

Modèle réduit du convertisseur DC/DC modulaire multiniveau (M2DC) pour les études de stabilité des réseaux HVDC.

Ghazala SHAFIQUE¹, Johan BOUKHENFOUF¹, François GRUSON¹, Shabab SAMIMI²,
Philippe DELARUE¹, Philippe LE MOIGNE¹, Frederic COLAS¹, Michael Merlin³, Xavier GUILLAUD¹

¹ Univ. Lille, Arts et Métiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 - L2EP -

Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance, F-59000 Lille, France

² ESME, ESME Research Lab, Campus de Lille, France

³ Institute for Energy Systems, School of Engineering, University of Edinburgh

RESUME – Afin de réaliser des études de stabilité des réseaux MTDC, le développement de modèles d'ordre réduit des convertisseurs s'avère nécessaire. Cet article présente un modèle réduit du convertisseur DC/DC modulaire multiniveaux (M2DC) : une topologie de convertisseur DC-DC non isolée attrayante pour le réseau HVDC. Cet article présente d'abord le convertisseur M2DC. Dans un second temps, le modèle réduit sera développé. Le développement de la commande de ce modèle sera effectué dans la troisième partie. Enfin, la comparaison du modèle réduit et de son contrôle avec le modèle moyen des bras sera effectuée dans la dernière section de l'article.

Mots-clés – M2DC, Convertisseur modulaire multiniveaux, convertisseur DC-DC, Multi-terminal HVDC, réduction de modèle.

PARAMÈTRES

Les demi-bras supérieur et inférieur sont précisés par les indices "u" et "l" pour upper et lower.

P^*	Reference de puissance du côté basse tension
$C_{SMu}; C_{SML}$	Capacité des sous-modules
$C_{totu}; C_{totl}$	Capacité équivalente des demi-bras
i_s	Courant du côté basse tension
i_{diff}	Courant Différentiel
v_{diff}, v_s	Tensions modulées et découplées
$v_{Ctotu}; v_{Ctotl}$	Tension de la capacité équivalente du demi-bras
N_u, N_l	Nombre de sous-module dans le demi-bras
n_u, n_l	Number sous-module actif dans le demi-bras
$v_{mu}; v_{ml}$	Tension modulée du demi-bras.
φ	Angle entre les composantes AC de v_{ml} et $-v_{mu}$
T, ω	Période and pulsation des variables AC
θ	Angle entre i_{sAC} et i_{diffAC}
θ_v	Angle entre v_{sAC} and v_{diffAC}
r, l	Resistance and inductance des demi-bras
r_s, l_s	Resistance and inductance de sortie
W_c^{\sum}	Energie stockée dans le bras
W_c^{Δ}	Difference entre les énergies stockées dans les demi-bras du haut et du bas.

1. INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses liaisons HVDC ont été mises en service et bien d'autres le seront dans un proche avenir. Les réseaux DC multiterminaux (MTDC) ont été proposés pour interconnecter ces liaisons point à point afin d'augmenter leur flexibilité et leur robustesse. Cependant, les interconnexions des systèmes HVDC existants nécessiteront des convertisseurs DC-DC bidirectionnels, car les niveaux de tension et les systèmes de mise à la terre peuvent varier d'un projet à l'autre. Cependant, les niveaux de tension en HVDC

interdisent l'utilisation des topologies classiques. Comme présenté dans [1] à [5], les principales topologies pour les convertisseurs DC-DC dans le domaine de la haute tension sont basées sur l'architecture du convertisseur Modulaire et Multiniveaux connu sous l'abréviation MMC, grâce à sa propriété modulaire, son haut rendement et sa maturité technologique. Parmi ces différentes propositions, le MMC Dual Active Bridge (MMC DAB) [5][7] ainsi que le convertisseur DC-DC Modulaire Multiniveaux (M2DC) [5][6] sont séduisantes. Composé de deux convertisseurs MMC connectés via leurs côtés AC par un transformateur moyenne fréquence[7], Le premier est un convertisseur DC/DC isolé. Le second, le convertisseur M2DC, est un convertisseur DC-DC non isolé dont le schéma est présenté en Fig. 1 [6].

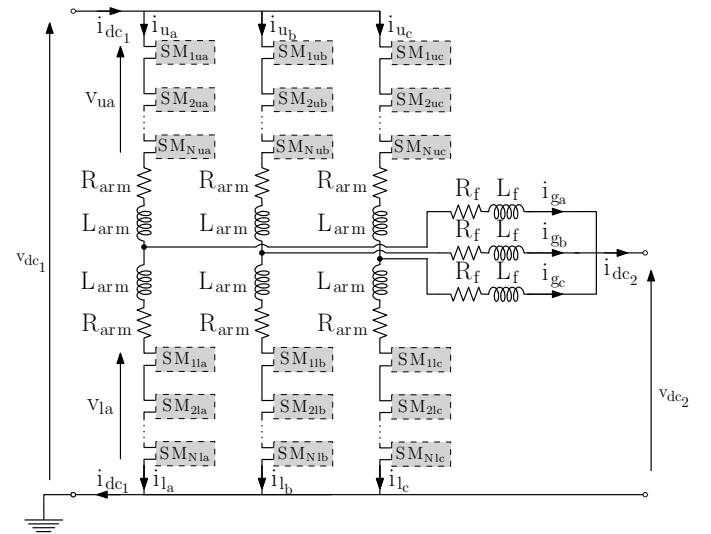


FIG. 1. Schéma du convertisseur DC/DC modulaire multiniveau (M2DC)

Pour le bon développement des réseaux DC, leur stabilité doit être assurée et donc étudiée. Pour cela, l'utilisation de modèles réduits de convertisseurs est nécessaire. En effet, cela induit une analyse plus simple et une meilleure compréhension des interactions physiques avec les éléments du réseau. Ainsi, ces dernières années, des modèles réduits de type phaseur ont été réalisées pour les convertisseurs MMC [11]. Cependant, l'étude de ces réseaux MTDC reste un challenge si ces derniers intègrent un convertisseur DC/DC. En effet aucun modèle réduit de convertisseur DC/DC pour HVDC n'est disponible sauf si la topologie DC/DC est basée sur la topologie MMC en version AC/DC comme le MMC DAB[2]. Cet article propose donc un modèle réduit du convertisseur M2DC pour l'analyse de stabilité des ré-

seaux DC.

La première partie présente les principes du M2DC. Dans La deuxième partie, le modun modèle d'ordre réduit (ROM pour Reduce Order Model) est établi. Cette partie est divisée en trois sections ; les deux premières développent le modèle ROM connecté pour chaque côté DC et la troisième relie les deux côtés à l'énergie globale stockée dans le M2DC. Le développement de la commande permettant de contrôler le modèle réduit proposé est expliqué dans la partie suivante. Finalement, la validation du modèle et du contrôle est effectuée dans la dernière partie.

2. MODÈLE MOYEN DES BRAS ET ANALYSE STATIQUE DU M2DC

Le convertisseur DC/DC modulaire multiniveaux (M2DC), décrit à la fig. 1, est composé d'au moins deux branches entrelacées, interconnectées entre deux terminaux. Chaque bras se compose de deux demi-bras constitués de sous-modules (SM) connectés en série. La topologie de ces SM peut être soit de type demi-pont soit de type pont complet. Le choix dépend du besoin de capacité de blocage de défaut DC car cela peut nécessiter une la génération de tensions négatives. Par conséquent, le nombre de SM mais aussi sa technologie peuvent être différents pour le bras supérieur vis à vis du bras inférieur.

Le M2DC est une topologie non-isolée attrayante car elle hérite de certains avantages du MMC, à savoir une faible fréquence de commutation des semi-conducteurs individuels et un faible contenu harmonique dans la forme d'onde du courant. De plus, le M2DC nécessite moins de sous-modules (SM) par rapport à la topologie «Dual Active Bridge MMC» puisque les piles de sous-modules ne traitent qu'une partie de la puissance totale du convertisseur. Cela limite donc son coût global et ses pertes (lorsqu'un algorithme de contrôle d'équilibrage similaire et donc une fréquence de commutation similaire sont utilisés).

L'analyse de la topologie et la conception de la commande sont réalisées sur un seul bras pour simplifier la présentation et seront généralisées par la suite. En raison du grand nombre de SM dans le M2DC, un modèle moyen équivalent du bras du M2DC, fig. 2, est utilisé pour l'analyse dynamique et en régime quasi-statique. Ce modèle moyen équivalent du bras du M2DC est agnostique au type de SM utilisé (par exemple demi-ponts ou ponts complets) et considère que l'algorithme de contrôle d'équilibrage de la tension de chaque sous-module fonctionne correctement.

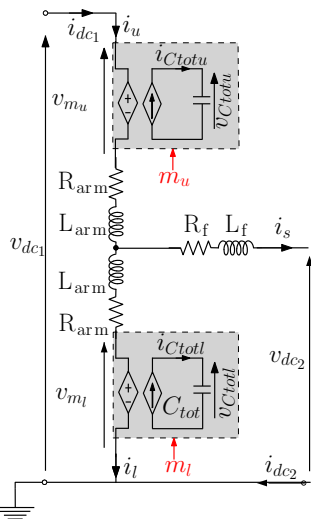


FIG. 2. Modèle moyen équivalent du bras du M2DC.

Pour chaque demi-bras, il est possible de définir une tension modulée v_{mj} et un courant modulé i_{Ctotj} où j représente le bras supérieur (u) ou inférieur (l). v_{Ctotj} est défini comme la somme de toutes les tensions de condensateur des SM dans le bras j . (1)

et (2) sont identiques à un hacheur idéal connecté à un condensateur équivalent et ce modèle peut donc remplacer tous les SM du demi-bras. Ce modèle moyen équivalent d'une branche M2DC est présenté dans l'encadré gris de la fig. 2.

$$\begin{cases} v_{mj} = m_j \cdot v_{Ctotj} & \text{with } m_j = \frac{n_j}{N_j} \\ i_{Ctotj} = m_j \cdot i_j \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{tot} \frac{dv_{Ctotj}}{dt} = m_j \cdot i_j \quad \text{with } C_{tot} = \frac{C_j}{N_j}. \quad (2)$$

Considérons v_{mjDC} , la composante continue de la tension modulée et i_{jDC} , la composante continue du courant dans le demi-bras. Si les résistances et les pertes des sous-modules sont négligées, v_{muDC} , v_{mlDC} , i_{uDC} , i_{lDC} peuvent être exprimés comme dans (3).

$$\begin{aligned} v_{muDC} &= v_{dc1} - v_{dc2} & i_{uDC} &= i_{dc1} \\ v_{mlDC} &= v_{dc2} & i_{lDC} &= i_{uDC} - i_{sDC} \end{aligned} \quad (3)$$

Soit P , la puissance transitant d'un côté à l'autre par le bras, alors les puissances DC des bras supérieur et inférieur peuvent être exprimées par (4).

$$\begin{aligned} P_{uDC} &= v_{muDC} \cdot i_{uDC} = (1 - \alpha) \cdot P \\ P_{lDC} &= v_{mlDC} \cdot i_{lDC} = (\alpha - 1) \cdot P \end{aligned} \quad \text{où } \alpha = \frac{v_{dc2}}{v_{dc1}} \quad (4)$$

Comme le montre l'équation ci-dessus, la puissance DC circulant dans les bras est de signe opposé mais, plus important encore, elle est non nulle. Ainsi, l'énergie stockée dans les condensateurs va diverger. Pour éviter cela, des composants alternatifs sont nécessaires dans le convertisseur afin d'annuler la puissance moyenne des bras. Pour éviter le courant alternatif dans les côtés continus, ces courants alternatifs internes du M2DC devront obligatoirement avoir la même amplitude et un déphasage égal à $2\pi/m$ pour un M2DC à m bras.

Les lois de Kirchhoff appliquées sur le M2DC donnent les équations suivantes :

$$i_s = i_u - i_l \quad (5)$$

$$v_{dc1} = L_{arm} \left(\frac{di_u}{dt} + \frac{di_l}{dt} \right) + R_{arm} (i_u + i_l) + v_{mu} + v_{ml} \quad (6)$$

$$v_{dc1} = L_{arm} \frac{di_u}{dt} + R_{arm} i_u + v_{mu} + L_f \frac{di_s}{dt} + R_{arm} i_s + v_{dc2} \quad (7)$$

$$v_{ml} + L_{arm} \frac{di_l}{dt} + R_{arm} i_l = L_f \frac{di_s}{dt} + R_{arm} i_s + v_{dc2} \quad (8)$$

3. DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE RÉDUIT DU M2DC

L'objectif du modèle réduit est de produire un modèle représentant le M2DC vu de chaque côté DC tout en réduisant son ordre (le nombre de variables d'état qui le compose). Ainsi, les composantes alternatives sont négligées puisqu'elles ne sont pas injectées dans les réseaux DC. De plus, celles-ci sont contrôlées correctement et réalise le bon équilibrage des puissances dans le convertisseur.

En raison de l'asymétrie du convertisseur et sur la base des hypothèses ci-dessus, l'équation suivante peut être considérée :

$$\begin{aligned} v_{Ctotu} &= \langle v_{Ctotu} \rangle = V_{Ctot} \\ v_{Ctotl} &= \langle v_{Ctotl} \rangle = \frac{V_{Ctot}}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

avec k comme ratio de dimensionnement des bras.

3.1. ROM vue côté DC1

Dans cette partie, sur la base des lois de Kirchhoff, le modèle d'ordre réduit ROM côté DC1 est développé. Le courant différentiel est défini par l'équation équations suivantes :

$$i_{diff} = \frac{i_u + i_l}{2} \quad (10)$$

et donc

$$i_{dc1} = i_{diff} + \frac{i_{dc2}}{2} \quad (11)$$

$$v_{dc1} = 2L_{arm} \frac{di_{diff}}{dt} + 2R_{arm} i_{diff} + v_{\Sigma} \quad (12)$$

$$\text{avec } v_{\Sigma} = \frac{v_{mu} + v_{ml}}{2} \quad (13)$$

En introduisant (9) dans (13), il en résulte l'équation suivante :

$$v_{\Sigma} = m_u \cdot V_{Ctot} + m_l \frac{V_{Ctot}}{k} = m_{\Sigma} \cdot V_{Ctot} \quad (14)$$

Basé sur (10) à (14), il est possible d'étendre les équations à un M2DC possédant N bras à (15) à (18).

$$i_{dc1} = i_{diff_{\Sigma}} + \frac{i_{dc2}}{2} \quad \text{avec} \quad i_{diff_{\Sigma}} = \sum_{n=1}^N i_{diff_n} \quad (15)$$

$$v_{dc1} = L_1 \frac{di_{diff_{\Sigma}}}{dt} + R_1 i_{diff_{\Sigma}} + v_{mdc1} \quad (16)$$

$$\text{avec } L_1 = \frac{2L_{arm}}{N} \quad \text{et} \quad R_1 = \frac{2R_{arm}}{N} \quad (17)$$

$$v_{mdc1} = \sum_{n=1}^N \frac{v_{\Sigma_n}}{N} \quad \text{et} \quad m_{dc1} = \sum_{n=1}^N \frac{m_{\Sigma_n}}{N} \quad (18)$$

où v_{mdc1} représente deux fois la valeur moyenne du v_{diff_j} de chaque branche et représente la tension modulée moyenne équivalente vue par le réseau DC1. Elle est liée à la tension V_{Ctot} par le rapport de modulation équivalent DC1 m_{dc1} .

par conséquent, il est possible d'écrire que :

$$i_{mdc1} = m_{dc1} i_{diff_{\Sigma}} \quad (19)$$

À partir des équations (16) à (19), le modèle réduit généralisé du côté DC1 est tel que présenté à la Fig. 3.

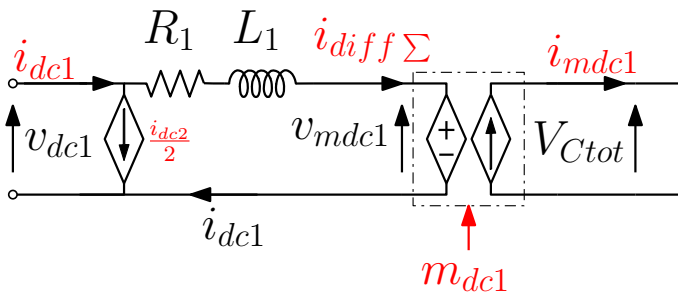


FIG. 3. Schéma du modèle réduit du M2DC vue du côté DC1.

Comme indiqué dans (16), (18), et mis en évidence dans la fig. 3, le courant circulant dans le réseau DC secondaire a un impact direct sur le courant côté DC1. Il induit un couplage direct entre les deux réseaux DC. Ce couplage est une différence majeure avec le modèle réduit du MMC [11].

3.2. Modèle réduit vue côté DC2

En additionnant (7) et (8) et en considérant (5), il est possible de trouver la relation du système sur le réseau DC2.

$$\frac{v_{dc1}}{2} - v_{dc2} = \left(\frac{L_{arm}}{2} + L_f \right) \frac{di_s}{dt} + \left(\frac{R_{arm}}{2} + R_f \right) i_s + v_s \quad (20)$$

$$\text{avec } v_s = \frac{v_{mu} - v_{ml}}{2} \quad (21)$$

En introduisant (9) dans (21), on obtient l'équation suivante :

$$v_s = \frac{m_u \cdot V_{Ctot} - m_l \frac{V_{Ctot}}{k}}{2} = m_s \cdot V_{Ctot} \quad (22)$$

Avec (20) et (5), il est possible d'étendre les équations à un M2DC avec N bras dans (23) à (26).

$$i_{dc2} = \sum_{j=1}^N i_{s_j} \quad (23)$$

$$\frac{v_{dc1}}{2} - v_{dc2} = L_2 \frac{di_{dc2}}{dt} + R_2 i_{dc2} + v_{mdc2} \quad (24)$$

$$\text{avec } L_2 = \frac{\frac{L_{arm}}{2} + L_f}{N} \quad \text{et} \quad R_2 = \frac{\frac{R_{arm}}{2} + R_f}{N} \quad (25)$$

$$v_{mdc2} = \sum_{j=1}^N \frac{v_{s_j}}{N} \quad \text{et} \quad m_{dc2} = \sum_{j=1}^N \frac{m_{s_j}}{N} \quad (26)$$

où v_{mdc2} est la valeur moyenne des v_{s_j} de chaque bras et représente la tension modulée moyenne équivalente vue par le réseau DC2. Elle est liée à la tension V_{Ctot} par le rapport de modulation équivalent DC2 m_{dc2} . Par conséquent,

$$i_{mdc2} = m_{dc2} i_{dc2} \quad (27)$$

À partir des équations (23) à (27), le modèle réduit généralisé du côté DC2 est tel que présenté à la fig. 4.

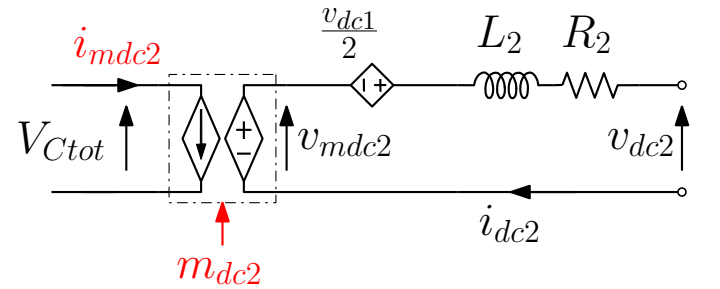


FIG. 4. Schéma du modèle réduit du M2DC vue du côté DC2.

3.3. Capacité interne équivalent du M2DC

Les deux côtés sont connectés à la tension V_{Ctot} . Celle-ci est reliée par tous les bras des condensateurs équivalents C_{tot} . Pour terminer la construction du modèle réduit du M2DC, il est nécessaire de définir la valeur du condensateur interne équivalent au M2DC. En additionnant (2) pour les demi-bras inférieur et supérieur, on obtient l'équation suivante :

$$C_{totu} \frac{dv_{Ctotu}}{dt} + \frac{C_{totl}}{k} \frac{dv_{Ctotl}}{dt} = m_u \cdot i_u + \frac{m_l}{k} \cdot i_l \quad (28)$$

$$\text{avec } i_u = i_{diff} - \frac{i_s}{2} \quad \text{et} \quad i_l = i_{diff} + \frac{i_s}{2} \quad (29)$$

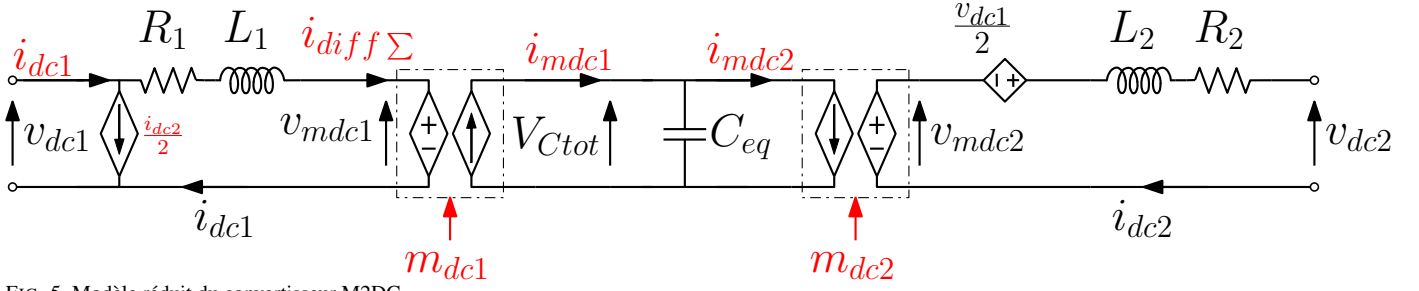


FIG. 5. Modèle réduit du convertisseur M2DC.

Il est alors possible de développer comme ci-dessous :

$$(C_{totu} + C_{totl}) \frac{dV_{Ctot}}{dt} = (m_u + \frac{m_l}{k}) \cdot i_{diff} \quad (30)$$

$$+ (-m_u + \frac{m_l}{k}) \cdot \frac{i_s}{2}$$

$$\Rightarrow (C_{totu} + C_{totl}) \frac{dV_{Ctot}}{dt} = m_{\Sigma} \cdot i_{diff} - m_s \cdot i_s \quad (31)$$

Il est possible d'étendre (31) à (32) pour un M2DC avec N bras.

$$N(C_{totu} + C_{totl}) \frac{dV_{Ctot}}{dt} = m_{dc1} \cdot i_{diff\Sigma} - m_{dc2} \cdot i_{dc2} \quad (32)$$

$$C_{eq} \frac{dV_{Ctot}}{dt} = i_{mdc1} - i_{mdc2}$$

Par conséquent, le condensateur équivalent C_{eq} pour un M2DC à N bras est égal à N fois la somme de C_{totu} et C_{totl} . Il relie les schémas proposés en Fig. 3 et Fig. 4 et finalise le modèle réduit complet du M2DC. Ce dernier est représenté fig. 5.

4. CONCEPTION DE LA COMMANDE DU MODÈLE RÉDUIT DU M2DC

Pour utiliser et étudier ce modèle réduit dans une analyse grand réseau, il est nécessaire d'asservir les variables d'état de ce dernier, à savoir $i_{diff\Sigma}$, i_{dc2} et V_{ctot} . Cette partie vise à développer le contrôle du ROM du convertisseur M2DC. Il sera décomposé entre le contrôle en courant indépendamment et se terminera sur le contrôle de V_{ctot} .

4.1. Contrôle des courants

À partir de l'équation (16) et de la Fig. 3, il est possible d'établir le schéma bloc du convertisseur coté DC1, comme présenté dans la partie supérieure de la Fig. 6 (cadre bleu). Sur la base des règles basées sur l'inversion du modèle, il est donc possible de concevoir le contrôle de $i_{diff\Sigma}$ avec un contrôleur PI en raison de sa nature DC. Ce schéma de contrôle est présenté dans la partie inférieure de la Fig. 6 (cadre rouge). La notation* indique la référence de la variable contrôlée.

Pour le coté DC2, la même démarche est réalisée à partir de l'équation (24) et de la Fig. 4. Le schéma de contrôle est présenté fig. 7.

4.2. Contrôle de la tension interne du condensateur équivalent M2DC

L'énergie stockée dans le condensateur C_{eq} peut être modélisée par (33).

$$\frac{C_{eq}}{2} \frac{dV_{Ctot}}{dt} = p_{dc1} - p_{dc2} \quad (33)$$

Avec (15), il est possible d'exprimer p_{dc1} en fonction de $i_{diff\Sigma}$ et i_{dc2} . (33) devient alors :

$$\frac{C_{eq}}{2} \frac{dV_{Ctot}}{dt} = v_{dc1} \cdot i_{diff\Sigma} - (v_{dc2} - \frac{v_{dc1}}{2}) \cdot i_{dc2} \quad (34)$$

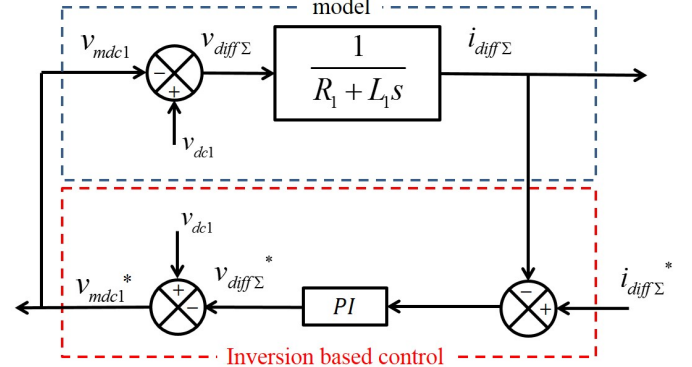


FIG. 6. Control du courant provenant du réseau DC 1 du ROM du M2DC.

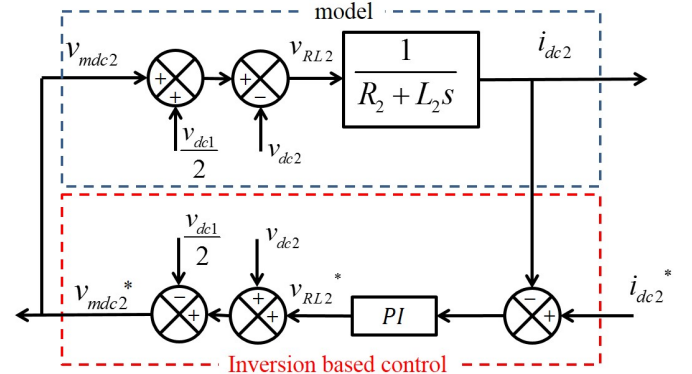


FIG. 7. Control du courant provenant du réseau DC 2 du ROM du M2DC.

Le contrôle de l'énergie stockée dans le condensateur C_{eq} peut se faire par $i_{diff\Sigma}$ ou par i_{dc2} . Comme dans la littérature, cet article propose de le contrôler avec $i_{diff\Sigma}$ afin de comparer adéquatement le modèle réduit présenté et le modèle pré-existant.

À partir de l'équation (34), il est possible d'établir la modélisation par Laplace de l'énergie équivalente stockée par le condensateur. Ce modèle est présenté dans la partie supérieure de la Fig. 8. Le contrôle de V_{Ctot} est, de nouveau, établie sur les principes d'inversion du modèle. Le schéma de contrôle est présenté dans la partie inférieure de la fig. 8.

5. RÉSULTATS DE SIMULATION

Le modèle de ROM M2DC et son contrôle sont validés dans cette partie avec les paramètres donnés dans le tableau 1.

Pour valider la valeur du condensateur équivalent C_{eq} , une première simulation a été réalisée pour le M2DC avec le modèle présenté en [7] et le modèle ROM proposé intégrant les contrôles en courant mais avec le contrôle de l'énergie désactivé. Les résultats sont présentés dans la Fig. 9. La simulation commence à puissance nulle. À $t=50ms$, un échelon de P_N a été effectué sur p_{dc1} générant une augmentation de l'énergie sto-

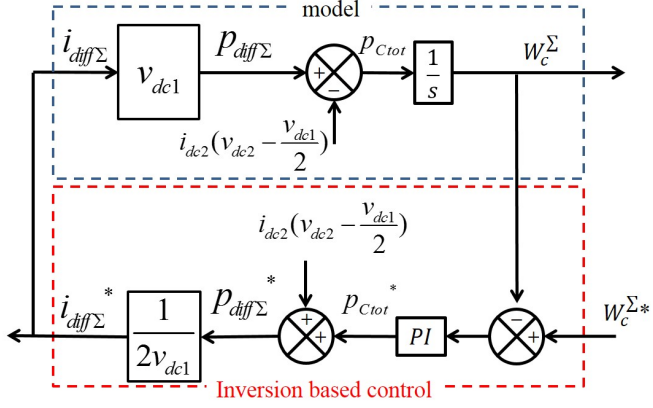


FIG. 8. Contrôle de l'énergie stockée dans la capacité équivalente du modèle ROM du M2DC.

TABLE 1. Paramètres de simulation du M2DC

$P_N = 600\text{MW}$	$V_{dc1} = 320\text{kV}$	$V_{dc2} = 250\text{kV}$
$N = 3$	$f_s = 300\text{ Hz}$	$k = 1.1$
$L_{arm} = 10\text{mH}$	$R_{arm} = 10\text{m}\Omega$	$V_{Ctotu} = 320\text{ kV}$
$L_f = 100\text{mH}$	$R_f = 100\text{m}\Omega$	$V_{Ctotl} = 290\text{ kV}$

ckée dans le condensateur du convertisseur. A $t = 200\text{ms}$, un échelon de P_N a été appliqué sur p_{dc2} rééquilibrant la puissance de chaque côté et stoppant l'augmentation de l'énergie stockée dans le convertisseur. Cette simulation valide le modèle des courants côtés DC1 et DC2 puisque les courants et les puissances sont égaux entre les résultats du modèle ROM et celui du modèle moyen des bras (EMT). De plus, La valeur de C_{eq} est validée puisque l'évolution de la valeur moyenne de V_{Ctot} est la même pour les deux modèles.

Pour valider le contrôle en énergie, un échelon de P_N est d'abord appliqué sur p_{dc2} comme le montre la Fig 10. i_{dc2} génère la puissance demandée et i_{dc1} génère un transitoire pour réguler V_{Ctot} à la bonne valeur. Ensuite, un échelon est réalisé sur les références de V_{Ctot} pour passer de 320kV à 380kV . i_{dc1} est transitoirement plus élevé pour stocker l'énergie et augmenter la tension à la nouvelle référence. Pour cette simulation, les simulations EMT et ROM donnent les mêmes résultats validant le modèle et le contrôle.

Vue des réseaux DC, le ROM se comporte exactement comme le modèle détaillé du M2DC mais il occulte plusieurs éléments comme le positionnement de l'énergie stockée dans les demi-bras, la participation des courants différentiels dans le courant provenant du réseau DC1 ou de ceux de sortie dans le courant DC2. Néanmoins, Il permet de réduire le temps de simulation de plus de 20 % et de simplifier l'analyse des pôles. En effet, le ROM possède 3 pôles pour le système ainsi que 3 pour les correcteurs alors que le modèle moyen du M2DC en possède 12 et 12 pour son contrôle.

6. CONCLUSIONS

Afin de réaliser des études de stabilité de réseaux MTDC intégrant des convertisseurs DC-DC, le développement de modèles réduits s'avère nécessaire. En effet, aucun modèle réduit de convertisseur DC-DC pour HVDC n'est disponible sauf si la topologie DC-DC est basée sur la topologie MMC en version AC/DC comme le MMC DAB. Cet article propose un modèle réduit du convertisseur DC-DC modulaire multiniveau (M2DC).

L'article a d'abord présenté les bases du convertisseur M2DC. Dans un deuxième temps, le modèle réduit a été développé. Ce modèle est divisé en trois parties, le développement du modèle pour les deux côtés DC indépendamment et enfin l'évaluation

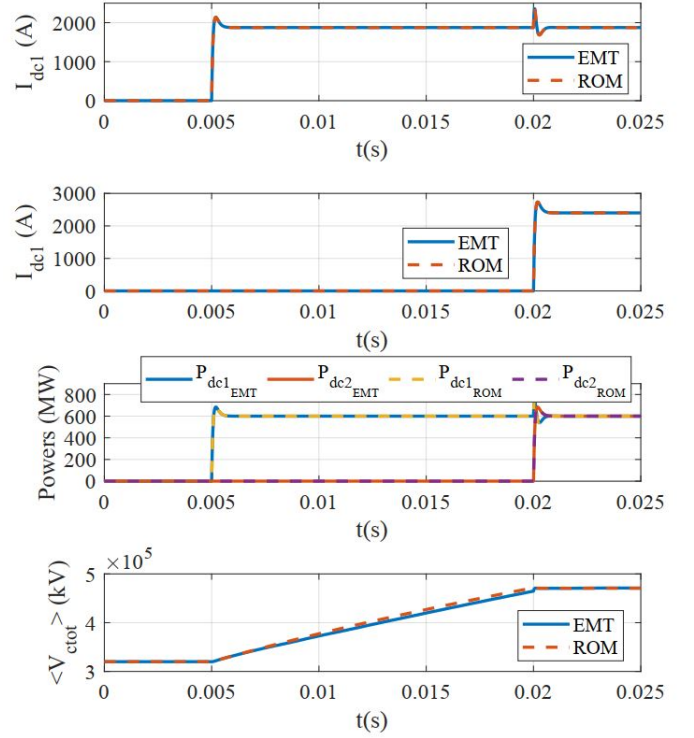


FIG. 9. C_{eq} and DC sides model validation

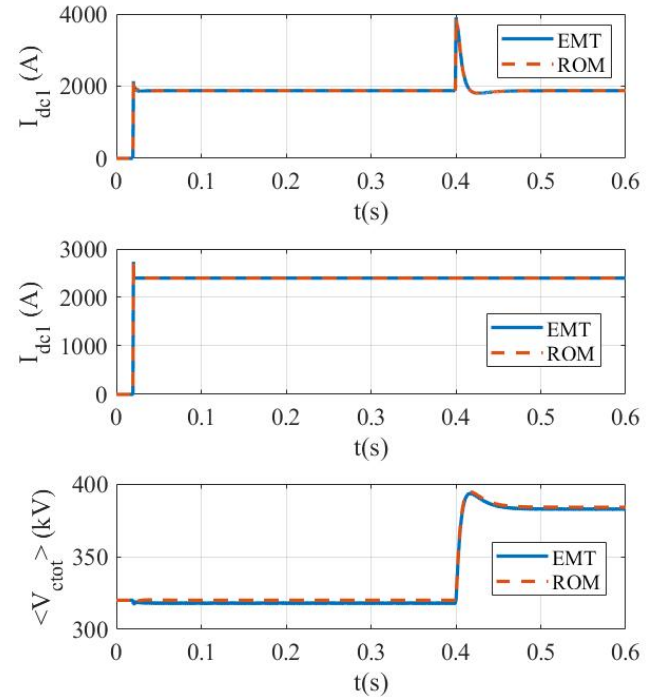


FIG. 10. ROM model and control validation

de la capacité interne équivalente M2DC. Le modèle développé permet de réduire l'ordre de 12 à 3. La conception de la commande applicable à ce modèle réduit a été réalisée dans la troisième partie. La comparaison du modèle réduit et de son contrôle au modèle moyen des bras du M2DC est effectuée dans la dernière partie de l'article. Cette dernière partie valide le modèle ROM du M2DC. A partir de ce modèle, l'introduction de M2DC dans une analyse de stabilité petits signaux est possible

et constitue la prochaine étape du travail à mener.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet DICIT qui a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme "Appel A Projet Générique" (ANR-20-CE05-0034 DICIT).

8. RÉFÉRENCES

- [1] Adam, G.P., Gowaid, I.A., Finney, S.J., Holliday, D. and Williams, B.W. (2016), Review of dc–dc converters for multi-terminal HVDC transmission networks. *IET Power Electronics*, 9 : 281-296. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0530>
- [2] J. D. Pérez, D. Frey, J. Maneiro, S. Bacha and P. Dworakowski, "Overview of DC–DC Converters Dedicated to HVdc Grids," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 119-128, Feb. 2019, doi : 10.1109/TPWRD.2018.2846408.
- [3] B. Li, X. Zhao, D. Cheng, S. Zhang and D. Xu, "Novel Hybrid DC/DC Converter Topology for HVDC Interconnections," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5131-5146, June 2019, doi : 10.1109/TPEL.2018.2866415.
- [4] S. H. Kung and G. J. Kish, "Multiport Modular Multilevel Converter for DC Systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 73-83, Feb. 2019, doi : 10.1109/TPWRD.2018.2846264.
- [5] Jovcic, D., Kish, G., Darbandi, A., Robinson, J., Ferrer, R., Guillaud, X., Junyent-Ferre, A., Nami, A., Meridji, T., Woodford, D., Gomis, O., Dworakowski, P., Jamshidifar, A., Bongiorno, M., and Saeedifard, M. (2021). DC-DC Converters in HVDC Grids and for Connections to HVDC systems. *Electra*, (315), 123-130. <https://electra.cigre.org/315-april-2021/technical-brochures/dc-dc-converters-in-hvdc-grids-and-for-connections-to-hvdc-systems.html>
- [6] F. Gruson, Y. Li, P. L. Moigne, P. Delarue, F. Colas and X. Guillaud, "Full State Regulation of the Modular Multilevel DC Converter (M2DC) Achieving Minimization of Circulating Currents," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 1, pp. 301-309, Feb. 2020, doi : 10.1109/TPWRD.2019.2942527.
- [7] François Gruson, Amine Tlemcani, Yafang Li, Philippe Delarue, Philippe Le Moigne and Xavier Guillaud (2020) Model and control of the DC–DC modular multilevel converter with DC fault tolerance, *EPE Journal*, 30 :4, 153-164, DOI : 10.1080/09398368.2020.1750847
- [8] J. Peralta, H. Saad, S. Denner, J. Mahseredjian and S. Nguefeu, "Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system," 2013 IEEE Power Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 1-1, doi : 10.1109/PESMG.2013.6672356.
- [9] H. Yang and M. Saeedifard, "A Capacitor Voltage Balancing Strategy With Minimized AC Circulating Current for the DC–DC Modular Multilevel Converter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 956-965, Feb. 2017, doi : 10.1109/TIE.2016.2613059.
- [10] Y. Li, F. Gruson, P. Delarue and P. Le Moigne, "Design and control of modular multilevel DC converter (M2DC)," 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, Poland, 2017, pp. P.1-P.10, doi : 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099108.
- [11] J. Freytes, L. Papangelis, H. Saad, P. Rault, T. Van Cutsem and X. Guillaud, "On the modeling of MMC for use in large scale dynamic simulations," 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, Italy, 2016, pp. 1-7, doi : 10.1109/PSCC.2016.7540938.
- [12] J. Freytes et al., "Improving Small-Signal Stability of an MMC With CCSC by Control of the Internally Stored Energy," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 1, pp. 429-439, Feb. 2018, doi : 10.1109/TPWRD.2017.2725579.
- [13] E. Sánchez-Sánchez, E. Prieto-Araujo, A. Junyent-Ferré and O. Gomis-Bellmunt, "Analysis of MMC Energy-Based Control Structures for VSC-HVDC Links," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 1065-1076, Sept. 2018, doi : 10.1109/JESTPE.2018.2803136.