

Le défi de la mesure de l'inductance des bus bars laminés

Abdelilah GOULMANE, Thomas FOUET

MERSEN Pontarlier, 6 rue Claude Chappe, 25300 PONTARLIER

RESUME -La réduction de l'inductance parasitique est un défi pour l'électronique de puissance. L'inductance de la boucle de commutation, incluant les bus bars, doit être minimisée pour limiter les pertes lors de la commutation. Les travaux présentés ont pour but de comparer différentes méthodes de mesure et les comparer aux prédictions des modèles numériques. Cette comparaison montre que la mesure de l'inductance est très dépendante de la méthode et qu'une attention particulière doit être portée à l'équipement utilisé.

Bus bar, Inductance, Simulation, Mesure

1. MINIMISER L'INDUCTANCE

1.1. L'importance de l'inductance dans les circuits de puissance

Dans un monde où l'électrification omniprésente, les convertisseurs de puissance jouent un rôle très important. Ces derniers sont généralement composés de modules de puissance, de condensateurs et de bus bars.

L'arrivée ces dernières années de nouvelles technologies de puces tel que le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure de gallium (GaN) permet une augmentation de la tension de service ainsi que de la fréquence de commutation des modules de puissance.

L'inductance est alors devenue un défi pour les systèmes de conversion de puissance. En effet, les modules de puissance opérant à des fréquences de plus en plus élevées, sont alors soumis à des surtensions directement proportionnelles à l'inductance de la boucle de commutation (CCL : Commutation Current Loop), suivant l'équation :

$$V_{pic} = L_{CCL} \times \frac{di}{dt}$$

Avec :

V_{pic} : Surtension, en volt

L_{CCL} : Somme des inductances de la CCL, en H

$\frac{di}{dt}$: Variation du courant en fonction du temps, en A.s⁻¹

Afin de réduire ces surtensions, chaque composant de la CCL doivent avoir une inductance minimisée. Cela inclus les bus bars, qui jouent un rôle majeur pour réduire les pertes lors de la commutation [2].

1.2. Le bus bar laminé : un composant idéal pour réduire l'inductance

Parmi les différents systèmes d'interconnexion de puissance, les bus bars laminés sont particulièrement adaptés à la réduction de l'inductance [3]. Un exemple représentatif d'un bus bar laminé est présenté en Figure 1.



Fig. 1. Bus bar laminé pour de la conversion de puissance

Par leur conception, un assemblage de couches fines de conducteurs et d'isolants électriques laminés ensemble (Figure 2), ils permettent d'améliorer les propriétés électriques du bus bar, et notamment l'inductance [4], jusqu'à atteindre des valeurs de quelques nH.

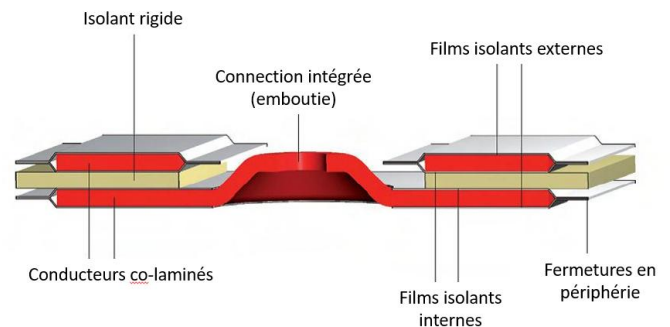


Fig. 2. Vue en coupe d'un bus bar laminé typique

2. MESURE DE L'INDUCTANCE SUR LES BUS BARS LAMINES

La mesure d'inductance est sensible et dépend à la fois du bus bar testé, de la sensibilité de l'équipement de mesure, ainsi que de la méthode de mesure utilisée.

Dans cet article, 2 méthodes de mesure sont étudiées :

- Par mesure d'impédance, avec un impédancemètre (Pont RLC)
- Par méthode ΔV

Les mesures ont été effectuées sur un bus bar laminé de taille modeste (environ 200x100mm), incluant 2 conducteurs (en cuivre d'1mm d'épaisseur) séparés par un isolant électrique (Figure 3).

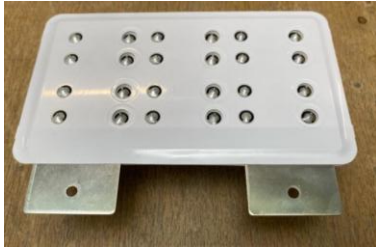


Fig. 3. Bus bar laminé utilisé pour la mesure d'inductance

2.1. Mesure par impédancemètre (Pont RLC)

Le pont RLC est un équipement de mesure destiné à mesurer l'impédance de différents électroniques, sur une plage de fréquence donnée. Pour ces essais, un équipement Keysight E4980A est utilisé, préalablement étalonné et calibré

La boucle de mesure incluant 6 condensateurs films d'une capacité de 5,6µF chacun. Les condensateurs sont reliés aux bus bars par soudure à l'étain, à raison de 2 points de connexion (fils) par condensateur, tel que schématisé dans la Figure 4.

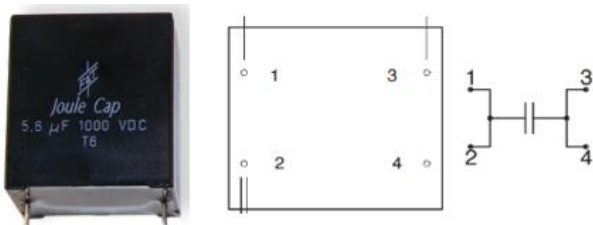


Fig. 4. Condensateur de capacité 5.6 uF et circuit électrique interne

La mesure est effectuée à la fréquence $f = 1\text{MHz}$, car l'équipement mesure l'inductance du condensateur à cette fréquence seulement. Le bus bar est connecté à une embase spécifique, afin de réduire au maximum la distance entre le bus bar et l'appareil de mesure (Figure 5).



Fig. 5. Dispositif de mesure de l'inductance de l'ensemble Bus bar + condensateurs, avec un pont RLC

La valeur mesurée de l'inductance de l'ensemble est :

$$L_{\text{ENS}} = 75.7 \text{ nH}$$

Pour déduire la valeur d'inductance du bus bar, il faut soustraire l'inductance des condensateurs L_c . En utilisant le même équipement, l'inductance d'un seul condensateur est mesurée, toujours à la fréquence de 1 MHz.

L'inductance d'un condensateur est mesurée à 28,2 nH. Les 6 condensateurs sont connectés en parallèle. L'inductance total L_{CT} est alors :

$$L_{\text{CT}} = 28.2 / 6 = 4.6 \text{ nH}$$

L'inductance du bus bar à $f = 1 \text{ MHz}$ est :

$$L_{\text{Busbar}} = L_{\text{ENS}} - L_{\text{CT}} = 71,1 \text{ nH}$$

2.2. Mesure par méthode ΔV

En parallèle des mesures réalisées précédemment, il est proposé dans cette partie de comparer les résultats obtenus avec une seconde méthode. A l'aide d'un banc de test, de nouvelles mesures sont réalisées en utilisant la méthode ΔV . Cette méthode s'appuie sur l'équation suivante :

$$\Delta V = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Avec :

ΔV : Moyenne de tension dans un intervalle de temps Δt , en V

L : Inductance, en H

Δt : Intervalle de temps, en s

ΔI : Différence de courant dans un intervalle de temps Δt , en A

Le principe de cette méthode consiste à envoyer une impulsion de tension calibrée dans la boucle du circuit concernée par la mesure. La réponse mesurée est une courbe de tension et de courant, obtenues grâce à des capteurs de courant et de tension adaptés.

Afin d'obtenir la valeur d'inductance du bus bar, la mesure est réalisée en 2 étapes :

- 1- La première étape consiste à mesurer la boucle globale d'inductance (présentée en Figure 6) qui comporte le bus bar et l'ensemble des câbles du banc de test.

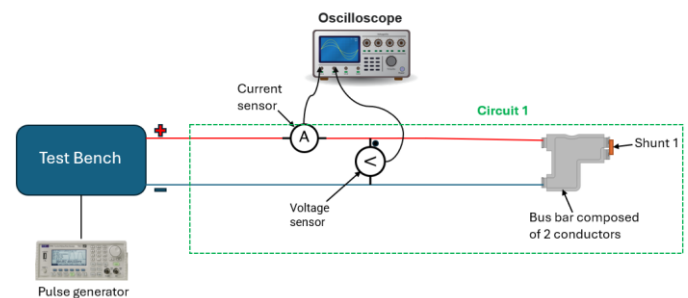


Fig. 7. Circuit de mesure de l'étape 1 (boucle complète)

- 2- La seconde étape consiste à mesurer la boucle d'inductance du banc de test seulement (Figure 7)

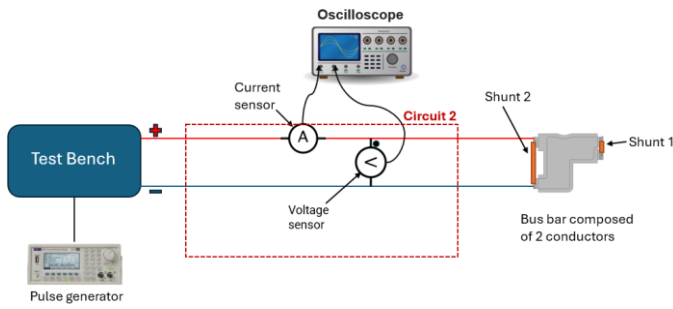


Fig. 7. Circuit de mesure de l'étape 2 (banc de test seul)

La valeur finale de l'inductance du bus bar est alors :

$$L_{\text{bus bar}} = L_{\text{Circuit1}} - L_{\text{Circuit2}}$$

La Figure 8 présente le dispositif de test réalisé pour la mesure de la boucle complète, incluant le bus bar.

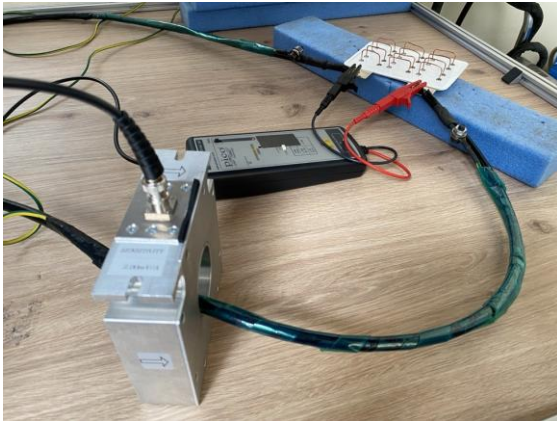


Fig. 8. Circuit de mesure d'inductance incluant le bus bar

Avec cette méthode, il n'est pas possible de réaliser des mesures en incluant des condensateurs. Les connexions des condensateurs ont donc été court-circuitées afin de permettre la circulation du courant dans le bus bar.

Un oscilloscope enregistre la tension et le courant pendant le test (Figure 9).

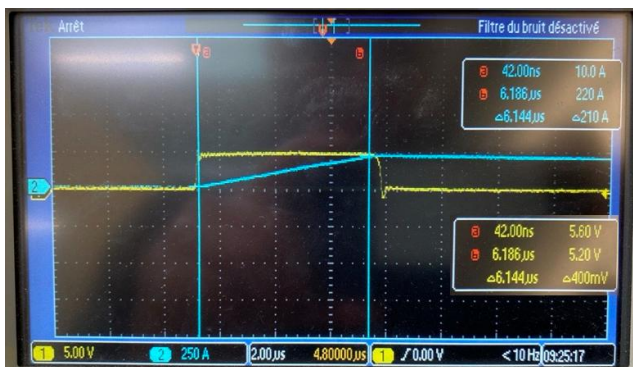


Fig. 9. Courbes de tension et de courant lors de la mesure d'inductance de l'étape 1

La mesure obtenue permet d'obtenir les valeurs suivantes :

- $\Delta t = 6,144 \mu s$, soit une fréquence de 163 kHz
- $\Delta V = 5,4 V$
- $\Delta I = 210 A$

Donc, la valeur de l'inductance du circuit 1 est : $L_{C1} = 158 nH$.

La Figure 10 présente le circuit de la deuxième étape de la mesure d'inductance, avec un shunt intégré à l'entrée du bus bar.

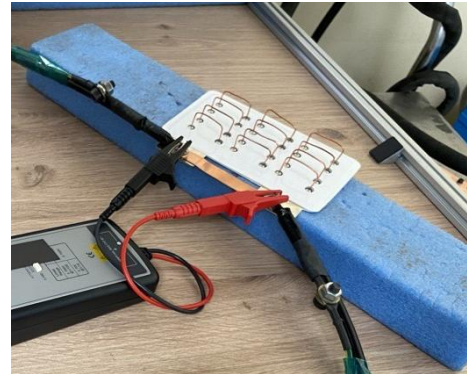


Fig. 10. Section du circuit de mesure d'inductance, avec shunt sur le bus bar

Les valeurs obtenues lors de cette mesure sont :

- $\Delta t = 6,144 \mu s$, soit une fréquence de 163 kHz
- $\Delta V = 3.8 V$
- $\Delta I = 270 A$

La valeur de l'inductance du circuit 2 est : $L_{C2} = 86.5 nH$.

L'inductance du bus bar à 163 kHz est alors :

$$L_{\text{Busbar}} = L_{C1} - L_{C2} = 71.5 nH$$

Ces travaux ont porté sur deux méthodes de mesures d'inductance distinctes. Malgré les contraintes des différentes méthodes, il est toutefois intéressant de constater que des valeurs très proches sont obtenues.

Il est à noter que la mesure par Méthode ΔV est particulièrement contraignante, puisqu'elle est fortement dépendante du dispositif d'essai. De plus, elle ne permet une mesure qu'à une seule fréquence.

3. SIMULATION D'INDUCTANCE DES BUS BARS LAMINES

La simulation de l'inductance d'un bus bar laminé à deux conducteurs est possible, à l'aide d'un logiciel de simulation numérique basé par exemple sur la méthode des éléments finis (FEM). Elle est particulièrement utile pour valider de design d'un produit lors d'un développement.

Le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé pour cette étude. Le principe est d'utiliser les équations différentielles de Maxwell, qui permettent de calculer l'inductance du bus bar à une fréquence donnée, selon l'équation suivante :

$$L = \frac{X}{(2\pi f_c)}$$

Avec :

- L : Inductance (nH)
- f_c : Fréquence (Hz)
- X : La norme de la partie imaginaire de l'impédance

complexe $Z = R + iX$

La simulation de la boucle de commutation de courant (CCL) a été réalisée. Pour cela, tous les connexions condensateurs ont été court-circuitées.

La simulation d'inductance du bus bar est réalisée pour les deux configurations de mesure précédemment étudiées, soit :

- Avec un court-circuit équivalent à un condensateur reliant les quatre connexions (Méthode 1).
- Avec un court-circuit représentant un fil en cuivre court-circuitant deux connexions (Méthode 2).

Les courts-circuits utilisés dans la modélisation doivent respecter les mêmes dimensions des shunts utilisés lors des mesures, plus particulièrement la hauteur des pattes de connexion pour les condensateurs (méthode 1) et des fils en cuivre court-circuitant les deux connexions (méthode 2) utilisés dans la mesure. A noter également que les courts-circuits utilisés pour relier les connexions du condensateur sont isolés magnétiquement : ils n'influencent donc pas le circuit de simulation d'inductance.

3.1. Simulation d'inductance / Méthode 1 :

La Figure 11 représente le circuit de simulation d'inductance de la méthode 1.

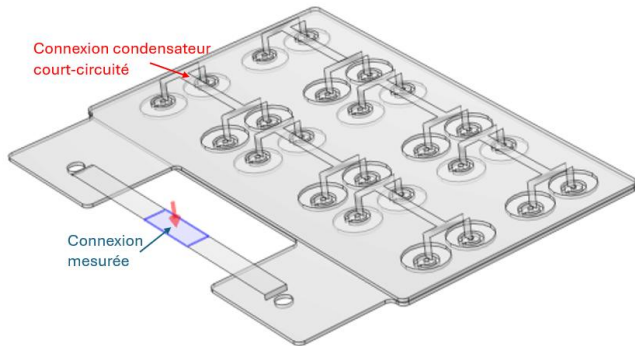


Fig. 11. Circuit de simulation d'inductance de la méthode 1

La simulation a été réalisée à la fréquence de mesure (1 MHz). La valeur d'inductance simulée L_1 est 66.3 nH.

3.2. Simulation d'inductance / Méthode 2 :

La Figure 12 représente le circuit de simulation d'inductance de la méthode 2.

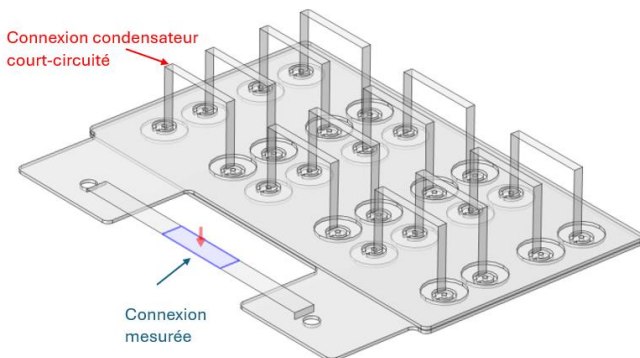


Fig. 12. Circuit de simulation d'inductance de la méthode 2

La simulation a été réalisée à la fréquence de mesure (163 kHz). La valeur d'inductance simulée L_2 est 66.9 nH.

4. COMPARAISON INDUCTANCE MESUREE ET SIMULEE

Les simulations réalisées donnent des valeurs très proches. Le Tableau 1 récapitule les valeurs d'inductance mesurées et simulées, selon chaque méthode.

Tableau 1. Valeurs d'inductances mesurées et simulées

Méthode de Mesure/Simulation	Fréquence (kHz)	Inductance mesurée (nH)	Inductance simulée (nH)
1 – Pont RLC	1000	71,1	66,3
2 – Méthode ΔV	163	71,5	66,9

On constate un écart de 6,5 % entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées. Cette différence est faible, et peut être expliquée par des contraintes liées aux méthodes de mesure.

Pour les mesures par Pont RLC, l'influence principale est liée à la façon dont le produit à tester est relié à l'équipement de mesure. Lorsque le produit n'est pas fixable directement, il est alors nécessaire de recourir à des ajouts, comme montré Figure 13.



Fig. 13. Connectiques de mesure d'inductance utilisée avec la méthode 1 de mesure

Ces connectiques, ayant leur propre inductance, exercent une influence sur la mesure finale. Et il est compliqué de mesurer leurs inductances afin de les soustraire de la valeur finale.

Pour les mesures avec la méthode ΔV , les câbles d'alimentation utilisés pour alimenter le bus bar ont un impact significatif. De même que les sondes utilisées pour mesurer la tension (Figure 14).



Fig. 14. Câbles d'alimentation pour alimenter le bus bar + les cosses du capteur de tension

Alors que le setup de test est simple à figer avec un Pont RLC, il n'en est pas de même avec la méthode ΔV , où les câbles utilisés doivent s'adapter au produit testé, ce qui modifie l'inductance du système en permanence.

5. CONCLUSIONS

L'inductance étant une propriété particulièrement importante pour l'électronique de puissance, la maîtrise de la mesure est particulièrement important. Cette étude a pour objectif de comparer deux méthodes de mesure à des simulations équivalentes, et de discuter des paramètres impactant le plus les résultats.

Il ressort des résultats obtenus des écarts faibles entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées. Ces résultats mettent en avant l'importance du dispositif de test pour la réalisation de ces mesures (effets parasites générés par le dispositif de test).

Ces difficultés soulignent la complexité de la mesure d'inductance dans un environnement de test réel et la nécessité de prendre en compte ces facteurs parasites pour améliorer la précision des mesures. Afin d'optimiser la fiabilité des résultats, des ajustements dans la configuration des équipements, ainsi que des techniques de calibration avancées, pourraient être envisagés. Ces résultats montrent également que la méthode du Pont RLC est à privilégier, car elle permet une reproductibilité plus importante, ainsi que de réaliser des mesures à différentes fréquences.

6. REFERENCES

- [1] M. M. Idrees, "Study of medium voltage direct current (MVDC) grids embedding distributed energy resources", Thèse, Politecnico Milano, 2019
- [2] Bo Liu, Weijie Li, Dongyi Meng, Lijian Diao, Yingtao Ma, Tengfei Qiu and Lijun Diao, "Low-Stray Inductance Optimized Design for Power Circuit of SiC-MOSFET-Based Inverter", IEEE Access, January 2020
- [3] T. Fouet, S. Dario, T. Sukuraba, et al., Passive components facing wideband gap devices' new thermal and electrical challenges, 2022 International Power Electronics Conference
- [4] C. Chen, Y. Chen, X. Pei, Y. Kang, "Investigation, Evaluation and Optimization of Stray Inductance in Laminated Busbar", IEEE Transactions on Power Electronics · July , 2