

**21^{ème} Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique
13 au 15 juin 2023 – Toulouse INP – ENSEEIHT**

**DÉTERMINATION DES ÉMISSIONS EM CONDUITES DANS UNE CHAÎNE
DE CONVERSION DE PUISSANCE DC/3AC**

L. Guibert¹, J.-P. Parmantier¹, I. Junqua¹

¹ ONERA/DEMR, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse-France, laurent.guibert@onera.fr

Financé par : DGAC



France Relance



Union Européenne
NextGenerationEU



Contexte des travaux

Cette thématique concerne la CEM dans les équipements en électronique de puissance, et plus particulièrement sur l'étude des émissions EM en mode conduit. Nous pouvons citer comme exemples concernés par cette thématique :

- Les véhicules électriques,
- les actionneurs électriques dans les avions...

Dans cette présentation nous abordons cette thématique de la manière suivante :

- Présentation d'un modèle
- Utilisation d'un banc de test
- Setup expérimental de mesures
- Comportement du modèle
- Confrontation du modèle
- Conclusion

Présentation d'un modèle

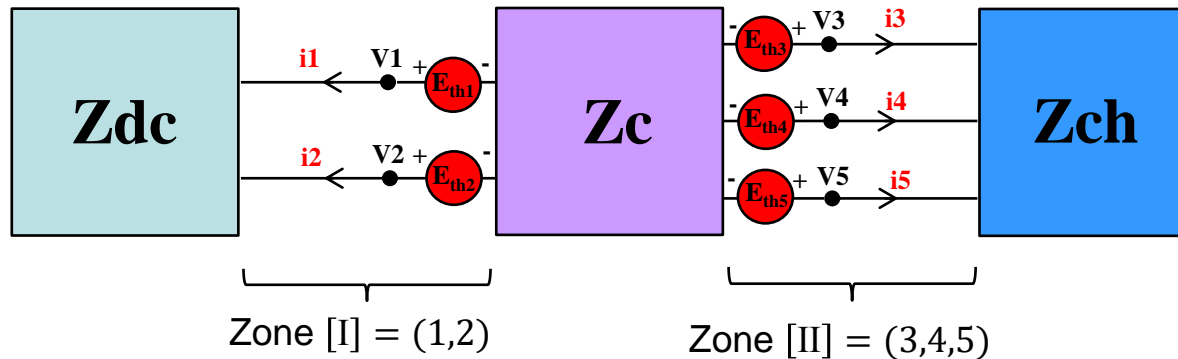
Schéma synoptique d'une chaîne de conversion.



- Une source de tension continue qui dans la majorité des cas est constituée par des batteries (ou une alimentation à partir du réseau électrique dans une configuration de banc d'étude).
- Un convertisseur DC/3AC (triphasée dans la plupart des cas) constitué d'une électronique de puissance qui permet de générer au niveau de sa sortie une tension alternative à fréquence variable à partir d'une tension continue sur son entrée. Ce dernier est considéré comme étant la source de bruit des émissions EM en mode conduit.
- La charge est un moteur électrique (de type synchrone à aimants permanents, et également triphasé dans la majorité des cas) qui permet d'animer un actionneur mécanique.

Présentation d'un modèle

Modèle de la chaîne de conversion.



Relations matricielles dans les différentes Zones de liaisons :

$$[i]_I = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$$[V]_I = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

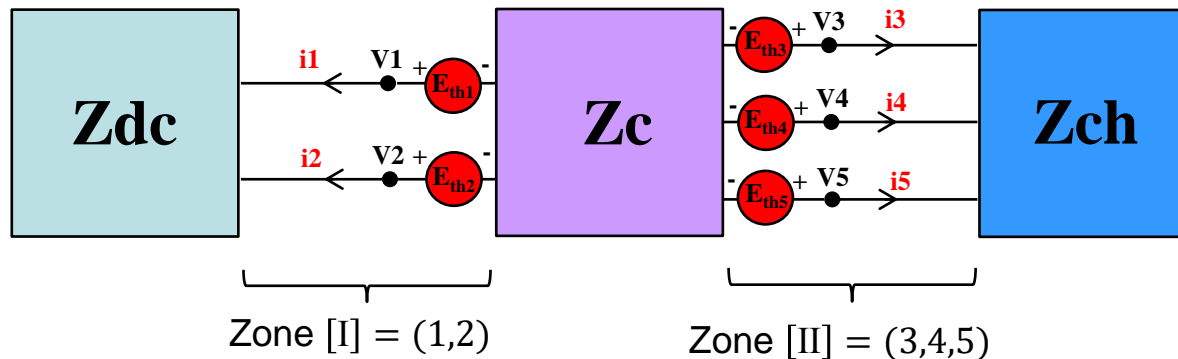
$$[E_{th}]_I = \begin{bmatrix} E_{th1} \\ E_{th2} \end{bmatrix}$$

$$[i]_{II} = \begin{bmatrix} i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix}$$

$$[V]_{II} = \begin{bmatrix} V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad [E_{th}]_{II} = \begin{bmatrix} E_{th3} \\ E_{th4} \\ E_{th5} \end{bmatrix}$$

Présentation d'un modèle

Modèle de la chaîne de conversion.



Relations matricielles dans les différentes Zones de liaisons :

1) $[Z_{dc}] * [i]_I = [V]_I$

2) $[Z_{ch}] * [i]_{II} = [V]_{II}$

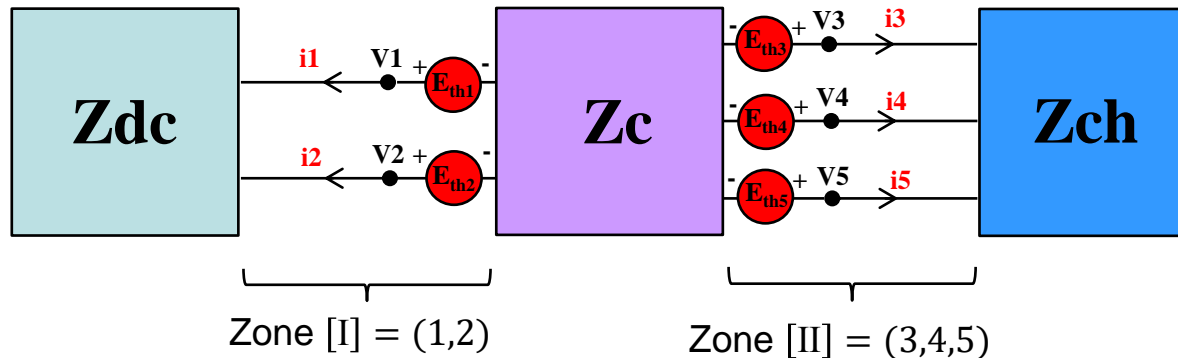
3) $\begin{bmatrix} [E_{th}]_I \\ [E_{th}]_{II} \end{bmatrix} - [Z_c] * \begin{bmatrix} [i]_I \\ [i]_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V]_I \\ [V]_{II} \end{bmatrix}$

(Avec la relation 3) (Avec les relations 1 et 2)

$$\begin{bmatrix} [V]_I \\ [V]_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [E_{th}]_I \\ [E_{th}]_{II} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [Z_{c,I,I}] & [Z_{c,I,II}] \\ [Z_{c,II,I}] & [Z_{c,II,II}] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [i]_I \\ [i]_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{dc}] & [0] \\ [0] & [Z_{ch}] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [i]_I \\ [i]_{II} \end{bmatrix}$$

Présentation d'un modèle

Modèle de la chaîne de conversion.



Avec les relations matricielles précédentes nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} [E_{th}]_I \\ [E_{th}]_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{dc}] & [0] \\ [0] & [Z_{ch}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [Z_{c,I,I}] & [Z_{c,I,II}] \\ [Z_{c,II,I}] & [Z_{c,II,II}] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [i]_I \\ [i]_{II} \end{bmatrix}$$

Utilisation d'un banc de test

Moteur brushless 5 kW
utilisé en moteur

Moteur brushless 5 kW
utilisé en alternateur

Alimentation sur secteur
230 VAC / 72 VDC, 4 kW

Charge RL
reliée à l'alternateur

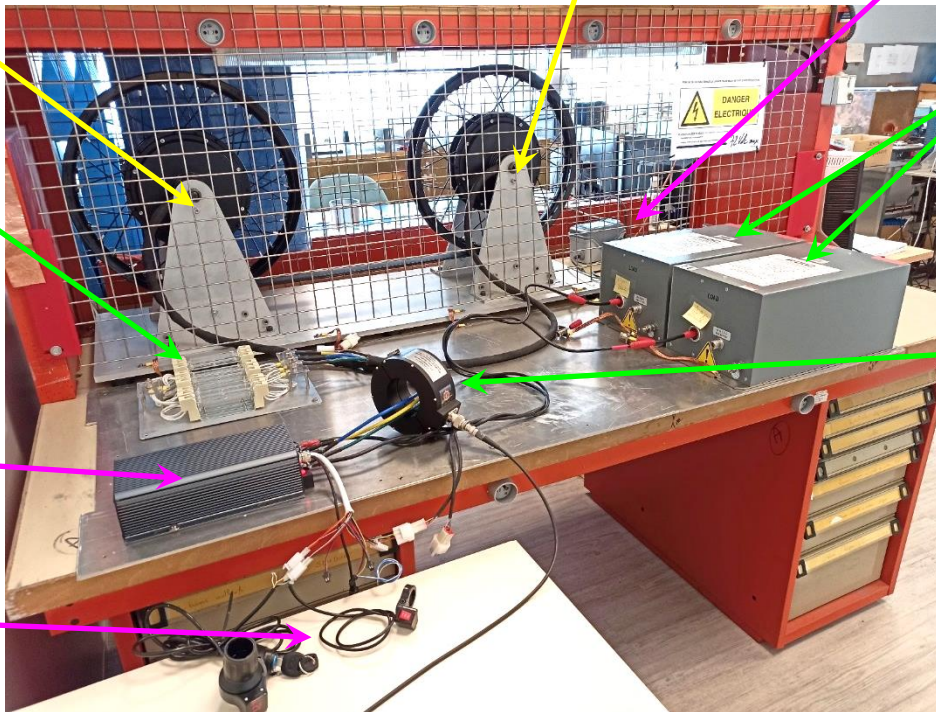
Deux RSIL 100 A
Côté HVDC

Convertisseur
HVDC / 3 HVAC
(BMSWC 80 A à Si MosFet)

Pince de courant

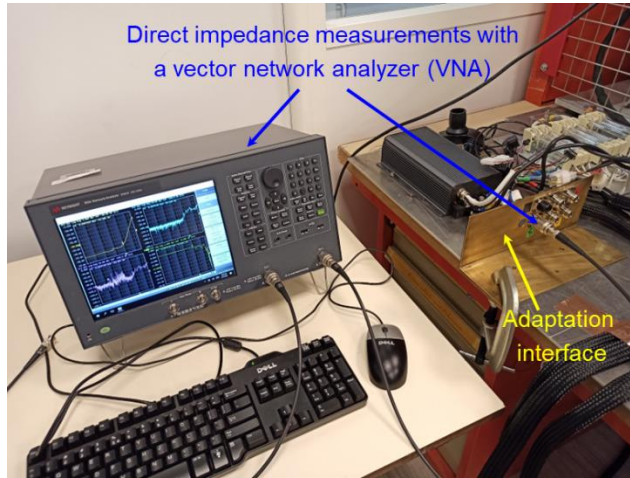
Système de commande
du banc

Banc équipé de 2 jeux de
câbles de
différentes longueurs
(1 m et 5 m) côtés HVDC et
HVAC



Setup expérimental

Mesures des impédances $Z(f)$ de 1 kHz à 400 MHz.



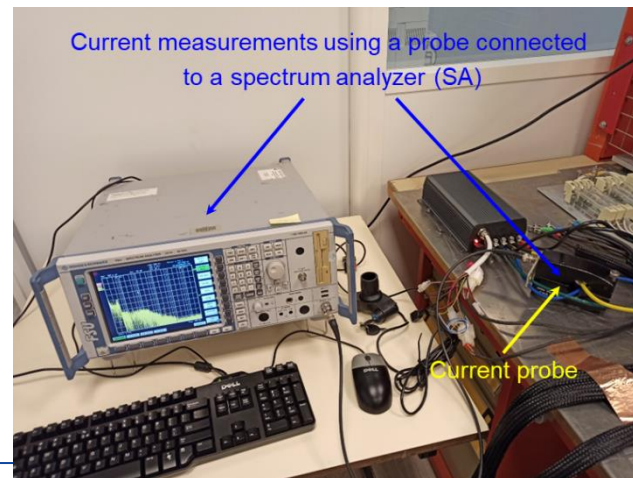
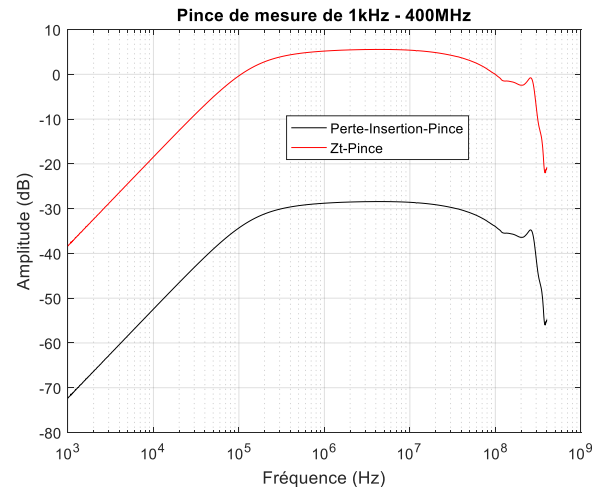
- Les mesures d'impédance sont réalisées à l'aide d'un VNA (Vector Network Analyzer).
- Une interface d'adaptation permet de se connecter au plus près des ports de l'équipement concerné.
- Notre VNA ne possède que 2 ports, et lors de mesures sur un équipement constitué de plus de 2 ports, une charge de référence 50 Ohms est placée sur chacun des ports restant libre. Une rotation est ensuite effectuée afin d'obtenir tous les termes de mesures de la matrice $[S_{i,j}]$.
- La matrice impédance $[Z_{i,j}]$ est obtenue par calcul.
- L'obtention de ces matrices impédance est effectuée sur des équipements en OFF (non polarisé).

Setup expérimental

Mesures des courants $I(f)$ de 1 kHz à 400 MHz.

- Les mesures de courant sont réalisées à l'aide d'une pince de courant reliée à un SA (Spectrum Analyzer).
- Au préalable une étape de calibration de la pince de courant est effectuée avec un VNA (Vector Network Analyzer) dans la même plage de fréquence afin d'obtenir ses pertes d'insertion pour ensuite calculer son impédance de transfert Z_t .
- Les valeurs de courant sont obtenues par calculs :

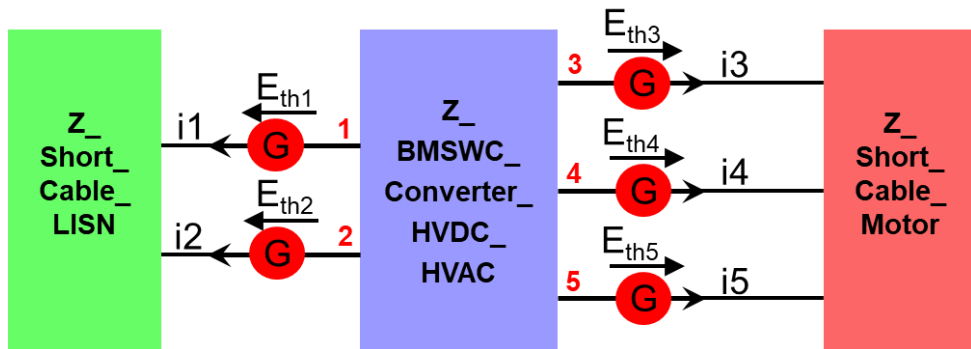
$$I(A) = \frac{V(V)}{Z_t(\Omega)} \rightarrow dB\mu A = 20 * \log\left(\frac{A}{10^{-6}}\right)$$



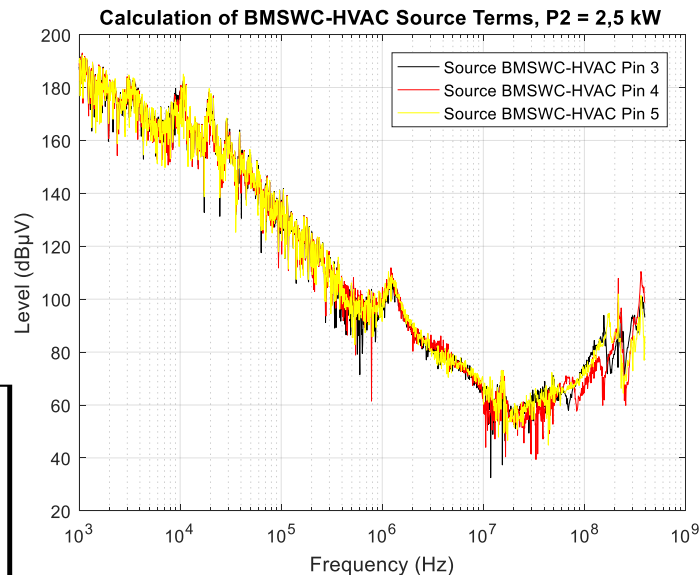
Comportement du modèle

Avec trois points de fonctionnement du banc : 1.2 kW, 2.5 kW et 4 kW.

Calcul des termes sources à 2.5 kW avec le jeu de câbles court de 1 m.

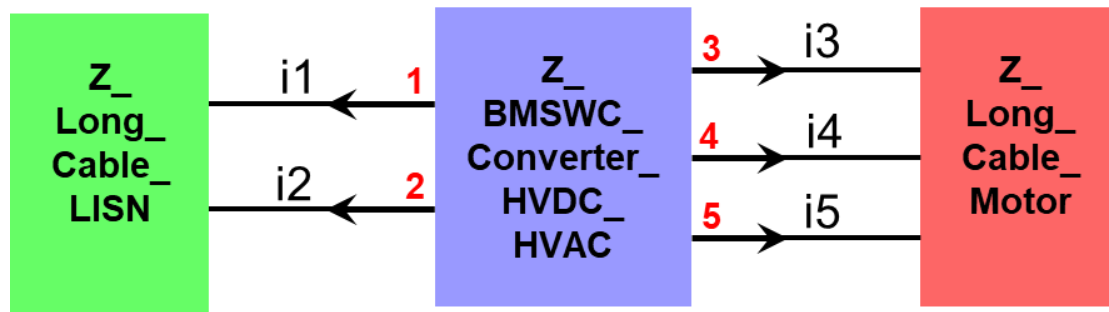


$$\begin{bmatrix} E_{th1} \\ E_{th2} \\ E_{th3} \\ E_{th4} \\ E_{th5} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} Z \\ \text{Short} \\ \text{Cable} \\ \text{LISIN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z \\ \text{BMSWC} \\ \text{Converter} \\ \text{HVDC} \\ \text{HVAC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z \\ \text{Short} \\ \text{Cable} \\ \text{Motor} \end{bmatrix} \right) * \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix}$$



Comportement du modèle

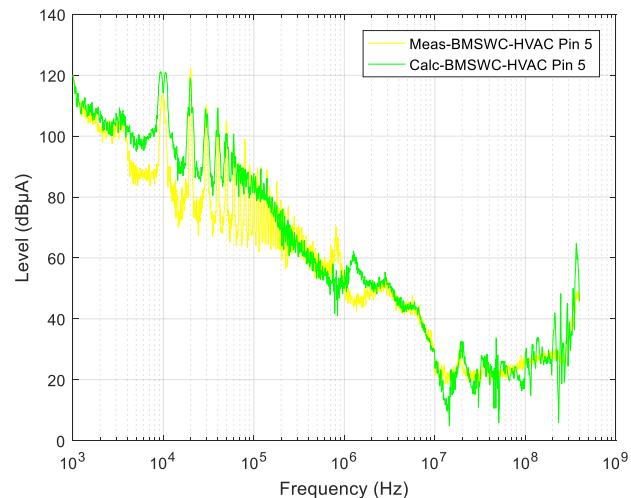
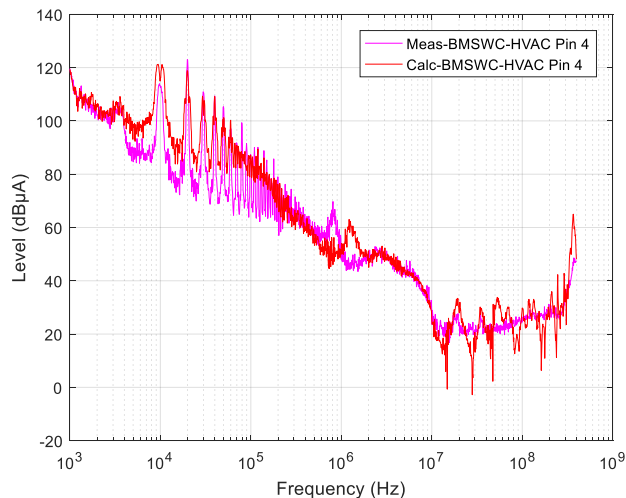
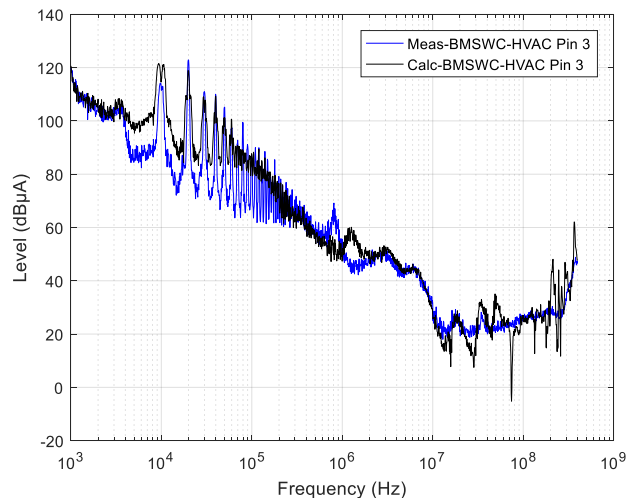
Calculs des courants sur deux points de fonctionnement du banc : 1.2 kW et 4 kW, avec les termes sources calculés à 2,5 kW et le jeu de câbles long de 5 m.



$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} Z \\ \text{Short} \\ \text{Cable} \\ \text{LSIN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z \\ \text{BMSWC} \\ \text{Converter} \\ \text{HVDC} \\ \text{HVAC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z \\ \text{Short} \\ \text{Cable} \\ \text{Motor} \end{bmatrix} \right)^{-1} * \begin{bmatrix} E_{th1} \\ E_{th2} \\ E_{th3} \\ E_{th4} \\ E_{th5} \end{bmatrix}$$

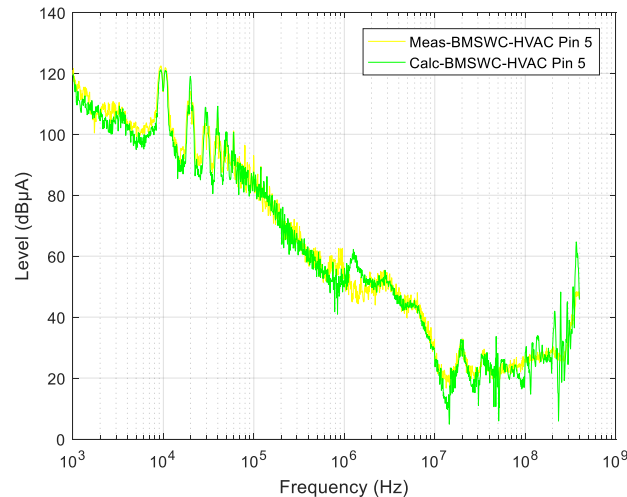
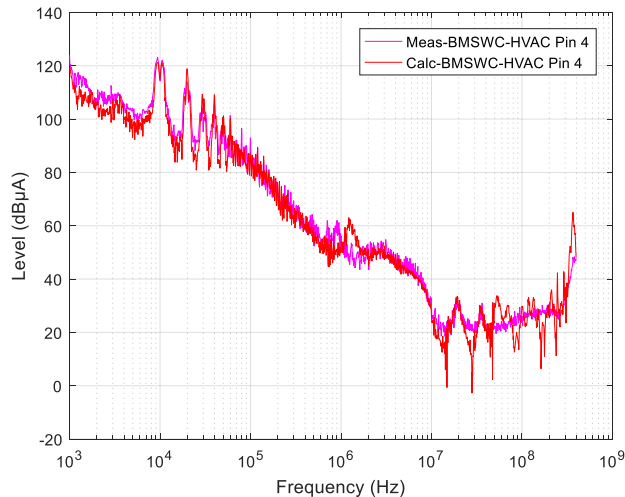
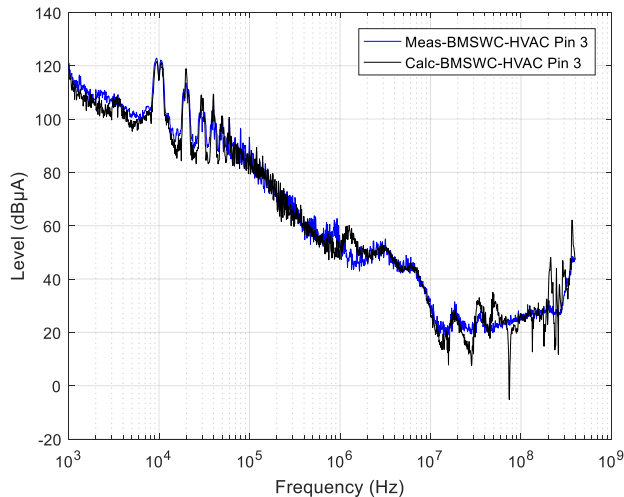
Comportement du modèle

Comparaisons mesures/calculs des courants obtenus sur le point de fonctionnement du banc à 1.2 kW.



Comportement du modèle

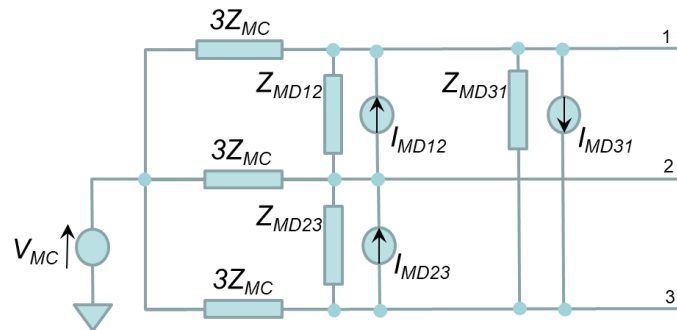
Comparaisons mesures/calculs des courants obtenus sur le point de fonctionnement du banc à 4 kW.



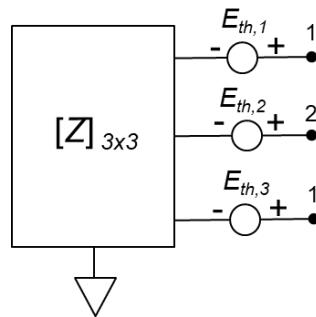
Confrontation du modèle

Passage de la méthode AMPÈRE à la méthode ONERA sur les 3 ports de sorties HVAC du convertisseur.

Modèle AMPÈRE



Modèle ONERA

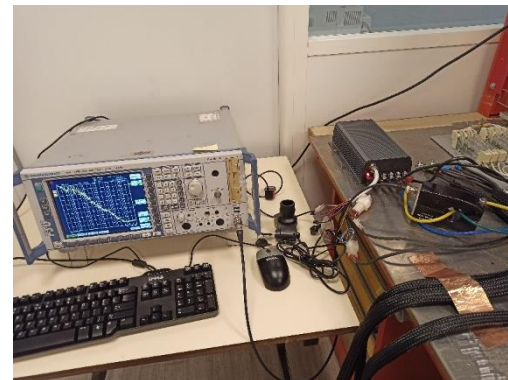


Mesures des Z_{MC} , Z_{MD} et Z_{Charge} au VNA :

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{3Z_{MC}} + \frac{1}{Z_{MD12}} + \frac{1}{Z_{MD31}} & -\frac{1}{Z_{MD12}} & -\frac{1}{Z_{MD31}} \\ -\frac{1}{Z_{MD12}} & \frac{1}{3Z_{MC}} + \frac{1}{Z_{MD12}} + \frac{1}{Z_{MD23}} & -\frac{1}{Z_{MD23}} \\ -\frac{1}{Z_{MD31}} & -\frac{1}{Z_{MD23}} & \frac{1}{3Z_{MC}} + \frac{1}{Z_{MD12}} + \frac{1}{Z_{MD31}} \end{bmatrix}$$

$[Z](3 \times 3)$ par l'inversion de $[Y](3 \times 3)$:

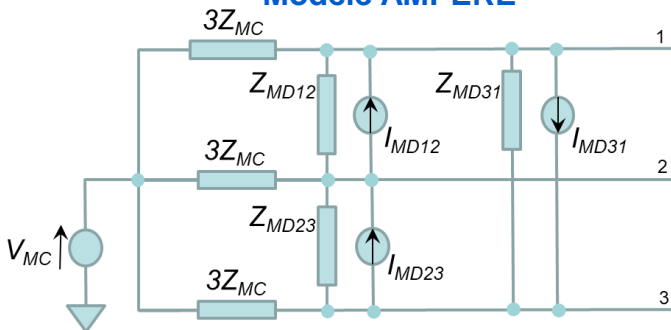
$$[Z] = [Y]^{-1}$$



Confrontation du modèle

Passage de la méthode AMPÈRE à la méthode ONERA sur les 3 ports de sorties HVAC du convertisseur.

Modèle AMPÈRE



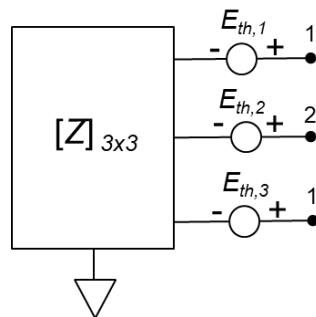
Mesures des courants $i_1 + i_2 + i_3$, $i_1 - i_2$, $i_2 - i_3$ et $i_3 - i_1$ par pince de courant et analyseur de spectre et calculs de V_{MC} et des I_{MDxx} :

$$V_{MC} = \left(\frac{3Z_{MC} + Z_{charge}}{3} \right) (i_1 + i_2 + i_3)$$

$$I_{MD12} = \frac{i_1 - i_2}{3\alpha} \quad I_{MD23} = \frac{i_2 - i_3}{3\alpha} \quad I_{MD31} = \frac{i_3 - i_1}{3\alpha}$$

Le terme α est composé de Z_{MC} , Z_{MD} et Z_{charge}

Modèle ONERA



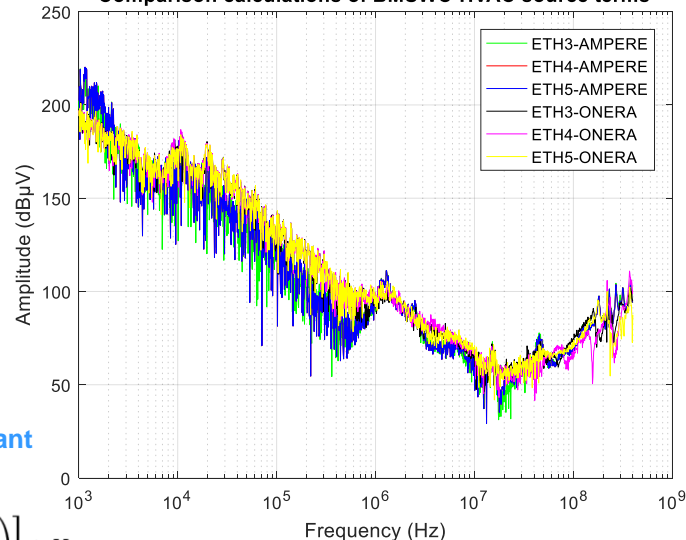
Calculs de $E_{th,1}$, $E_{th,2}$ et $E_{th,3}$ par superposition de 4 états en jouant sur I_{MD12} , I_{MD12} , I_{MD12} et V_{MC}

$$E_{th,1} = \left[(I_{MD12} - I_{MD31}) \left(\frac{9Z_{MC}Z_{MD}}{3(9Z_{MC} + Z_{MD})} \right) \right] + V_{MC}$$

$$E_{th,2} = \left[(I_{MD23} - I_{MD12}) \left(\frac{9Z_{MC}Z_{MD}}{3(9Z_{MC} + Z_{MD})} \right) \right] + V_{MC}$$

$$E_{th,3} = \left[(I_{MD31} - I_{MD23}) \left(\frac{9Z_{MC}Z_{MD}}{3(9Z_{MC} + Z_{MD})} \right) \right] + V_{MC}$$

Comparison calculations of BMSWC-HVAC source terms



Conclusion

➤ Synthèse

- ✓ Présentation d'une méthode de modélisation de type boîte noire basée sur une approche linéaire de circuits et de générateurs équivalents de Thévenin (ONERA).
- ✓ Présentation d'un banc de test d'une puissance maximale de 5 kW offrant une grande souplesse d'utilisation.
- ✓ Une première démarche sur le comportement du modèle ONERA pour différents points de fonctionnement du banc de test a permis d'obtenir des résultats satisfaisants sur un exemple d'équipement à 5 ports.
- ✓ Une deuxième démarche de confrontation du modèle, par l'établissement de relations de passage de la méthode AMPERE vers la méthode ONERA sur un équipement à 3 ports a permis d'obtenir des résultats similaires.
 - ❑ Ces deux méthodes permettent d'obtenir des résultats tout à fait comparables avec des mesures.
 - ❑ La méthode AMPERE permet de traiter directement le mode commun et le mode différentiel. Son setup expérimental peut s'avérer assez complexe pour un équipement au delà de 3 ports.
 - ❑ Le setup expérimental de la méthode ONERA permet de traiter assez facilement un équipement au delà de 3 ports. Pour obtenir le mode commun et le mode différentiel, un post traitement est nécessaire sur les résultats qui intègrent les deux modes.

➤ Perspectives

- ✓ Poursuivre la démarche de validation de la méthode de modélisation ONERA avec différents points de fonctionnement sur un banc de charge d'une puissance de 10 kW du démonstrateur TROPHEA (PHYCIEL).
- ✓ Envisager de poursuivre la méthode de modélisation dans le domaine du filtrage des émissions conduites, dans une première étape sur la partie HVDC, et dans une éventuelle suite sur la partie HVAC.

Merci de votre attention !
Y a-t-il des questions ?