

# Convertisseur DC/DC pour réseau MVDC avec services systèmes.

Amina ALOUANI<sup>1</sup>, David FREY<sup>1</sup>, Jean-Paul GAUBERT<sup>2</sup>, Yves LEMBEYE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP\*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

<sup>2</sup>Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, LIAS, Poitiers, France

E-mail: amina.alouani@g2elab.grenoble-inp.fr.

**RESUME** - L'accroissement de l'intégration des énergies renouvelables et des charges électriques en courant continu dans le réseau électrique impose une évolution de son architecture, notamment au niveau des réseaux moyenne tension en courant continu. Des convertisseurs d'électronique de puissance devront être insérés dans ceux-ci permettant de tenir les tensions, équilibrer les contraintes et assurer des services systèmes (par exemple inertie virtuelle, creux de tension, grid forming,...). De part, les contraintes techniques et de disponibilité, leur architecture sera modulaire avec des briques de base isolées. Cet article présente un convertisseur DC/DC basé sur une cascade de structures de type Triple Active-Bridge (TAB) avec une association en série en entrée et en série en sortie (ISOS) intégrant des systèmes de stockage d'énergie pour une interconnexion de deux réseaux MVDC. Les limites de fonctionnement des topologies sont également identifiées. Des stratégies de pilotage et de contrôle sont proposées pour assurer les transferts de puissance et les équilibrages de contraintes.

**Mots-clés**—MVDC, services systèmes, DC-DC, stockage, ISOS.

## NOMENCLATURE

DAB : Dual Active-Bridge.  
 TAB : Triple Active-Bridge.  
 QAB : Quadruple Active-Bridge.  
 MMC : Modular Multilevel Converter.  
 ISOS : Input Series Output Series.  
 MVDC : Medium Voltage Direct Current.  
 FB : Full Bridge.  
 F2F : Front to Front.

## 1. INTRODUCTION

Le réseau électrique actuel fait face à deux défis principaux : d'une part, l'augmentation des sources de production renouvelables intermittentes (éolien, photovoltaïque) dont les niveaux de puissance vont entraîner leur connexion à partir des réseaux HTA et d'autre part, l'augmentation de la consommation électrique avec de nouvelles charges (véhicules électriques, pompes à chaleur) nécessitant une gestion active du réseau avec des systèmes de conversion d'énergie intégrant contrôle et gestion de puissance pour garantir : services systèmes, stabilité, fiabilité et résilience des réseaux.. La nature et les niveaux de puissance de ces nouvelles sources entraîne également des investigations sur la possibilité de développer des réseaux moyenne tension en courant continu (MVDC) et donc sur les structures adaptées.

Le papier est structuré comme suit : la section 2 propose une analyse bibliographique approfondie des structures utilisables en

moyenne tension, suivie dans la section 3 d'une étude de diverses associations de convertisseurs DAB avec différents scénarios réalisés en simulations.

## 2. PRESENTATION DE LA STRUCTURE

### 2.1. Contexte d'implémentation

L'objectif principal est de concevoir un convertisseur d'interfaçage entre deux réseaux MVDC. Ce système aura pour but d'assurer l'interfaçage entre les réseaux, de limiter la propagation des perturbations et d'assurer des services systèmes (inertie virtuelle, creux de tension, grid forming). Il est nécessaire d'adopter une approche modulaire dans les convertisseurs en raison de l'absence d'interrupteurs hautes tensions capables de gérer directement les tensions et courants élevés. Les modules associés en série permettront d'assurer la distribution des contraintes en tension entre modules, et devra être résiliente aux défauts (internes ou externes). Le rôle fondamental de ce convertisseur est d'assurer le transfert d'énergie tout en garantissant un découplage efficace entre l'entrée et la sortie. Ce dernier est crucial car il permet d'isoler les perturbations qui peuvent survenir d'un côté ou de l'autre du système et empêchera sa transmission.

Afin d'assurer ces services, il sera nécessaire de disposer d'énergie stockée dans le convertisseur qu'on pourrait intégrer directement dans la structure modulaire et dont il faudra assurer la gestion. L'objectif n'est pas d'implémenter un stockage énergétique massif, mais juste l'énergie suffisante pour les fonctionnements transitoires. Dans un contexte d'intégration au réseau, notre choix se porte sur un convertisseur isolé galvaniquement, principalement pour des raisons de sécurité électrique, de protection du système et de faciliter les associations de modules et la répartition des contraintes en tension.

Il est donc crucial de développer des systèmes de contrôle adaptés aux structures retenues et permettant d'assurer les transits énergétiques souhaités.

### 2.2. La topologie proposée

Les convertisseurs DC-DC en MV devront offrir un rendement élevé pour des puissances atteignant plusieurs dizaines de mégawatts et gérer des tensions dépassant les capacités actuelles des interrupteurs électroniques. Cela exigera l'utilisation d'association de cellules de commutation.

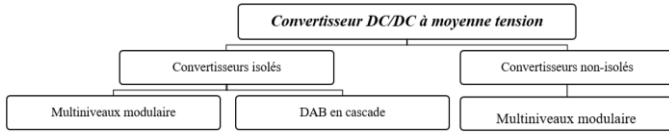


Fig. 1. Classification des convertisseurs DC-DC à moyenne tension.

Les principales caractéristiques des convertisseurs DC-DC dédiés aux réseaux MVDC sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Les caractéristiques des convertisseurs DC-DC en MVDC[1].

| Caractéristiques          | MMC Isolé F2F     | MMC Non Isolé      | DAB ISOS           |
|---------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Isolation galvanique      | Présente.         | Absente.           | Présente.          |
| Contrôle bidirectionnel   | Présent.          | Présent.           | Présent.           |
| Rendement énergétique     | Modéré.           | Élevé.             | Élevé.             |
| Modularité et flexibilité | Modéré.           | Bonne flexibilité. | Bonne flexibilité. |
| Taux de puissance         | moyenne - élevée. | moyenne - élevée   | moyenne - élevée.  |

Globalement, parmi les structures isolées à entrée moyenne tension DC, les deux solutions principales sont les MMC F2F [2] (Front to front) et les associations de DAB dans une configuration SST[3].

Dans notre cas, pour un système nécessitant une conversion bidirectionnelle, nous sommes partis sur le DAB en ISOS qui offre une flexibilité accrue et une isolation galvanique. Il faudra toutefois veiller au niveau du contrôle d'assurer les équilibrages des tensions à la fois en entrée et en sortie tout en garantissant les flux des puissances avec potentiellement une adaptation de la structure de base pour augmenter la flexibilité.

### 2.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une association de plusieurs convertisseurs Dual Active Bridge (DAB) en cascade avec configuration Input-Series-Output-Series (ISOS) repose sur une topologie particulière permettant d'améliorer les capacités de conversion d'énergie. Dans cette configuration ISOS : les entrées et les sorties de tous les convertisseurs DAB sont connectées en série, ce qui permet de diviser la tension d'entrée totale entre les différents modules, les sorties des convertisseurs sont également connectées en série, permettant d'additionner les tensions de sortie de chaque module, et ainsi de gérer des niveaux de tensions supérieurs à ceux admissibles par un seul module.

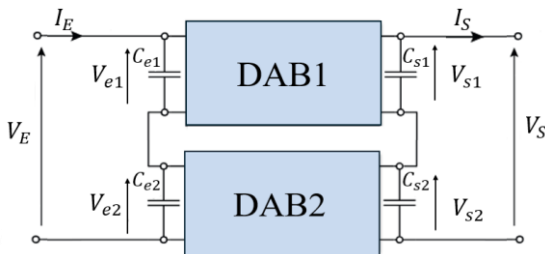


Fig. 2. Convertisseur multi-DAB en cascade avec une configuration en ISOS.

Cette topologie permet aussi une modularité qui donne une résilience en pouvant potentiellement se reconfigurer pour accepter la perte d'un module. Le bloc de base de la structure est basé sur le principe du DAB classique, où chaque module :

- possède deux ponts actifs (FB) séparés par un transformateur qui assure une isolation galvanique ;
- utilise principalement un déphasage entre les signaux de commande des deux ponts pour contrôler le transfert de puissance ;

- permet un flux de puissance bidirectionnel.

La puissance pour un DAB est échangée en fonction de l'angle de déphasage  $\varphi$  entre les tensions générées sur chaque port et peut être calculé à l'aide de l'équation suivante [4].

$$P = \frac{nV_e V_s}{2\pi f_{dec} L} \varphi \left(1 - \frac{\varphi}{\pi}\right)$$

Où  $f_{dec}$  représente la fréquence de découpage, et  $V_e$  et  $V_s$  les tensions d'entrée et de sortie du DAB.

La puissance transitée dans une structure DAB dépend à la fois de l'inductance interne, du déphasage entre les ponts d'entrée et de sortie et de l'inductance série du lien intermédiaire.

Contrairement aux structures en association parallèle qui garantissent l'équilibrage naturel des tensions, les configurations en série, le partage de la tension et du courant doit être activement contrôlé. Cette association est bien connue pour présenter des difficultés pour maintenir l'équilibre des tensions des cellules associées en série et entraîne une répartition inégale de la tension des condensateurs dans l'alimentation électrique d'entrée ou de sortie. Ces déséquilibres sont généralement dus à des dispersions sur les éléments des convertisseurs (passifs, transistors et driver des interrupteurs) et peuvent engendrer des déséquilibres de puissance entre les deux blocs associés.

Il est donc nécessaire de développer une stratégie de contrôle spécifique afin de garantir un fonctionnement stable et un équilibre de puissance entre les différents modules. En plus du transfert de puissance entre l'entrée et la sortie de l'association, des mécanismes de contrôle supplémentaires sont nécessaires pour équilibrer :

- les flux de puissances ;
- les tensions d'entrée entre les différents modules ;
- les tensions de sortie entre les différents modules.

### 3. SIMULATION

Nous allons maintenant analyser sur la base de simulations PSIM et Simulink l'association série des structures DAB et de leurs variantes en termes de commande des commutateurs, de pilotage des grandeurs et d'équilibrage des contraintes.

#### 3.1. Multi-DAB en cascade avec une configuration en ISOS

Comme dit précédemment, il est nécessaire d'équilibrer les flux de puissance entre les ensembles associés, mais aussi la répartition des tensions, aussi bien en entrée, qu'en sortie. Cela est fait en pilotant individuellement les déphasages entre les ponts d'entrée et de sortie de chacun des DAB.

En se basant sur [5], on peut mettre en place trois boucles pour le contrôle de la configuration série-série :

- sur la tension d'entrée pour équilibrer la tension  $V_{e1}$  ;
- sur la tension d'entrée pour équilibrer la tension  $V_{e2}$  ;
- sur le courant d'entrée pour réaliser le contrôle de la puissance.

Les signaux de référence générés par ces boucles sont ajoutés afin d'obtenir les deux angles  $\varphi_1, \varphi_2$  des deux DAB.

Dans cette configuration, seules deux puissances sont contrôlables, alors qu'il y a trois grandeurs indépendantes à contrôler ( $V_{e1}, V_{e2}, I_e$ ). De ce fait, la commande proposée réduit les écarts globaux en empêchant la dérive des tensions d'entrée ou de sortie, mais elle ne peut pas les éliminer complètement. En tentant de compenser l'écart d'un côté, on déséquilibre inévitablement l'autre. Les courbes de tension d'entrée et de

sortie sont présentées dans les figures n°3.a et n°3.b où on peut relever que  $V_{e1} > V_{e2}$  et  $V_{s1} > V_{s2}$ . Afin d'équilibrer les tensions d'entrée il est nécessaire de transférer plus de puissance sur le bras du DAB1 tout en transférant moins de puissance sur le bras du DAB2, afin de diminuer la puissance  $P_{e1}$  et augmenter la puissance  $P_{e2}$ . Cela entraîne un surplus de puissance arrivant sur le condensateur de sortie du DAB1, qui se charge davantage, tandis que le condensateur de sortie du DAB2 se décharge, ce qui augmente la puissance  $P_{s1}$  et diminue la puissance  $P_{s2}$ , par conséquent, nous obtenons  $V_{e1} = V_{e2}$  et  $V_{s1} \gg V_{s2}$ , compensant ainsi un déséquilibre en entrée par un autre en sortie.

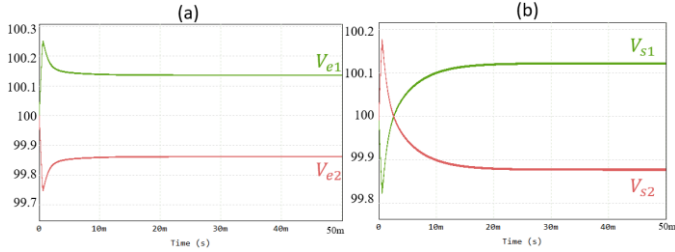


Fig.3 . (a) Les tensions d'entrée  $V_{e1}$ ,  $V_{e2}$ . (b) Les tensions de sortie  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ .

De fait, la configuration à deux DAB est incapable d'atteindre l'équilibre. Il est nécessaire d'ajouter un lien supplémentaire entre les deux DABs. Le fait de pouvoir coupler les convertisseurs et leurs flux de puissance pour les répartir différemment entre les entrées et les sorties donne une voie de contrôle supplémentaire. Ainsi, cette topologie évolue d'une structure DAB de base, vers une structure multi-active bridge, ce qui nous mènera vers des architectures TAB ou QAB en configurations ISOS. L'ajout d'une liaison intermédiaire permettra également de donner un emplacement pour intégrer des batteries au centre de cette connexion et rendre le pack batterie modulaire également.

### 3.2. Multi-TAB en cascade avec une configuration en ISOS avec stockage sur noeud intermédiaire

#### 3.2.1. Triple active bridge

Le TAB représente une extension naturelle qui augmente considérablement les possibilités de gestion énergétique et d'aiguillage de puissance. Il conserve l'avantage principal de l'isolation galvanique, tout en étendant la topologie à trois ports interconnectés à travers un transformateur à trois enroulements. Cette configuration permet des transferts de puissance simultanés entre différentes sources et charges. La flexibilité du contrôle constitue l'un des atouts majeurs du TAB où le transfert d'énergie peut être finement régulé grâce à l'ajustement de trois rapports cycliques et deux déphasages générés[6].

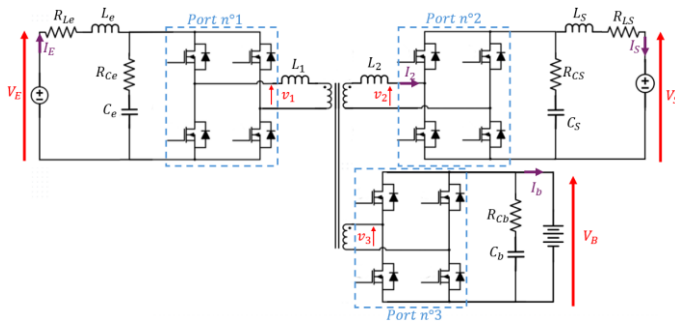


Fig.4 .Structure d'un convertisseur Triple Active Bridge.

Les puissances  $P_e$ ,  $P_s$  et  $P_b$  sont contrôlées à l'aide de deux paramètres de contrôle qui sont les courants  $I_e$  et  $I_s$ . Le fait que l'on dispose de 5 grandeurs de contrôle, fait que plusieurs

ensembles de paramètres de contrôle conduisent exactement à la même distribution de puissance afin d'atteindre  $P_e = P_s + P_b$  pour la configuration choisie dans ce cas. Pour simplifier le problème, nous ne considérerons que les 2 déphasages entre les ponts 1 et 3 d'une part et 2 et 3 d'autre part.

#### 3.2.2. Deux TAB en cascade avec une configuration en ISOS

La structure du convertisseur proposée est illustrée à la figure n°5. Elle comprend deux modules TAB dont les ports d'entrée et de sortie sont connectés en série afin d'atteindre des niveaux de tension plus élevés identiques. Tandis que sur le nœud intermédiaire est connecté une batterie. Tout comme pour la mise en série de DAB, la connexion en série de plusieurs cellules TAB peut conduire à une distribution inégale de la tension des bus d'entrée et sortie entre les ports d'entrée et sortie des différentes cellules.

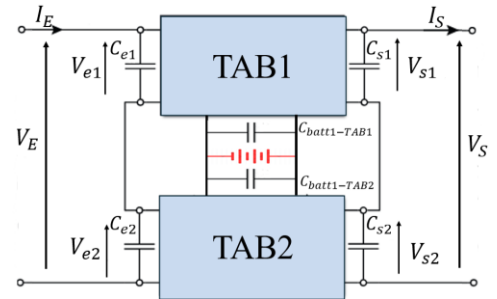


Fig. 5. Convertisseur multi-TAB en cascade avec une configuration en ISOS.

Tout comme dans le cas du DAB, cette inégalité entre les tensions des ports  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  et entre les tensions d'entrée  $V_{e1}$  et  $V_{e2}$  peuvent être due à la présence d'une charge différente dans le convertisseur. Cette dernière entraîne une distribution asymétrique de tension. Une des raisons peut être les tolérances sur les composants ou des effets de vieillissement, dans un système réel. Les valeurs des capacités et d'inductances internes des cellules peuvent donc évoluer et être différentes d'une cellule à l'autre. Ce qui peut mener à une distribution asymétrique de tension. Dans notre cas, afin de se mettre dans un cas réel un déséquilibre interne sous la forme d'écarts entre les inductances des TAB de 5% a été ajouté.

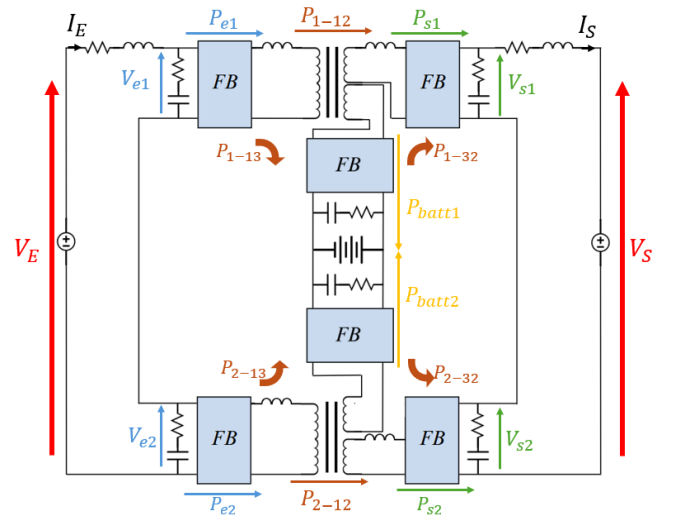


Fig. 6. Schéma des flux de puissance du convertisseur multi-TAB en ISOS.

Toutefois, grâce à l'existence du nœud intermédiaire, une possibilité de routage d'énergie supplémentaire est fournie. En outre, ce lien comportera également un dispositif de stockage. Par conséquent, dans la section suivante, une nouvelle méthode

de contrôle pour garantir une distribution égale de la puissance dans les cellules du convertisseur est présentée.

Quatre ordres de commande (2 par TAB) pour piloter les puissances à partir des déphasages entre les bras sont élaborés. Cela permettra de contrôler les transferts des flux de puissance, le stockage/déstockage de la batterie et les équilibrages d'entrée et de sortie. La puissance en entrée et en sortie de chaque TAB est pilotée, l'écart étant envoyé sur le nœud intermédiaire. La stratégie de contrôle de chaque TAB consiste à décaler les tensions générées aux côté primaire, secondaire et tertiaire du transformateur haute fréquence (HF) d'un angle  $\varphi_{13-1}$  et  $\varphi_{13-2}$  entre le primaire et le tertiaire et  $\varphi_{32-1}$  et  $\varphi_{32-2}$  entre le tertiaire et le secondaire pour les deux TAB. Ces déphasages permettent de piloter les flux de puissance  $P_{13-1}$  et  $P_{32-1}$  du premier TAB et  $P_{13-2}$  et  $P_{32-2}$  pour l'autre TAB.

Une analyse de l'action des flux de puissance montre que :

- une augmentation simultanée de l'entrée ( $P_e = P_{13-1} + P_{13-2}$ ) et de la sortie ( $P_s = P_{32-1} + P_{32-2}$ ) augmentera le flux de puissance ;
- un écart entre l'entrée et la sortie provoquera un stockage/déstockage ( $P_e - P_s$ ) ;
- un écart entre les puissances d'entrée des deux TAB ( $P_{13-1} - P_{13-2}$ ), respectivement les puissances de sortie ( $P_{32-1} - P_{32-2}$ ) agiront sur l'équilibrage des tensions en entrée ou en sortie.

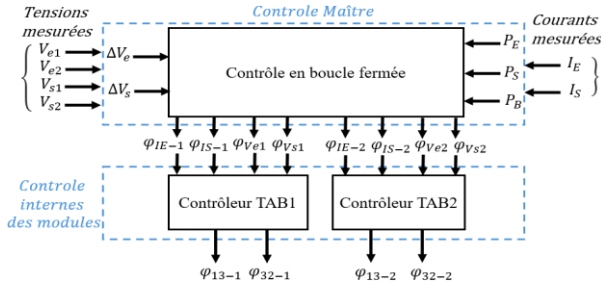


Fig. 7. schéma de contrôle complet du convertisseur.

La commande proposée se construit autour de trois boucles indépendantes :

- la première phase consiste à effectuer le contrôle des puissances globales de la structure (transfert et stockage) ;
- la deuxième procède au contrôle de la tension d'entrée de chaque cellule individuelle ;
- la troisième se concentre sur l'équilibrage des tensions de sortie.

Ces boucles permettront de générer les références individuelles de chacun des TAB.

### 3.2.2.1 Contrôle du flux de puissance

Chaque TAB sera équipé de deux boucles pour assurer le contrôle du courant d'entrée et de sortie afin de garantir le bon transfert de puissance et éviter les oscillations et les instabilités qui pourraient survenir en raison des variations de charge ou des perturbations dans le système.

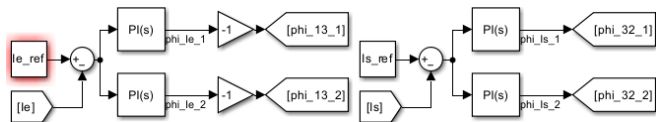


Fig. 8. Schéma de commande des commutateurs.

$$\varphi_{13-1} = -\varphi_{1e1} \quad \varphi_{13-2} = -\varphi_{1e2}$$

$$\varphi_{32-1} = \varphi_{1s1} \quad \varphi_{32-2} = \varphi_{1s2}$$

Pour concevoir les correcteurs appropriés du système de commande, nous commençons par établir le modèle moyen général de la structure. Ensuite, nous déterminons quatre fonctions de transfert essentielles :  $\frac{I_e}{\varphi_{13-1}}$ ,  $\frac{I_e}{\varphi_{13-2}}$ ,  $\frac{I_s}{\varphi_{32-1}}$  et  $\frac{I_s}{\varphi_{32-2}}$

Il est à noter que dans la configuration matérielle choisie ici, il n'y a pas d'inductance sur le transformateur du nœud intermédiaire (à part une éventuelle inductance de fuite), ce qui assure un découplage des deux contrôles de DAB et donc une simplification du problème.

Nous avons défini des objectifs de performance précis pour guider nos simulations. Notre approche vise à atteindre un temps de réponse de 3 ms sans aucun dépassement (0%). L'absence totale de dépassement constitue un paramètre essentiel pour éviter les oscillations indésirables, tandis que le temps de réponse ciblé permet d'obtenir une dynamique suffisamment rapide pour les applications envisagées.

A partir de ces fonctions, nous développons des correcteurs spécifiques qui permettent d'obtenir les déphasages nécessaires  $\varphi_{13-1}$  et  $\varphi_{13-2}$ ,  $\varphi_{32-1}$  et  $\varphi_{32-2}$ . Ces correcteurs sont calculés avec précision pour garantir les performances dynamiques souhaitées, notamment en termes de stabilité et de rapidité. La principale contrainte sera d'assurer une dynamique suffisante au niveau du contrôle interne afin de réaliser les dynamiques de puissance et les services systèmes demandés par l'étage supérieur de contrôle.

Le gain négatif sur le courant d'entrée est lié à la topologie spécifique du TAB et au choix du contrôle des flux de puissance. Comme vu précédemment, si on veut augmenter ou diminuer le transit de puissance entre l'entrée et la sortie on est dans l'obligation de symétriser les deux angles de déphasages  $\varphi_{13}$  et  $\varphi_{32}$ , si on augmente l'un, l'autre diminue tout en gardant le même écart entre les deux, donc ils seront en opposition de signe.

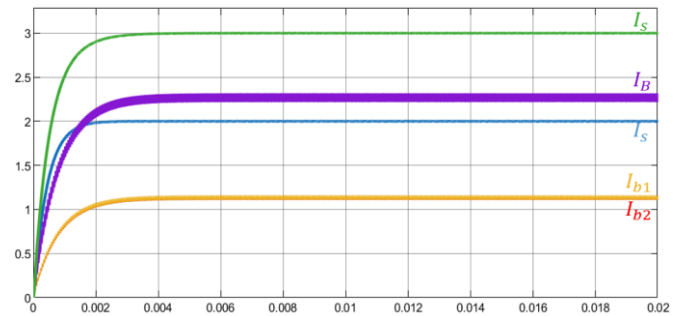


Fig.9 . Les courants d'entrée, de sortie et de la batterie  $I_e$ ,  $I_s$ ,  $I_{batt1}$  et  $I_{batt2}$ .

La charge/décharge de la batterie est réalisée en dissymétrisant les courant d'entrée et de sortie des ponts. De par son fonctionnement, la structure TAB compense la quantité d'énergie nécessaire due et chargera ou déchargera la batterie selon les besoins.

L'architecture simulée a été présentée sur la figure 6. Afin de créer une dissymétrie entre les TAB connectés ensemble, les paramètres des inductances ont été variés de 5%, ce qui va impacter les flux de puissance pour un déphasage donné.

On fixe les consignes des deux courants afin d'introduire un déséquilibre de 1A comme le montre la figure n°9 entre les courants  $I_e$  et  $I_s$  sous une tension de 200V en entrée et en sortie,

ce qui entraînera un excédent de puissance de 200W simulant une décharge de la batterie qui apparaît sur la figure n°10. Cette puissance est injectée par la batterie et répartie sur les deux ponts reliés à la batterie (1A des deux côtés de la batterie sous une tension de 100V soit 200W).

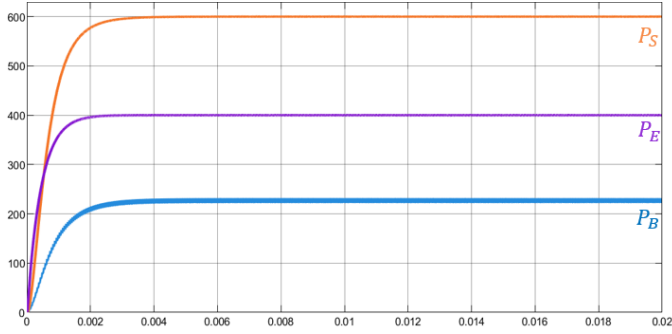


Fig.10 . Les puissances d'entrée, de sortie et de la batterie  $P_e$ ,  $P_s$  et  $P_b$ .

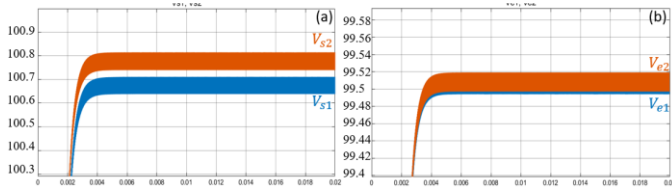


Fig.11.(a) Les tensions de sortie  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$ .(b) Les tensions d'entrée  $V_{e1}$  et  $V_{e2}$ .

On constate bien que les valeurs finales des courants sont atteintes, que la batterie est en mode décharge. Par contre, on a des déviations de tensions d'entrée et de sortie. Les ports connectés en série peuvent conduire à des distributions de tension déséquilibrées entre les cellules. Même si le fonctionnement se stabilise, il est nécessaire de contrôler ces niveaux de tension.

### 3.2.2.2 Contrôle des tensions d'entrée

Dans cette partie, une stratégie de contrôle de l'équilibrage des tensions est proposée. La figure n°11.b illustre un déséquilibre de tension entre le TAB1 et le TAB2 où  $V_{e2} > V_{e1}$  donc un déséquilibre entre les deux puissances  $P_{e2} > P_{e1}$  est présent. Pour rééquilibrer les puissances il suffit d'augmenter la puissance transmise  $\uparrow P_{13-TAB2}$  et diminuer  $\downarrow P_{13-TAB1}$ . Les relations suivantes sont établies :

$$\begin{aligned}\varphi_{13-1} &= -\varphi_{Ie1} + \varphi_{Ve1} & \varphi_{13-2} &= -\varphi_{Ie2} + \varphi_{Ve2} \\ \varphi_{32-1} &= \varphi_{Is1} & \varphi_{32-2} &= \varphi_{Is2}\end{aligned}$$

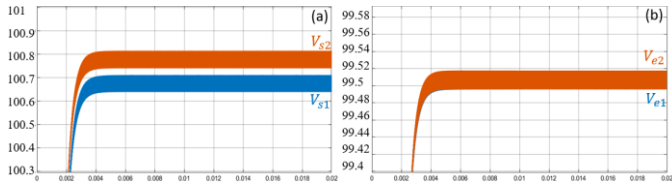


Fig.12. (a) Les tension de sortie  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$ . (b) Les tensions d'entrée  $V_{e1}$  et  $V_{e2}$ .

Les tensions d'entrée atteignent la valeur finale qui représente  $\frac{V_E - V_{Ie}}{2}$ . Toutefois, des déviations des tensions de sortie sont toujours observées.

### 3.2.2.3 Contrôle des tensions de sortie :

On reprend le contrôle des tensions d'entrée tel qu'il existe mais on ajoute le contrôle des tensions de sortie. D'après les figures n°12.a et n°11.a, nous observons un déséquilibre des tensions de sorties entre le TAB1 et le TAB2 où  $V_{s2} > V_{s1}$  donc on aura un déséquilibre entre les deux

puissances  $P_{s2} > P_{s1}$ . Pour rééquilibrer les puissances on augmente la puissance transmise  $\uparrow P_{32-TAB1}$  et on diminue  $\downarrow P_{32-TAB2}$ .

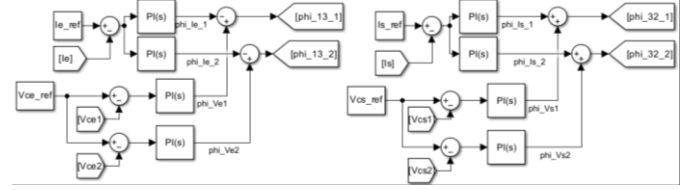


Fig.13 . Schéma de commande des commutateurs.

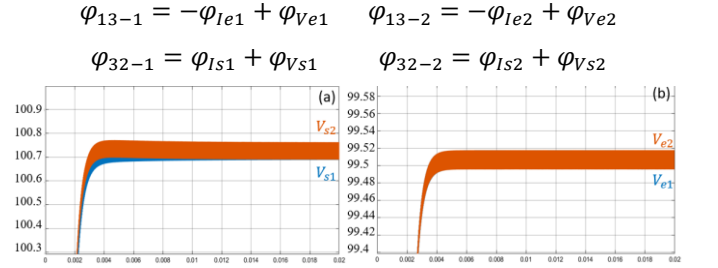


Fig.14.(a) Les tensions de sortie  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$ .(b) Les tensions d'entrée  $V_{e1}$  et  $V_{e2}$ .

Les tensions de sortie atteignent leur valeur finale qui représente  $\frac{V_S + V_{Is}}{2}$ . Par conséquent, les déviations des tensions entre entrée

et sortie sont contrôlées.

## 4. CONCLUSIONS

Dans le contexte de la transition énergétique, l'importance des services apportés par les convertisseurs pour les réseaux MVDC s'amplifie. La question de l'adaptation des briques de base des structures modulaires, comme le passage d'une architecture DAB au TAB, s'est révélée particulièrement pertinente dans ce contexte. Grâce à l'analyse de l'association des blocs de TAB et à l'implémentation de lois de commande appropriées, l'optimisation de l'équilibre entre les transferts de puissance, les tensions d'entrée, les tensions de sortie et la gestion du stockage de la batterie sont efficaces. Toutefois, si cette structure à couplage électrique permet d'ajouter un chemin de transfert d'énergie permettant d'assurer un contrôle des tensions d'entrée et sortie, elle ne permet d'associer que deux étages.

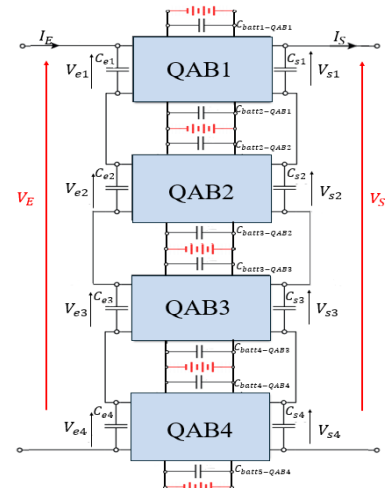


Fig.15. Convertisseur multi-QAB en cascade avec une configuration en ISOS.

Les prochaines étapes vont se focaliser sur les structures proposées (les blocs TAB et QAB en configuration ISOS comme l'illustre la figure n°15) en termes de modularité,



d'efficacité énergétique, de performance et de résilience aux défauts pour un nombre d'étage plus important. Le développement d'une stratégie de contrôle associée aux lois de commande pour améliorer la dynamique et le contrôle statique du convertisseur pour qu'il soit compatible avec les services réseaux qui pourront être demandés. De même, l'analyse sur la propagation des défauts, son impact sur les niveaux de tensions, sa capacité de transfert de puissance et les scénarios alternatifs en cas de perte de batterie ou de module constituent des perspectives de travail. Par la suite, l'identification de solutions optimales pour la reconfiguration de la topologie et la gestion des défauts sera abordée.

## 5. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence 22-PETA-0003.

## 6. REFERENCES

- [1] I. Alhurayyis, A. Elkhateb, et J. Morrow, « Isolated and Nonisolated DC-to-DC Converters for Medium-Voltage DC Networks: A Review », *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 9, n° 6, p. 7486-7500, déc. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3028057.
- [2] S. Kenzelmann, A. Rufer, D. Dujic, F. Canales, et Y. R. de Novaes, « Isolated DC/DC Structure Based on Modular Multilevel Converter », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, n° 1, p. 89-98, janv. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2305976.
- [3] C. Sun, X. Zhang, J. Zhang, M. Zhu, et J. Huang, « Hybrid Input-Series–Output-Series Modular DC–DC Converter Constituted by Resonant and Nonresonant Dual Active Bridge Modules », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, n° 1, p. 1062-1069, janv. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3055175.
- [4] « Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC–DC Converter Topologies ». Consulté le: 19 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/152569/eth-2537-02.pdf>
- [5] K. Oi, H. Higa, K. Morita, S. Urushibata, Y. Tadano, et Y. Sato, « Voltage Balancing Control of Bidirectional Input-Series Output-Series Dual Active Bridge DC/DC Converters without Auxiliary Circuits », in *2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia)*, mai 2022, p. 899-905. doi: 10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9807147.
- [6] S. Okutani, P.-Y. Huang, et Y. Kado, « Generalized Average Model of Triple Active Bridge Converter », in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, sept. 2019, p. 5554-5560. doi: 10.1109/ECCE.2019.8912937.