

Les tensions dans la commande par blocs, machine brushless

Table des matières

1.Tracés des tensions simples	1
1.1.Moteur non connecté.....	2
1.2.Moteur connecté.....	4

1. Tracés des tensions simples

Ci-dessous l'architecture de la commande du moteur brushless. Important : bien que l'on utilise une topologie onduleur triphasé, le convertisseur n'est pas utilisé comme tel. Pour chacune des 6 phases de conduction un bras est laissé libre : on a donc à faire à un hacheur 4Q « qui se déplace » (rôle du collecteur MCC).

L'ensemble se représente comme ceci :

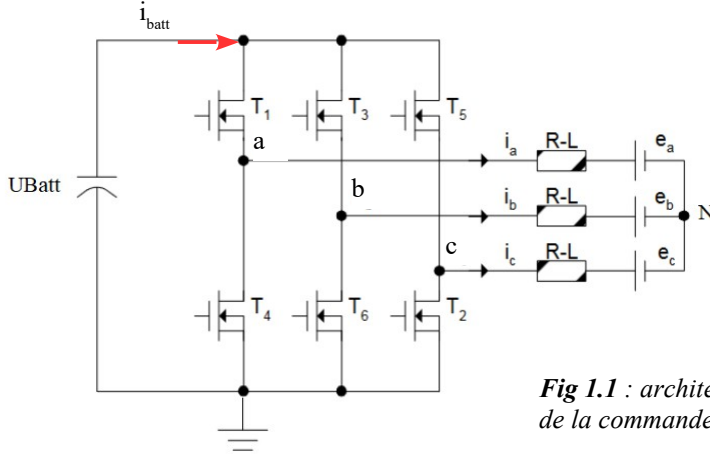


Fig 1.1 : architecture de l'ensemble de la commande par blocs

En première approximation, nous pouvons considérer que les courants i_a , i_b et i_c ont des formes strictement carrées (les inductances du moteur lissant le courant). L'amplitude de ces courants est notée I_B (pour **B**loc). Les 3 potentiels a , b et c sont les sorties de l'onduleur, les points d'entrée de chaque phase. Chaque phase sera modulée par un signal de la forme :

$$v_{i0} = \frac{U_{Batt}}{2} + \hat{\alpha}_i \cdot U_{Batt} \quad \text{où} \quad v_{i0} \text{ est la tension phase-0V, } \hat{\alpha}_i \text{ varie dans l'intervalle }] -0,5 ; 0,5 [.$$

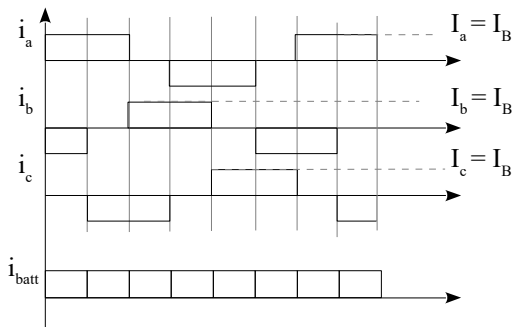


Fig 1.2a : Allure des courants mis en jeu dans la commande par blocs

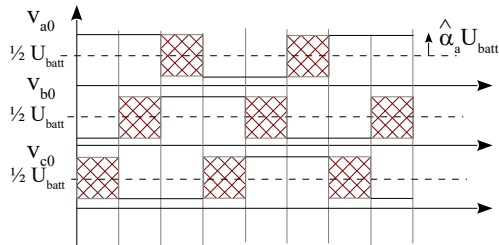


Fig 1.2b : Tensions imposées en sorties de l'onduleur par rapport au 0V du système. Les zones hachurées correspondent à un état haute impédance du bras considéré

Attention : dans les divers graphiques, c'est la tension moyenne qui est représentée, $\hat{\alpha}_i U_{Batt}$. Dans la réalité ce sont des signaux PWM. Voir simulation *LtSpice TriphaseBloc_SansBLDC.asc*.

1.1. Moteur non connecté

Si le moteur brushless n'est pas connecté, un des bras est complètement libre, c'est à dire en haute impédance. Pour définir les tensions simples et composées, il faut partir d'un neutre, élaboré au centre d'une étoile résistive à 3 branches (fig . 1.4) dont chacune est reliée à une phase. La tension de neutre est donc construite lors de chaque secteur de fonctionnement par seulement deux tensions actives. La tension de neutre est alors donnée par :

$$v_N = \frac{v_i + v_j}{2}, \text{ que l'on peut construire graphiquement.}$$

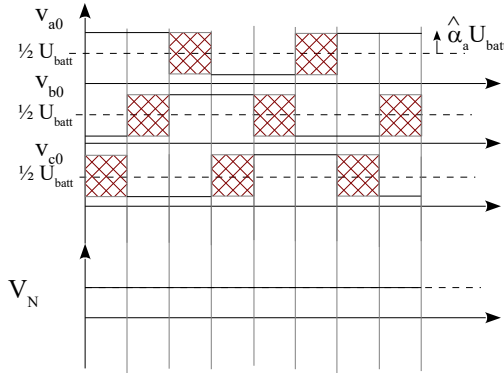


Fig 1.3 : tension de Neutre, onduleur à vide sans moteur

Dans ces conditions, lorsqu'un bras est à vide, le courant dans la résistance associée est nul. Ainsi le bras flottant est polarisé à la tension de neutre. Par conséquent la figure 1.3 se trouve modifiée puisque la zone d'incertitude est maintenant fixée à $V_{batt}/2$. Il est alors possible de tracer toutes les tensions, celles référencées à 0V, les tensions simples et composées.

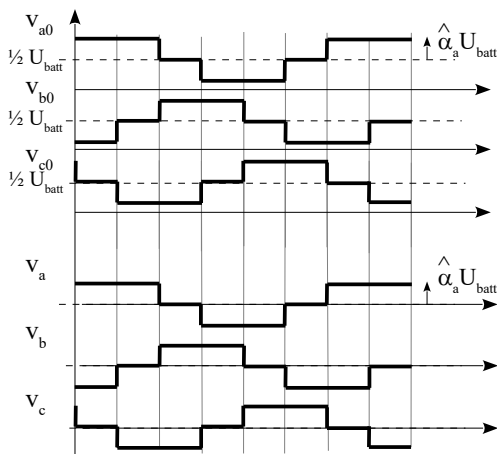


Fig 1.5a : tension de Neutre, tension simple par soustraction du neutre

Pour chaque secteur de fonctionnement on a toujours :

$$v_{i0} = \frac{U_{Batt}}{2} + \hat{\alpha}_i \cdot U_{Batt} \quad \text{et} \quad v_{j0} = \frac{U_{Batt}}{2} - \hat{\alpha}_i \cdot U_{Batt}$$

On retrouve donc le neutre constant :

$$v_N = \frac{\frac{U_{batt}}{2} + \frac{U_{batt}}{2}}{2} = \frac{U_{batt}}{2}$$

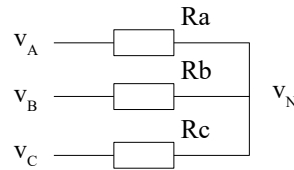


Fig 1.4 : Reconstruction neutre R_i typiquement égales $10k\Omega$

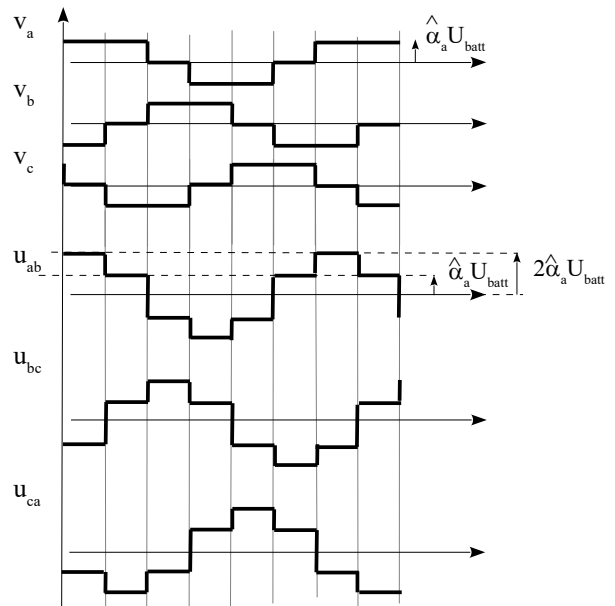


Fig 1.5b : tension simples et tensions composées en sortie d'onduleur à vide

Ci-dessous le schéma *Ltspice* permettant de simuler le comportement de l'onduleur en commandes par blocs, avec reconstruction du neutre, et possibilité de placer une charge triphasée.

NB : la charge triphasée est modélisée par un transformateur triphasé avec un couplage non optimal sur certaines simulations pour avoir des inductances de fuites filtrantes. Il ne s'agit pas du moteur BLDC puisqu'il n'y a pas ici de réaction magnétique du rotor (non simulé).

NB : les PWM sont entrelacés.

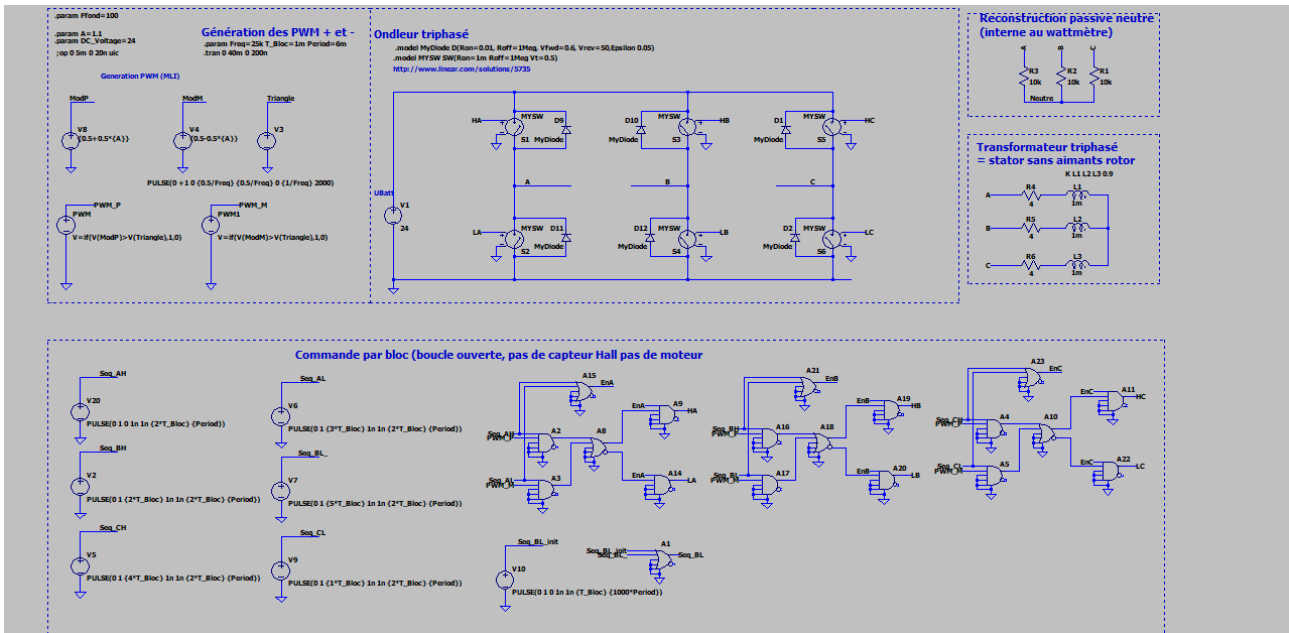


Fig 1.6a: Schéma LTSpice commande par bloc, boucle ouverte sur charge transformateur

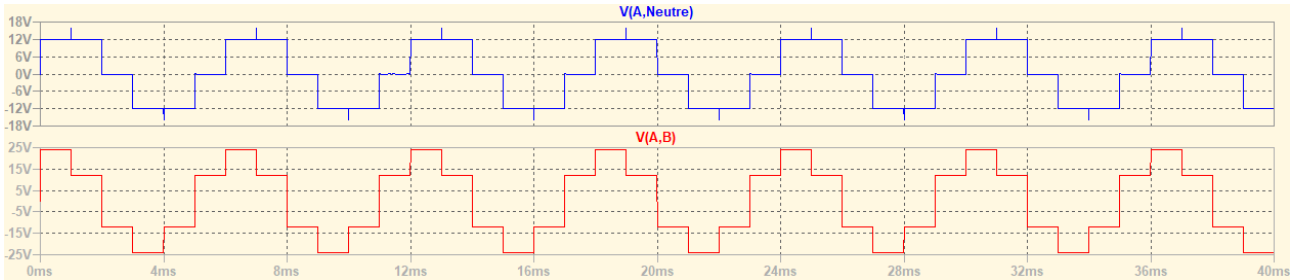


Fig 1.6b: Tensions simple v_a , tension composée u_{ab} , en pleine onde, $k=1$ sur le transformateur

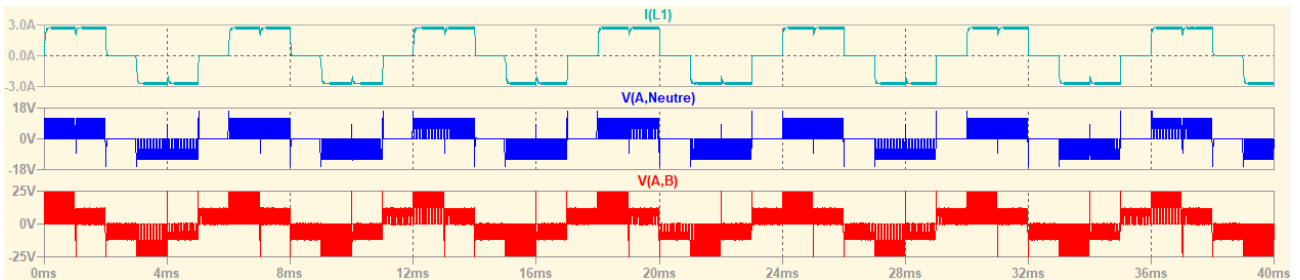


Fig 1.6c: Courant i_a , Tensions simple v_a , tension composée u_{ab} , 90% de rapport cyclique, $k=0,9$ sur le transformateur

1.2. Moteur connecté

Dans ce cas, la phase de haute impédance est affectée par la fcm du moteur. Donc dans ces secteurs là, les tensions v_a , v_b , v_c sont imposées par le moteur. Donc le neutre aura potentiellement une autre forme...

Reprenons le raisonnement, avec ce coup ci une charge triphasée dont l'allure est la suivante :

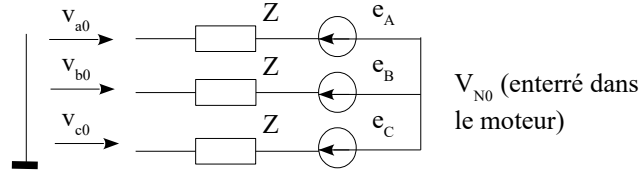


Fig 1.7 : moteur BLDC, modélisation de la charge

Considérons v_{a0} . Durant tout un secteur de 60° (état haute impédance) cette tension dépend du reste du circuit. Le courant dans sa branche est nul.

On peut écrire : $v_{a0} = \frac{v_{b0} + V_{c0}}{2} + e_a - \frac{e_b + e_c}{2}$ or le système crée un système de tensions triphasées équilibrées.

Donc $e_a + e_b + e_c = 0$, nous obtenons donc, étant donnée que les tensions V_{i0} sont symétriques par rapport à $V_{batt} / 2$:

$$v_{a0} = \frac{V_{Batt}}{2} + e_a - \frac{e_b + e_c}{2} = \frac{V_{Batt}}{2} + 3 \frac{e_a}{2} ,$$

de la manière généralisée, au moment de la phase flottante d'un bras nous avons :

$$v_{i0} = \frac{V_{Batt}}{2} + 3 \frac{e_i}{2} \quad (1) \text{ valable dans le secteur haute impédance uniquement !}$$

On peut alors retrouver la tension v_{N0} , par superposition : en annulant les 3 tensions e_i , on obtient

$v_{N0} = \frac{v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}}{3}$. Inversement en annulant les tensions v_{iN} , $v_{N0} = \frac{-e_a - e_b - e_c}{3}$ qui vaut 0 puisque qu'on a équilibre des tensions sinusoïdales.

La tension de neutre par rapport à 0 est donc simplement la moyenne des 3 tensions v_{i0} :

$$v_{N0} = \frac{v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}}{3} \quad (2)$$

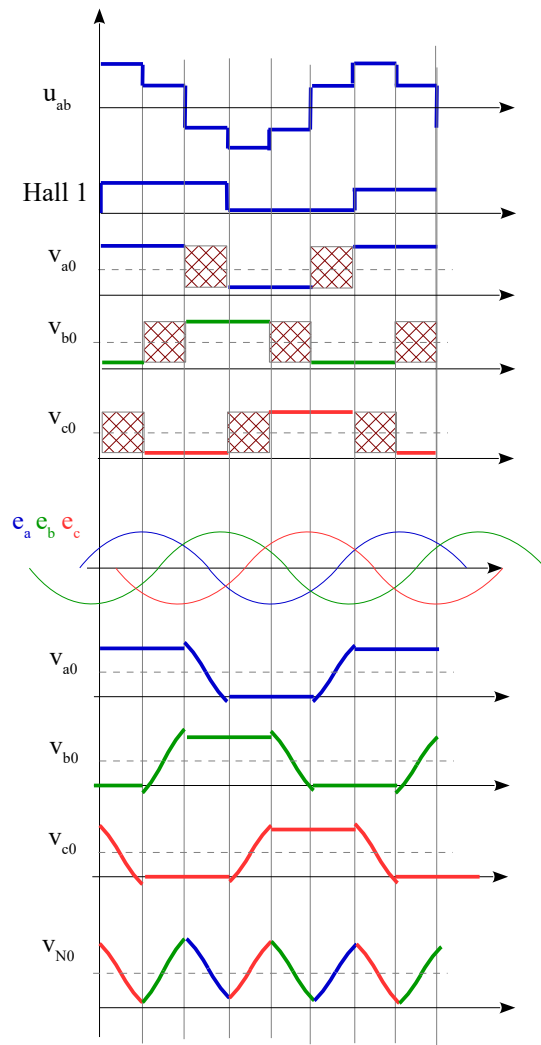


Fig 1.8: Forme d'onde des tensions dans le contexte de la commande par blocs, BLDC relié, tournant.

Les 5 premiers chronogrammes sont les tensions sans moteur. Le capteur à effet Hall est tracé à partir de la donnée constructeur [1]. Les 3 tensions v_{i0} sont tracées volontairement sans tenir compte des f_{cem} , donc en conservant les zones hachurées correspondant aux états haute impédance (HZ) du bras associé.

Les 3 f_{cem} e_i sont tracées à partir du document [1]. Les phases sont relatives à la position du capteur à effet Hall, c'est la raison pour laquelle le signal du capteur a été tracé.

Ici, les 3 tensions v_{i0} sont complétées à partir des tracés du dessus, et à partir de l'équation (1) .

On obtient ainsi la tension de neutre par rapport à la référence à partir de l'équation (2).

Il est alors possible de trouver la forme des tensions simples et composées : $v_a = v_{aN} = v_{a0} - v_{N0}$

Pour construire par exemple v_a , il faut analyser la tension secteur par secteur

1.2.1. Secteur 3

C'est le troisième secteur (en bleu) de v_{a0} .

Au niveau de v_{a0} , on a $v_{a0} = \frac{V_{Batt}}{2} + 3 \frac{e_a}{2}$.

Pour le neutre, toujours au niveau de ce troisième secteur, on a $v_{N0} = \frac{v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}}{3} = \frac{e_a}{2} + \frac{V_{Batt}}{2}$.

Ainsi sur ce secteur : $v_a = v_{a0} - v_{N0} = \frac{V_{Batt}}{2} + 3 \frac{e_a}{2} - \left(\frac{e_a}{2} + \frac{V_{Batt}}{2} \right) = e_a$. $v_a = e_a$ (3) sans surprise lors de la phase HZ.

1.2.2. Secteur 1

On a $v_a = v_{a0} - v_{N0}$ avec $v_{a0} = \frac{U_{Batt}}{2} + \hat{\alpha}_i \cdot U_{Batt}$ et $v_{N0} = \frac{e_c}{2} + \frac{V_{Batt}}{2}$ donc

$$v_a = \hat{\alpha}_i \cdot U_{Batt} - \frac{e_c}{2} \text{ sur le secteur 1}$$

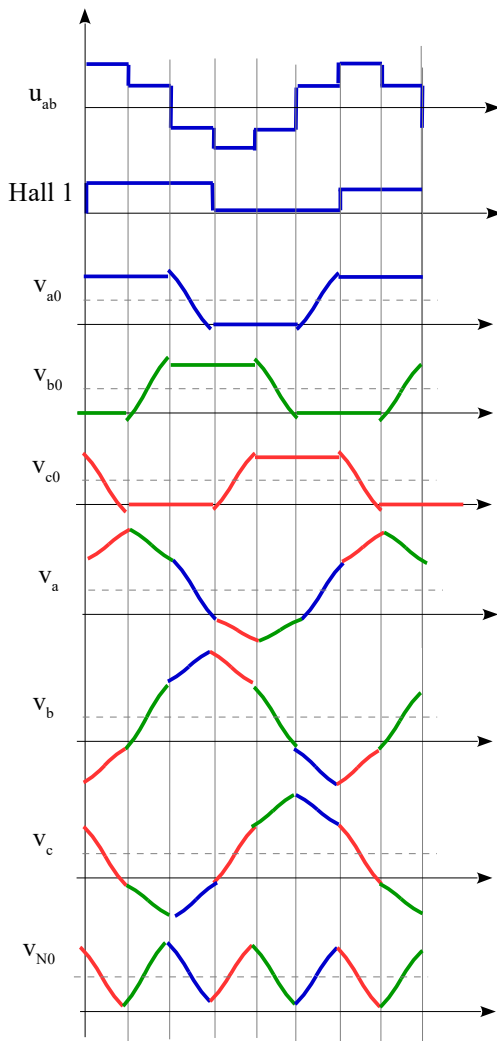
1.2.3. Secteur 2

En raisonnant de la même manière, on trouve

$$v_a = \hat{\alpha}_i \cdot U_{Batt} - \frac{e_b}{2} \text{ sur le secteur 2.}$$

1.2.4. tracé de la tension simple

Il est donc possible maintenant d'esquisser la forme des tensions simples, graphiquement donc.



Attention, on rappelle que la tensions u_{ab} (ici en haut) est considérée à vide, **sans moteur**. Clairement en charge sur le moteur elle n'a pas du tout la même forme. Onduleur connecté au moteur on aurait la différence $v_{a0} - v_{b0}$ ou encore $v_a - v_b$ des chronogrammes de dessous.

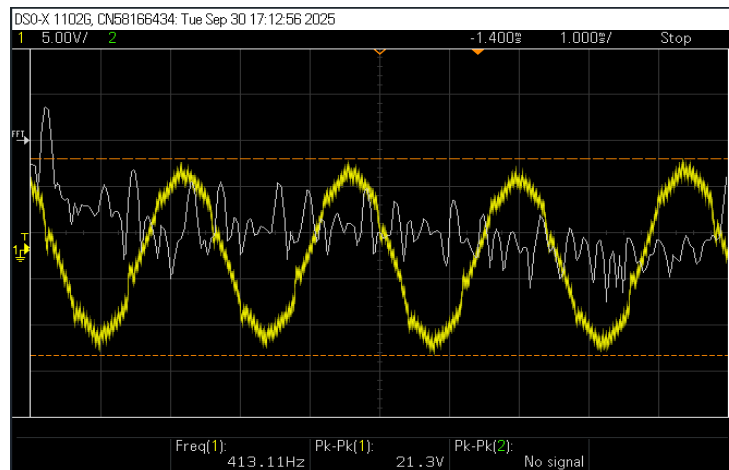


Fig 1.10: tension simple v_a effectivement mesurée en TP dans le wattmètre, le neutre étant reconstitué. **NB** la mesure est faite en sortie du filtre d'ordre 5 (ancienne version wattmètre) . L'amplitude est en réalité /10.

Fig 1.9: Forme d'onde des tensions dans le contexte de la commande par blocs, BLDC relié, tournant.

Pour information, on fournit ci-dessous le relevé du courant de la phase a dans le moteur à sa vitesse quasi maximale :

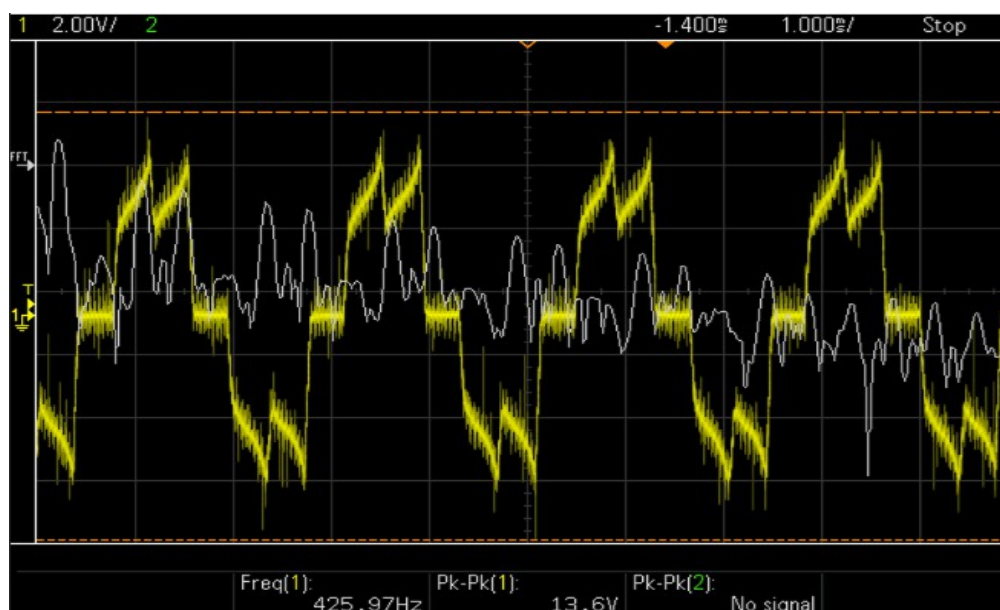


Fig 1.11: le courant de phase i_a , relevé expérimental

- [1] T.R. « *Autopilotage Maxon EC-Flat Réglage du retour de position par capteurs hall* », PositionHallSensors_v3.pdf
- [2] Maxon « *maxon EC motor ironless winding Technology – short and to the point* »