont les niveaux sont compatibles avec une électronique de traitement du signal.

Le choix du capteur doit satisfaire aux conditions suivantes :

- 1 - Reproduire fidèlement toutes les formes de courant :
continu,
alternatif,
périodique,
impulsionnel ;
- 2 - Isoler l'électronique de traitement des circuits de puissance qui sont souvent à des potentiels élevés ;
- 3 - Immuniser le système de mesurage aux fluctuations des conditions environnantes et l'insensibiliser aux surcharges.

L'obligation d'isolation galvanique élimine les shunts classiques et coaxiaux ; le mesurage du continu est impossible avec le transformateur d'intensité. Les solutions retenues actuellement pour des équipements industriels sont fondées sur l'effet HALL ; deux types de capteurs sont commercialisés :

- le capteur à effet HALL qui utilise le mesurage direct de l'induction créée par le courant fort, dont l'inconvénient majeur est la saturation en cas de surcharges [1], [2], [3] ;
- le capteur à FLUX NUL construit sur le principe de l'équilibrage de forces magnétomotrices détecté par une sonde de HALL [4].

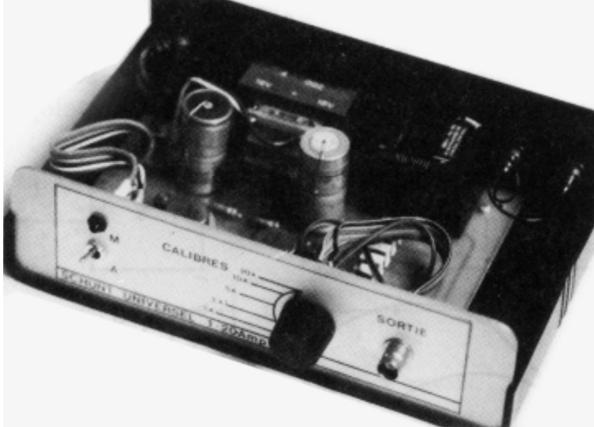
Ils sont largement répandus dans les équipements destinés à la variation de vitesse des machines électriques [5] où on les utilise en tant que capteurs dans les fonctions de :

- régulation de couple,
- protection contre les surintensités,
- surveillance de l'équilibrage des courants de lignes triphasées.

Le développement de travaux pratiques sur les redresseurs, hacheurs, gradateurs et onduleurs, ainsi que la nécessité d'observer simultanément plusieurs courants de formes quelconques nous ont amenés à résoudre le problème de leur captage par la réalisation de shunts électroniques isolés galvaniquement.

Construits autour du capteur LEM, leur apparence (photographie n° 1) est celle d'un boîtier muni :

- d'un cordon de raccordement au réseau,
- d'un fusible secteur,
- de deux paires de bornes «SHUNT» à sélectionner selon le calibre,
- d'un commutateur de calibre (1 A, 2 A, 5 A, 10 A, 20 A, 25 A / 50 A, 100 A),
- d'un interrupteur «Marche/Arrêt» couplé à une diode électroluminescente,
- d'une borne de sortie BNC dont la différence de potentiel (– 10 V, + 10 V) est l'image du courant fort.



Photographie n° 1 : Shunt électronique à FLUX NUL.

1. ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR À FLUX NUL

Le schéma de principe est celui décrit à la figure 1.

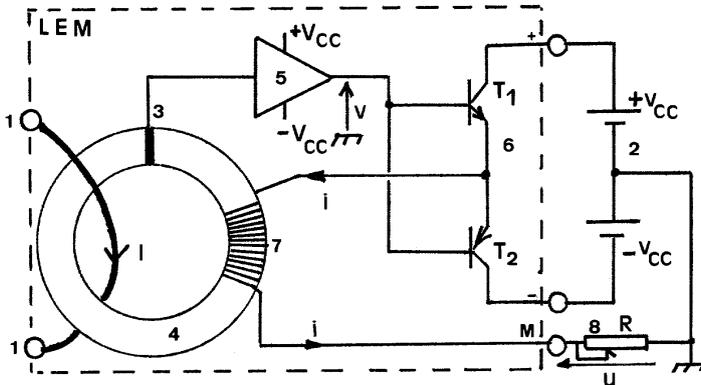


Figure 1 : Structure interne du capteur.

Nomenclature :

- (1) bornes du shunt - (2) alimentation symétrique - (3) sonde de HALL -
- (4) circuit magnétique - (5) amplificateur d'erreur - (6) amplificateur push-pull -
- (7) bobine de n spires et de résistance R_B - (8) résistor de CALIBRAGE.

Un conducteur, dont les extrémités sont les bornes du shunt, est parcouru par le courant fort I ; il traverse un circuit magnétique (CM) où est logée une sonde de HALL (figure 2). Un bobinage dans lequel circule le courant faible i de mesure, comporte un nombre élevé (n) de spires ; il entoure le circuit magnétique. Les sens positifs des courants sont tels que la force magnétomotrice E développée le long d'une ligne de champ magnétique admet pour expression :

$$E = \int_{(CM)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I - ni$$

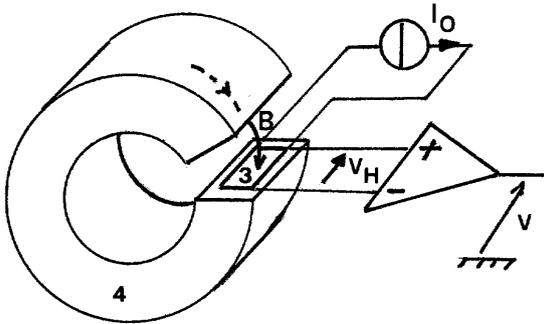


Figure 2 : Place de la sonde dans le circuit magnétique.

Dans l'entrefer, l'induction magnétique B est normale à la sonde de HALL qui est alimentée par une source de référence de courant continu I_0 .

La tension de HALL : v_H , proportionnelle à B car le circuit magnétique ne sera pas saturé, est amplifiée par un amplificateur différentiel de type opérationnel ; le courant de sortie de ce dernier est à son tour amplifié de manière bidirectionnelle par un étage push-pull à transistors.

La tension v_H est liée à l'induction B par l'expression :

$$V_H = a_H \cdot I_0 \cdot B$$

Les transistors T_1 et T_2 conduisent respectivement selon que le signe de I est positif ou négatif.

La différence de potentiel u disponible aux bornes du résistor de calibrage R est proportionnelle à i , tout au moins dans une large bande de fréquences. Le système ainsi décrit est à rétro-action, il admet la représentation fonctionnelle de la figure 3.

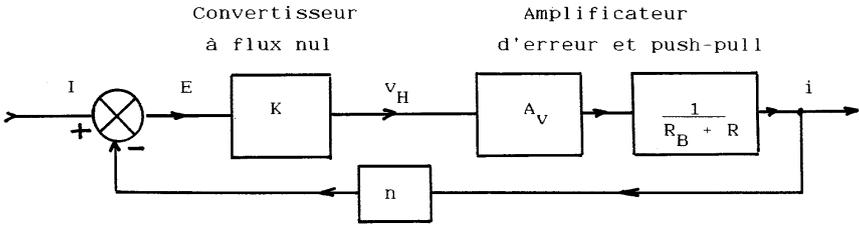


Figure 3 : Schéma synoptique de la conversion de courant.

K : Paramètre de conversion de la force magnétomotrice E en tension de HALL v_H .

A_V : Amplification de tension du module «amplificateur d'erreur et push-pull».

R_B : Résistor du bobinage de n spires.

On déduit le rapport des courants : i/I

$$i = (I - ni) \cdot K \cdot A_V \cdot \frac{1}{(R_B + R)}$$

soit :

$$\frac{i}{I} = \frac{1}{n + \frac{(R + R_B)}{K \cdot A_V}}$$

Dans les conditions normales de fonctionnement et de dimensionnement, $(R + R_B) / K \cdot A_V$ est bien inférieur à n , on conclut que :

$$i = I/n$$

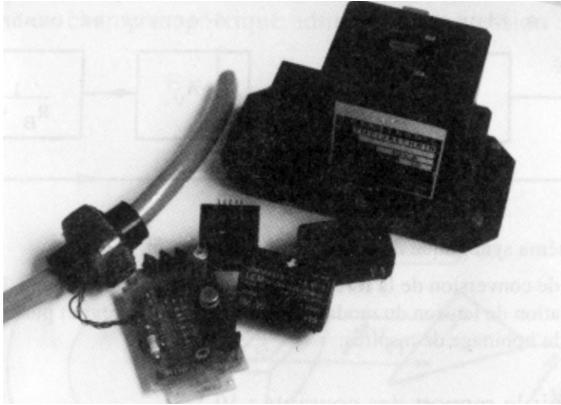
la tension u , égale à Ri est bien l'IMAGE de I .

On constate donc que le champ magnétique H et l'induction magnétique B sont sensiblement NULS ; la sonde de HALL est un détecteur d'écart ou d'erreur entre I et ni , le capteur travaille bien à FLUX NUL.

D'autre part, grâce à la structure de système asservi et au grand gain de boucle ouverte, les effets de non-linéarité de l'amplificateur push-pull et du convertisseur magnétique sont atténués, d'autant plus fortement que le courant i avoisine sa valeur nominale.

Sur la photographie n° 2, on peut apercevoir :

- en bas et à gauche, un LEM LT 100 S décapsulé,
- au centre un LEM LA 50P,
- en haut et à droite, un capteur de tension TRANSTRONIC.



Photographie n° 2 : Divers capteurs à flux nul.

2. PERFORMANCES DU CAPTEUR LEM / LT 100 S

Les modules standards sont définis par un courant d'intensité nominale I_N , la gamme des valeurs disponibles s'étend de 5A à 100 kA ; nous avons sélectionné le LT 100 S pour lequel $I_N = 100$ A.

plage de mesure	: 0 à ± 200 A
surcharges admissibles	: 200 A, 3 min / heure 2000 A, 3 s / heure
rapport de transformation	: $n = 1000$
courant de mesure	: $i = 100$ mA pour $I = 100$ A
température de service	: 0 à 50°C
résistance R_B	: 25 Ω à 25°C
alimentation	: $V_{CC} = 12$ à 18 volts
isolement entre primaire et secondaire	: 5 kV efficace / 50 Hz / pendant 1 minute
bande passante	: 0-150 kHz (± 1 dB)
temps de retard	: inférieur à 1 μ s
di/dt correctement suivi	: supérieur à 50 A/ μ s
précision à 25°C	: $\pm 0,5$ % I_N

Les causes principales d'erreur sont en statique :

- la rémanence qui provoque un écart maximal de $\pm 0,5$ ampère tour ; l'alliage ferronickel utilisé a subi un traitement thermique destiné à rendre minimal le champ coercitif ;
- les courants d'offset de la sonde de HALL et de l'amplificateur auxquels on attribue un écart de $\pm 0,1$ ampère-tour ;
- la non-linéarité résiduelle inférieure à $10^{-4} \cdot I_N$;
- la dérive en température inférieure à $10^{-4} \cdot I_N/^\circ\text{C}$.

Dans le cas où les courants nominaux à mesurer sont inférieurs à 100 A, la précision optimale s'obtient en réalisant un circuit primaire comportant plusieurs spires.

Exemple :

- mesurage de 10 A avec un conducteur au primaire : précision ± 1 A ;
- mesurage de 10 A avec 10 spires au primaire : précision $\pm 0,1$ A.

3. RÉALISATION DU SHUNT ÉLECTRONIQUE

Le shunt électronique comporte trois parties :

- a) le capteur à flux nul,
- b) l'alimentation continue $\pm V_{CC}$ élaborée à partir de la tension du secteur 220 V, 50 Hz,
- c) un ensemble de résistors R_K de calibrage.

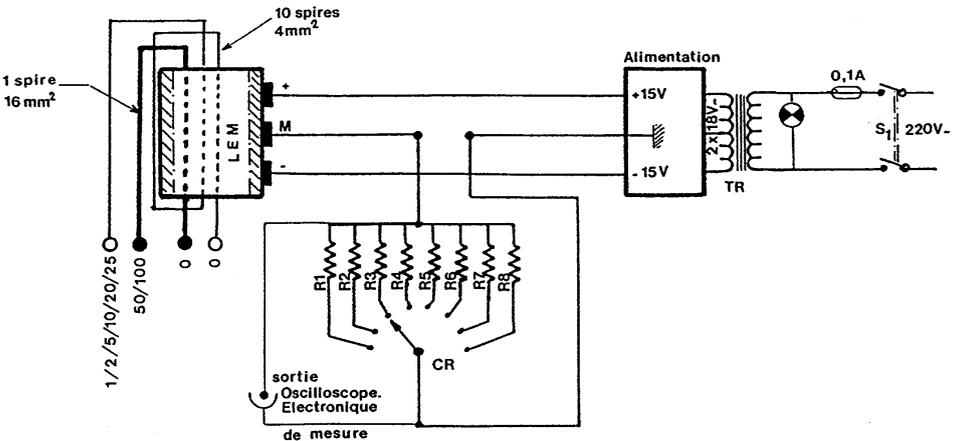


Figure 4 : Schéma général.

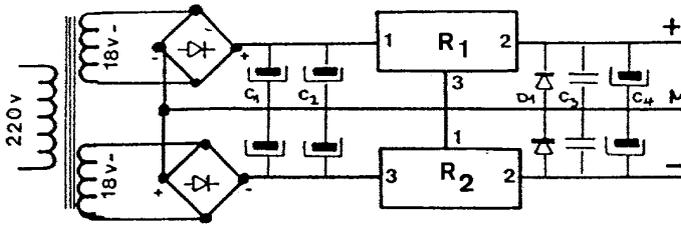


Figure 5 : Plan de l'alimentation.

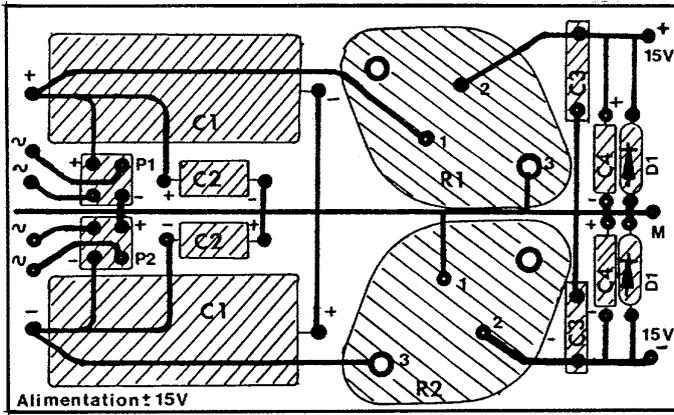


Figure 6 : Circuit imprimé de l'alimentation et implantation.

Nomenclature :

- Capteur LT 100 S, L.E.M. [4].
- Transformateur d'alimentation 220 V / 18 V / 18 V ; 3,5 VA.
- Ponts redresseurs P₁ et P₂, diodes 1,2 A / 100 V ; SEMIKRON.
- Régulateurs R₁ et R₂ : LM-340-15K et LM-32P-15K, N.S.
- Condensateurs :
 - C₁ (x2) 4700 μF / 63 V électrochimique,
 - C₂ (x2) 3,7 μF tantale,
 - C₃ (x2) 0,1 μF céramique,
 - C₄ (x2) 100 μF / 25 V électrochimique,
- Diodes D₁ (x2) : 1N4002.
- Potentiomètres 10 tours :
- R_(1,2,3) : 1 kΩ ; R_(4,5,6,7,8) : 220 Ω ; Spectrol.

4. ESSAIS ET PERFORMANCES

Les essais sont difficiles à réaliser lorsque les courants forts sont de fréquence supérieure à la fréquence industrielle de 50 Hz, car ils nécessitent des moyens inhabituels de génération et de mesurage référentiel.

En continu,

on dispose d'une alimentation 25 A / 60 V de marque LAMBDA [5] réglable, d'un shunt AOIP (10 A / 100 mV, classe 0,2) de rhéostats, de multimètres digitaux.

En alternatif

Un générateur de signaux (\sim , \wedge , \square) à fréquence variable est couplé à un amplificateur de puissance (marque Brüel et Kjaer, intensité maximale efficace : 5 A). Le résistor de charge est stable en température et en fréquence ; à 10 kHz, les indications d'un pont automatique (Wayne Kerr) fournissent un modèle série :

résistance 2,18 Ω ; inductance 0,9 μ H

La capteur de courant introduit dans le circuit de puissance une inductance de 0,23 μ H (1 spire) et de 6 μ H (10 spires) à la fréquence de 10 kHz ; la résistance n'est pas appréciable.

Tous les mesurages sont réalisés à l'aide d'un multimètre digital de précision meilleure que 0,5 % à \pm 1 digit.

4.1. Essais de linéarité en continu

Deux calibres ont fait l'objet de tests, après avoir réglé la résistance R pour une erreur quasiment nulle au maximum de l'échelle :

- calibre 2 A : maximum d'erreur relative 1 % pour $I > 0,2$ A,
- calibre 10 A : maximum d'erreur relative 3 % pour $I > 1$ A.

4.2. Influence de la source d'alimentation alternative

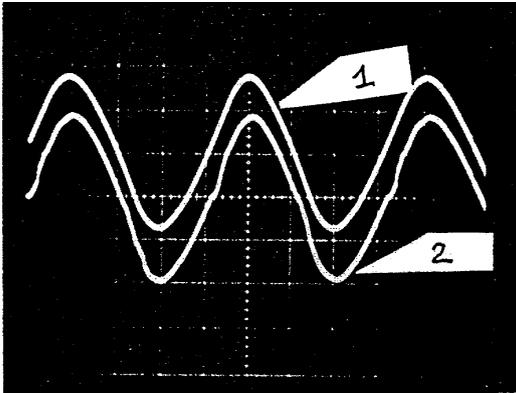
L'électronique du shunt est alimentée à partir du réseau 220 V - 50 Hz ; un écart de moins de 1 % a été constaté lorsque la tension du réseau chute de 50 %, ce résultat confirme la très bonne stabilité de l'alimentation continue équipant le shunt.

4.3. Essais de linéarité en régime sinusoïdal

A la fréquence de 50 Hz, un écart relatif maximal de 2 % a été observé sur le calibre 10 A.

A fréquence variable, pour un courant de valeur efficace 2,5 A, l'affaiblissement n'est que de 1,6 % à 50 kHz sur le calibre 10 A ; toutefois, il faut préciser que le courant i se déforme rapidement au-delà de cette fréquence de référence.

La photographie n° 3 montre les oscillogrammes de la tension aux bornes du résistor (courbe 1 : 5 V/cm) et du courant restitué par le shunt (courbe 2 : 2 A/cm) ; la fréquence étant réglée à 50 kHz.



Photographie n° 3 : Essai sinusoïdal à 50 kHz.

D'autre part, il a été constaté, lorsque l'amplitude de i est trop faible par rapport à sa valeur nominale de 100 mA, que la commutation entre les deux transistors T_1 et T_2 altère la forme de i de façon d'autant plus sensible que la fréquence est élevée. C'est pourquoi, les calibres 1 A et 2 A, pour lesquels les valeurs de crête de i sont respectivement 10 mA et 20 mA, ne sont utilisés qu'en continu et en sinusoïdal de fréquence 50 Hz.

4.4. Transmission des courants non sinusoïdaux

a) Le shunt est essayé sur le calibre 10 A avec des courants de forme :

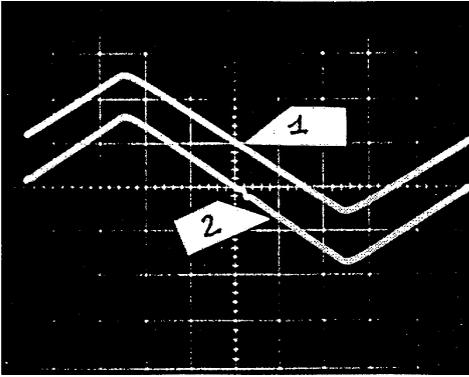
- triangulaire (fréquence 5 kHz), photographie n° 4,

- rectangulaire (fréquence 10 kHz), photographie n° 5,
- impulsionnelle (échelle des temps : 5 $\mu\text{s}/\text{cm}$), photographie n° 6.

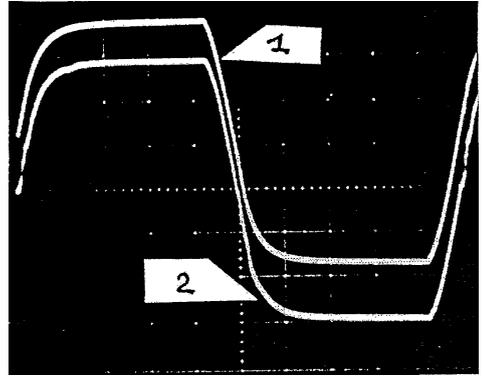
La courbe 1 est le chronogramme de la tension aux bornes du résistor (5 V/cm).

La courbe 2 est le chronogramme du courant de sortie du shunt (2 A/cm).

Les enregistrements montrent clairement la bonne réponse du capteur à des vitesses de 1 A/ μs , le constructeur garantit 50 A/ μs .



Photographie n° 4



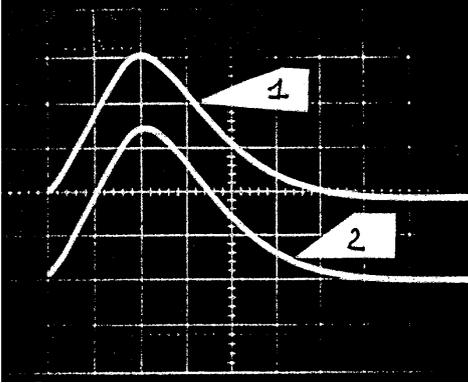
Photographie n° 5

b) Les mêmes expériences ont été effectuées à l'aide d'un shunt classique, utilisé habituellement en courant continu ou alternatif de fréquence 50 Hz ; (0,01 Ω / 10 A).

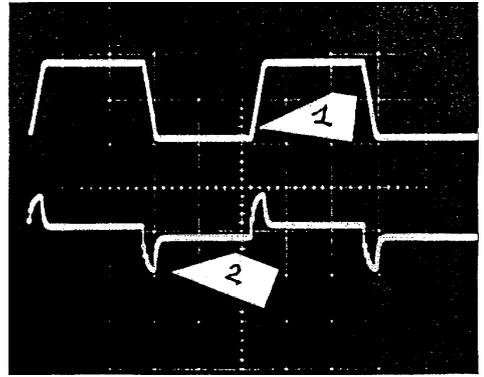
Sur la photographie n° 7, la courbe 1 représente la tension aux bornes du résistor, la courbe 2 reproduit la tension aux bornes du shunt classique. L'échelle des temps est de 20 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Qu'observe-t-on ?

Lors des variations rapides du courant, le shunt classique répond par des impulsions de tension ; c'est son inductance L qui est à l'origine de la surtension $L \cdot dI/dt$, d'autant plus élevée que le courant croît rapidement.



Photographie n° 6



Photographie n° 7

La dernière photographie nous oblige à rester prudents et critiques dans le choix d'un système d'acquisition d'une grandeur physique.

CONCLUSION

Depuis dix ans, le Laboratoire de Génie Électrique et Systèmes du centre lillois de l'ENSAM est équipé de shunts électroniques à flux nul ; ils sont utilisés régulièrement et intensivement dans les séances de travaux pratiques.

En dehors de l'intérêt fondamental de pouvoir capter dans de très bonnes conditions des courants transitoires ou périodiques à variation rapide et à valeur moyenne non nulle ; nos shunts offrent l'avantage de la sécurité des utilisateurs et des appareils de mesure, par le fait de l'isolation galvanique.

Afin de conserver aux mesures une fiabilité satisfaisante, nous effectuons chaque année une campagne de recalibrage par ajustage des résistors.

Actuellement, les capteurs se sont diversifiés et, on trouve des calibres de base inférieurs à 100 A ; le module LEM LA 25-NP est un capteur multicalibre (5-6-8-12-15-25 A), ses dimensions sont réduites (H = 16 mm, L = 30 mm, l = 26 mm).

Des capteurs de tension, construits sur le même principe, permettent de surmonter les problèmes de masse lors de l'observation oscillographique à deux voies.

Enfin, des capteurs de courant à flux nul sont intégrés dans des pinces ampèremétriques, soit raccordables à un oscilloscope [7], soit munies d'un microcalculateur de fréquence, de valeur de crête et de valeur efficace.

RÉFÉRENCES

- [1] G. GAUTHIER
«Le capteur d'intensité à effet HALL»
Revue Générale d'Électricité - Mai 1984.
- [2] HONEYWELL S.A.
Micro Switch current sensor
4, rue Ampère - Montigny Le Bretonneux
78886 SAINT QUENTIN EN YVELINES.
- [3] VACUUMSCHMELZE
distributeur : BALLOFET - Z.A. de Pissaloup
rue Edouard Branly - 78170 TRAPPES.
- [4] LEM, LIAISONS ÉLECTRONIQUES MÉCANIQUES
Chemin des Aulx 8
CH 1228 Plan-les-Ouates - GENÈVE.

J.P. ETTER
«Le capteur LEM»
Revue Générale d'Électricité - Mai 1984.

ASEA BROWN BOVERI
«TRANSTRONIC»
10, rue Ampère - B.P. 114 - 69685 CHASSIEUX.
- [5] M. DEBRUYNE
Utilisation de capteurs de courants en traction ferroviaire
Revue Générale d'Électricité - Mai 1984.
- [6] LAMBDA Electronique
Catalogue et notices
B.P. 77 - 91943 LES ULIS.
- [7] CHAUVIN ARNOUX
«Pincés Ampèremétriques, série E»
190, rue Championnet - 75876 PARIS Cedex 18.