

## Transformateur pour petit puissance et capteur LEM

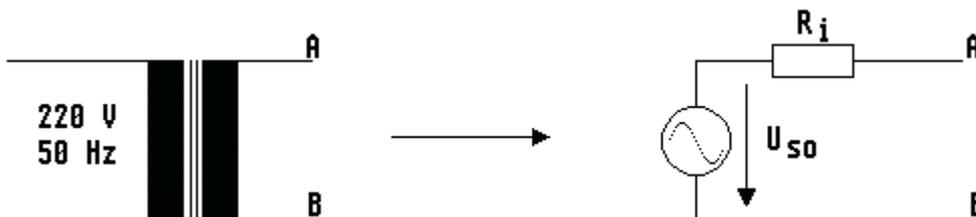
La première partie de cet exercice s'occupe du schéma équivalent d'un transformateur et de la détermination de ces éléments.

La deuxième partie est consacrée au convertisseur LEM. A l'aide de ce type de capteurs, on peut mesurer des courants en potentiel flottant, pour une bande allant de cc jusqu'à 100 kHz. Le capteur LEM se base sur le principe de l'effet de Hall.

### 1.1 Transformateur pour petit puissance

La tâche du transformateur de secteur est p.ex. de transformer la tension du réseau 220V à des tensions de quelques volt pour alimenter les circuits électroniques.

On peut regarder au bornes du secondaires comme à la sortie d'une source de tension avec une résistance interne en série:



Une source de tension avec une résistance interne en série suffit pour décrire un transformateur de petit puissance.

La résistance interne représente les pertes, les résistances des bobines, etc.. La tension de la source est égale à la tension du réseau divisé par le rapport du nombre de spires des bobines primaire et secondaire. Normalement les fournisseurs du trafo nous ne donnent pas toutes ces informations. En général on obtient les dimensions, la gamme de température, la tension de contrôle et les informations suivantes:

$P_N$ : Puissance secondaire nominale (pour une tension primaire nominale)

$U_N$ : Valeur efficace de la tension secondaire à la charge nominale et tension primaire nominale

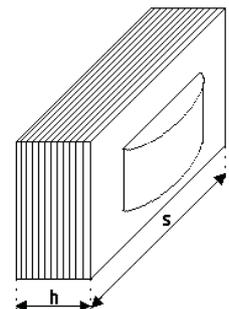
$U_{S0}$ : Valeur efficace de la tension secondaire à vide

$f_v$ : Le rapport entre la tension secondaire à vide et la tension secondaire avec charge nominale à tension primaire nominale

$$f_v = U_{S0} / U_N$$

Les valeurs du tableau suivante ont être pris d'un catalogue et ils peuvent être utile comme exemples:

Blechschnitt s/h	Nennleistung $P_N$	Leerlauf-spannung $U_{S0}$	Wirkungsgrad $\eta \approx 1/f_v$	$f_v = U_{S0}/U_N$	$P_{Ri}$ max
EI 30/12.5	1.2 VA	$U_N + 40\%$	55%	1.4	
EI 38/13.6	2.5 VA	$U_N + 25\%$	60%	1.25	
EI 48/16.8	6.3 VA	$U_N + 15\%$	70%	1.15	
EI 54/18.8	10 VA	$U_N + 15\%$	70%	1.15	
EI 60/21	16 VA	$U_N + 12\%$	74%	1.12	



On peut déterminer les éléments du schéma équivalent depuis les valeurs de la table ci-dessus. Comme déjà mentionné, on suppose que tous les pertes<sup>1</sup> sont concentrés dans la résistance interne. Les pertes sont responsable pour l'augmentation de la température du transformateur. Il faut prêter une attention particulier à ne pas dépasser la température maximale à l'intérieur du transformateur, car il y a le risque que l'isolation des conducteurs se détruit, en produisant un court circuit. Les isolations standard sont prévues pour des températures inférieurs à 120°C.

Exercice: Complétez dans la table avec les valeurs de  $P_{Ri\ max}$ .

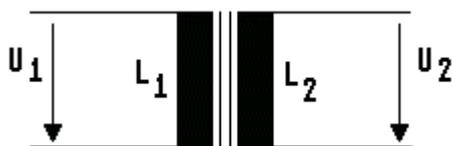
$$P_{Ri\ max} \approx P_N (f_v - 1)$$

### 1.2 Transformateur de puissance (S > 20 VA)

Pour simplifier les calculs on apporte les éléments du primaire au secondaire, à l'aide du rapport du nombre de spires des bobines.

$$\ddot{u} = N_1 / N_2 \approx U_P / U_{S0}$$

Cela mène au schéma équivalent comme suivant:



Symbole d'un transformateur

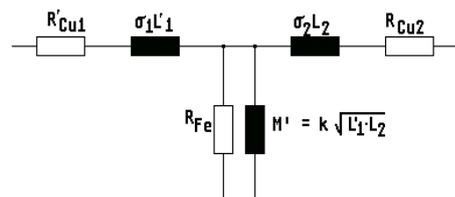


Schéma équivalent

avec  $R'_{Cu1} = R_{Cu1} / \ddot{u}^2$   
 $\sigma_1 L'_1 = \sigma_1 L_1 / \ddot{u}^2$   
 $k^2 = (1 - \sigma_1)(1 - \sigma_2) \approx (1 - \sigma)^2$

On appelle  $\sigma_1 L_1$  et  $\sigma_2 L_2$  inductances de fuite

<sup>1</sup> Si le courant secondaire n'est pas sinusoidale (p.ex. avec un redresseur)  $I_{EFF}^2 \cdot R_i$  ne doit pas dépasser la valeur  $P_{Ri\ max}$ .

### 1.3 Détermination des éléments du schéma équivalent

Les valeurs  $U_1$ ,  $U_2$  et  $P_N$  (resp.  $S_N$ ) sont normalement données ou elles sont facilement déterminables. Tenez compte que la puissance nominale  $P_N$  (resp.  $S_N$ ) est la puissance délivrée à la charge.

1. La méthode plus simple pour déterminer les **résistances  $R_{Cu1}$  et  $R_{Cu2}$**  des bobines est de les mesurer par un ohmmètre resp. par une mesure en courant continu.
2. Les inductances **primaire et secondaire  $L_1$  et  $L_2$**  peuvent être mesurées par un pont d'inductance. Il y a des instruments qui sont capable de mesurer l'inductance et au même temps aussi la résistance en série, cette valeur devrait correspondre à cette déterminer sous le point 1.

$L_1$  et  $L_2$  sont composées comme suite:

$$L_1 = \sigma_1 L_1 + (1-\sigma_1)L_1$$

de même pour  $L_2$

$$L_2 = \sigma_2 L_2 + (1-\sigma_2)L_2$$

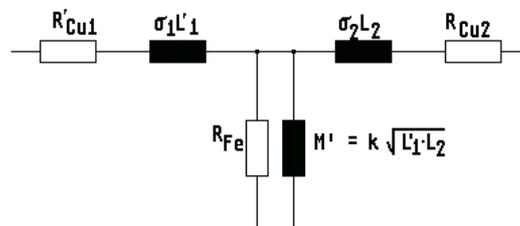
Le facteur de couplage

$$k^2 = (1 - \sigma)^2 \quad \text{avec } \sigma \approx \sigma_1 \approx \sigma_2$$

n'ai pas facile à déterminer. Par un court circuit au secondaire on peut mesurer la somme des deux inductances de fuite. La méthode et la suivante:

A l'aide d'un variac, on augment avec prudence la tension au primaire depuis zéro jusqu'au moment que le courant de court circuit a atteint la valeur de le courant nominale du secondaire. La tension primaire  $U_K$  vient appelée **tension d'entrée en court circuit**.

Avec la tension d'entrée en court circuit, les résistances des bobines  $R'_{1Cu}$  et  $R_{2Cu}$  et le déphasage entre la tension et le courant, on peut déterminer la somme des inductances de fuite.



Méthode de mesure: La tension primaire  $U_K$  est ajustée pour avoir un courant nominal  $I_N$  dans le court circuit. L'impédance  $Z_e$  correspond dans ce cas à:

$$Z_e = \{R'_{Cu1} + j\omega(s_1L_1' + \sigma_2L_2) + R_{Cu2}\} \ddot{u}^2$$

car  $R_{Fe}$  et  $M'$  sont négligables.

Avec  $|Z_e| = U_K / I_K = U_K \cdot \ddot{u} / I_N$

on obtient

$$\{(R'_{Cu1} + R_{Cu2})^2 + \omega^2(\sigma_1L_1' + \sigma_2L_2)^2\} \ddot{u}^2 = (U_K / I_N)^2$$

et

$$(\sigma_1L_1' + \sigma_2L_2)^2 = \frac{(U_K / I_N)^2 / \ddot{u}^2 - (R'_{Cu1} + R_{Cu2})^2}{\omega^2}$$

avec  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  enfin

$$\sigma^2 = \frac{(U_K / I_N)^2 / \ddot{u}^2 - (R'_{Cu1} + R_{Cu2})^2}{\omega^2 (L_1' + L_2)^2}$$

et le facteur de couplage

$$k = 1 - \sigma$$

### 3. Les pertes dans le fer $R_{Fe}$

La puissance à vide  $P_{P0}$  correspond à peu près aux pertes dans des tôles de fer  $P_{Fe}$ . On peut donc admettre

$$R_{Fe} \approx U_2^2 / P_{P0}$$

### 4. Le rendement $\eta$

La puissance active

$$P_K' = U_K' \cdot I_K \cdot \cos(\varphi) \approx P_{Cu}$$

avec  $U_K' = U_K / \ddot{u}$

$U_K$  est la tension en court circuit au secondaire à courant  $I_N$ . La puissance correspond à peu près aux pertes du cuivre  $P_{Cu}$  (dans ce cas là les pertes du fer sont négligeables).

$$\eta \approx \frac{P_N}{P_N + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

## 2. Capteur de courant

Le plus simple capteur de courant est le transformateur. A l'aide d'un transformateur on obtient à l'aide du rapport des spires  $\ddot{u}$  entre la bobine primaire et secondaire la relation suivante:

$$I_P = \ddot{u} \cdot I_S \quad I_P: \text{courant primaire} \quad I_S: \text{courant secondaire}$$

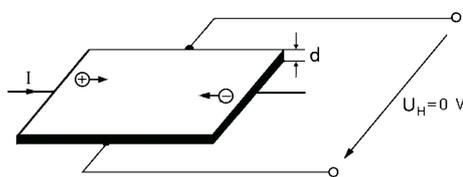
Un transformateur comme capteur de courant a deux grandes avantages:

- il transforme des grands ou des petits courants dans des courants bien mesurables
- on a une séparation galvanique entre entrée et sortie

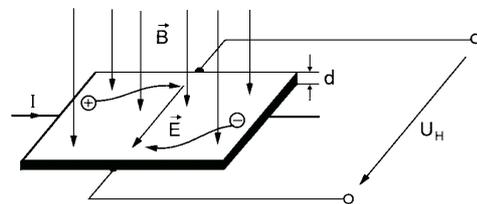
Malheureusement ceci ne fonctionne que pour des courants alternatifs. Par contre le capteur LEM a les mêmes avantages et en plus il nous permet aussi de mesurer des courants continus.

### 2.1 L'effet Hall

Selon la loi d'Ohm, on ne devrait pas avoir une tension aux bornes qu'ils sont placées perpendiculairement d'un conducteur parcouru par un courant. Le physicien Hall a découvert qu'une tension est mesurable quand le conducteur est exposé à un champ magnétique.



champ magnétique absent



avec un champ magnétique

Le champ magnétique applique une force de Laplace sur les porteurs de charge traversant le conducteur

$$\vec{F}_{\text{mag}} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Les noyaux atomiques risquent de perdre leurs charges et génère eux même un champ électrique pour retirer ces charges

$$\vec{F}_{\text{el}} = q \cdot \vec{E}$$

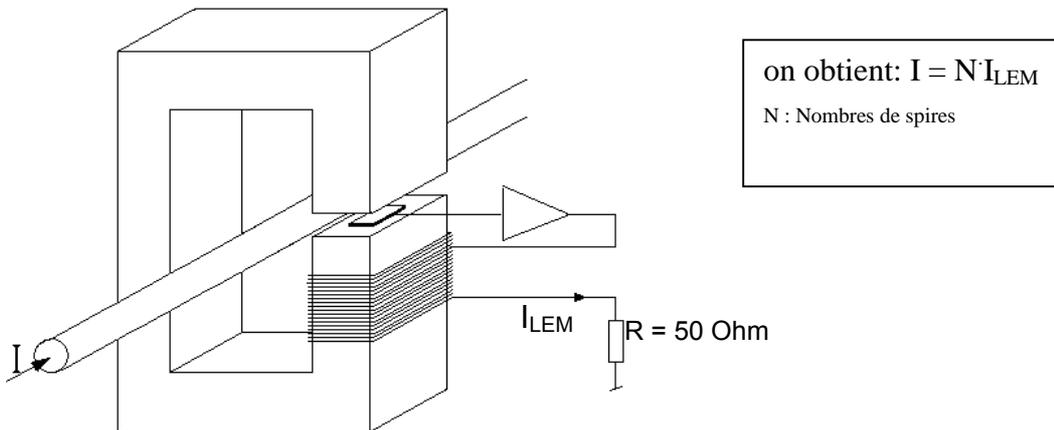
cela mène pour l'équilibre des forces à la tension Hall

$$U_H = \int \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\rho_L d} I \cdot B$$

$\rho_L$  est la densité de charges et  $d$  est l'épaisseur de la plaque conductrice. La tension de Hall devient grand pour des matériaux de pure densité de charge comme p.ex. les semiconducteurs purs dotés ( $\rho_L \approx (10^{12} \cdot \dots \cdot 10^{15}) \text{ As/cm}^3$ ). Pour les métaux l'effet de Hall n'est presque pas mesurable parce que leurs densités de charge et de l'ordre  $\rho_L \approx 10^{21} \text{ As/cm}^3$ . Pour cette raison la tension de Hall dans les métaux est au moins  $10^6$  fois plus petite que dans les semi-conducteurs.

## 2.2 Le fonctionnement d'un capteur LEM

Dans l'entrefer d'un noyau de fer se trouve une sonde de Hall. A l'aide d'un ampli opérationnel le courant passant la bobine est réglé de façon que le flux magnétique soit zéro.



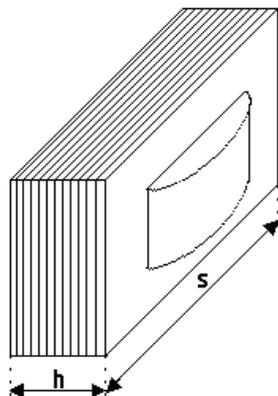
$$U_R = I_{LEM} \cdot R = \frac{I}{N} \cdot R$$

done

$$I = N \cdot \frac{U_R}{R}$$

Aufgaben:

1. Cherchez et notez les données du trafo.



Puissance nominale	$P_N =$
Tension secondaire à charge nominale	$U_N =$
Largeur du noyau	$s =$
Épaisseur du noyau	$h =$

**Remarque:** Si il y a deux bobines secondaires branchez les en série pour que les bobines soient chargées de même façon.

Mesurez à l'aide d'une ohmmètre la résistance de la bobine primaire et secondaire

$$R_{Cu1} =$$

$$R_{Cu2} =$$

2. Déterminez le rapport des spires  $\ddot{u}$  à  $U_P = 220V$

$$\ddot{u} = N_1 / N_2 \approx U_P / U_{S0}$$

3. Déterminez le rapport entre la tension à vide  $U_{S0}$  et avec la charge nominale

$$U_N (U_P = 220 \text{ V})$$

$$f_V = U_{S0} / U_N$$

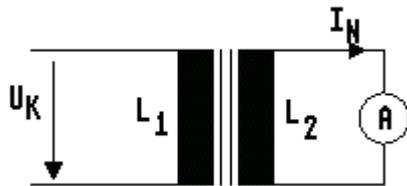
et déterminez la résistance interne du schéma équivalent

$$R_i = \frac{U_N^2}{P_N} \cdot (f_V - 1)$$

4. Transformez la résistance de la bobine primaire pour le schéma équivalente vu du secondaire. Ajoutez ensuite la résistance de la bobine secondaire et vous devriez trouver la valeur que vous avez calculer au point 3:

$$R_i \approx R_{Cu1}/\ddot{u}^2 + R_{Cu2} =$$

5. Mesurez la tension en court circuit  $U_K$ . Court-circuitez le secondaire variez **prudemment** au primaire à partir de 0V jusqu'au moment que le courant de court circuit correspond au courant nominale du secondaire!



$$U_K =$$

En cas que  $U_K \approx \ddot{u} \cdot I_N \cdot R_i$  gilt,  
les inductances de fuite sont négligeable.

6. Déterminez les inductances primaire  $L_1$  et secondaire  $L_2$  en mesurant la tension et le courant approprié nominale de la bobine. Depuis l'impédance  $|Z|$  on obtient

$$|Z| = U/I = [R_{Cu}^2 + (\omega L)^2]^{1/2} \rightarrow L$$

$$L_1 = \quad \quad \quad (\text{en appliquant 220V})$$

$$L_2 = \quad \quad \quad (\text{en appliquant 24V})$$

7. Déterminez le facteur de couplage  $k$  depuis les résultats des points 5 et 6.
8. Mesurez de nouveau les résistances des bobines après avoir chargé le trafo pour environ 15 minutes avec sa charge nominale en utilisant la résistance à froide (voir point 1) on peut estimer la température à l'intérieur du trafo à l'aide de la relation suivante

$$R_{T2} = R_{T1}[1 + \alpha(T_2 - T_1)] = R_{T1}(1 + \alpha \Delta T)$$

Le coefficient  $\alpha$  de cuivre est environ  $\alpha_{Cu} \approx 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

9. Mesurez la puissance active à vide  $P_{Fe}$  et déterminez le rendement  $\eta$  du trafo.

10. A l'aide d'un pont de mesure mesurez la capacité de couplage entre la bobine primaire et celle secondaire .
11. Notez depuis la feuille de données du capteur LEM  
la gamme de mesure  
la précision  
la largeur de bande (pour l'atténuation de -1 dB)  
le rapport entre le courant au primaire et le courant à la sortie du capteur
12. Vérifiez que la relation

$$t_r = \frac{0.35}{B}$$

est correcte. B est la largeur de bande pour une atténuation de 3dB! Supposez que le capteur se comporte comme un filtre passe bas de première ordre et estimez avec cette connaissance B pour -3dB.

Mesurez le temps de monté  $t_r$  avec le schéma suivant:

