

# Gestion des flux de puissance avec équilibrage des SOC's dans un Micro-réseau DC – Bateau électrique

Abdelhakim Saim<sup>1,\*</sup>, Azeddine Houari<sup>1</sup>, Djamel Ziane<sup>1</sup>, Mourad Ait-Ahmed<sup>1</sup>, Mohamed Machmoum<sup>1</sup>, Josep.M Guerrero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique (IREENA), Nantes Université, 44600, Saint Nazaire, France

<sup>2</sup>Center for Research on Microgrids (CROM), Université d'Aalborg, 9220, Aalborg, Danemark

**Résumé**— Dans cet article, une stratégie de contrôle primaire-secondaire est proposée pour le réglage de la tension de bus et la gestion des flux de puissance dans un bateau traversier (ferry) tout électrique. L'objectif de cette stratégie est de maintenir une alimentation électrique fiable pour la propulsion et les charges de service du ferry et d'optimiser l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie par batteries (BESS – Battery Energy Storage System) à bord en tenant compte de leurs états de charge (SOC – State of Charge). Pour cela, une stratégie de contrôle hiérarchique comprenant un niveau de contrôle primaire pour le maintien d'une tension de bus continue et la répartition des charges à bord. La répartition des charges est basée sur la méthode de statisme (Droop) V/P qui est utilisée. Un niveau de contrôle secondaire est ajouté pour optimiser la participation de chaque BESS en fonction de la charge électrique à bord du ferry et des SOC's respectifs. Cette stratégie de contrôle assure également l'équilibrage des SOC's des BESSs à travers le choix de facteurs de participation optimisés avec l'objectif d'améliorer les performances et la durée de vie des BESSs. Des tests de validation Hardware-in-the-Loop utilisant dSPACE – Typhoon HIL sont présentés.

**Mots-clés** – Bateaux électriques ; Micro-réseaux DC; Contrôle hiérarchique; Equilibrage SoCs; Optimisation PSO; Batteries;

## I. INTRODUCTION

Ces dernières années, le secteur des transports a déployé des efforts soutenus pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) [1]. Selon l'Organisation Maritime Internationale (OMI), les émissions liées au transport maritime représentent près du quart des émissions totales liées au transport. Ces émissions proviennent surtout des navires et des activités portuaires [2]. Dans ce contexte, l'OMI préconise de réduire de près de 50 % les émissions de GES du transport maritime d'ici 2050 [1]. L'action principale consiste à obliger les navires à réduire l'utilisation des carburants à forte empreinte carbone au profit de carburants moins polluants et de sources alternatives [3].

L'intégration de nouvelles sources d'énergie électrique et de carburants alternatifs est facilitée par le développement d'une distribution électrique de type DC et/ou AC à bord de ces systèmes [4]. Ces efforts impliquent également l'intégration de nouvelles technologies de stockage de l'énergie. Actuellement, l'électrification vise principalement les ferries et les petits

navires à passagers et de courte distance. La transition vers des bateaux traversier - ferry alimentés par des batteries est de plus en plus encouragée par les progrès réalisés dans les technologies des batteries, qui permettent une plus grande densité énergétique [5]. Un nombre de bateaux ferry alimentés par des batteries sont déjà en service, tels que le MV Ampere, le Bastø Electric et, le MS Medstrøm en Norvège.

Par ailleurs, contrairement aux applications de Micro-réseaux stationnaires où la connexion au réseau est toujours possible pour compenser l'intermittence des sources d'énergie et la variation des charges, les Micro-réseaux (mobiles) à bord des bateaux sont isolés et peuvent connaître des fluctuations de charge importantes avec une puissance limitée [6].

Des stratégies de contrôle et de gestion sont nécessaires pour maintenir la tension du bus DC dans des limites acceptables et assurer la gestion des réserves d'énergie même dans des conditions de charge et de navigation fluctuantes [7]–[9].

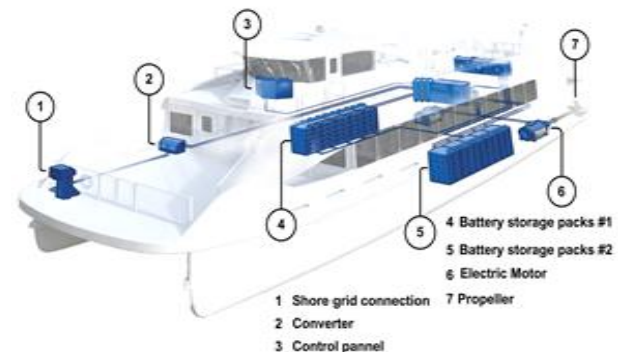


Fig. 1. Structure type du bateau traversier étudié

Dans cet article, une stratégie avancée de contrôle et de gestion de l'énergie est proposée pour un ferry électrique à courte distance alimenté exclusivement par des systèmes de stockage d'énergie à base de batteries (BESSs). Le système étudié est illustré par la Fig. 1. L'objectif de cette stratégie est de maintenir un échange de puissance équilibré et une tension de bus DC stable dans le Micro-réseau de bord afin de maintenir une alimentation électrique fiable pour les charges (propulsion et services,...) du ferry dans toutes les conditions d'exploitation. Pour ce faire, une structure de contrôle hiérarchique est

proposée, comprenant des boucles de contrôle de tension et de courant dont l'objectif est de maintenir la tension du bus DC souhaitée. Ensuite, une boucle de contrôle supplémentaire destinée au contrôle de la répartition des puissances/charges est utilisée. Cette boucle est basée sur la technique de statisme V/P et est mise en œuvre afin de répartir avec précision la puissance entre les BESS. En outre, une couche externe de gestion de des flux de puissance est mise en place afin d'adapter la participation des deux BESS en fonction de leur état de charge (SOCs) et de la demande de puissance ferry. Cette stratégie de gestion gère également l'équilibrage des SOC des BESS embarqués en utilisant des facteurs de participation optimisés. Les facteurs de participation sont obtenus en temps réel à l'aide d'une optimisation métaheuristique. L'équilibrage optimisé des SOC vise à améliorer les performances des BESS en évitant les décharges excessives et la déconnexion des BESS. La validité de la stratégie de contrôle et de gestion proposée est vérifiée à l'aide d'une simulation Hardware-in-the-Loop.

Le présent document est organisé comme suit : la section II présente la description du système étudié. La section III décrit les principaux niveaux de contrôle de la stratégie de contrôle hiérarchique et de gestion de la puissance proposée. Les résultats de la simulation Hardware-in-the-Loop en temps réel sont fournis et discutés dans la section IV afin de vérifier l'efficacité de la stratégie proposée pour la gestion de la puissance et l'équilibrage des SOC. Enfin, la section V souligne les principales contributions de ce travail.

## II. DESCRIPTION DU SYSTEME

La configuration du Micro-réseau de bord considérée dans cette étude est illustrée dans Fig. 2. Celle-ci est dotée d'une configuration Micro-réseau radiale avec deux bus-barres pour des raisons de fiabilité.

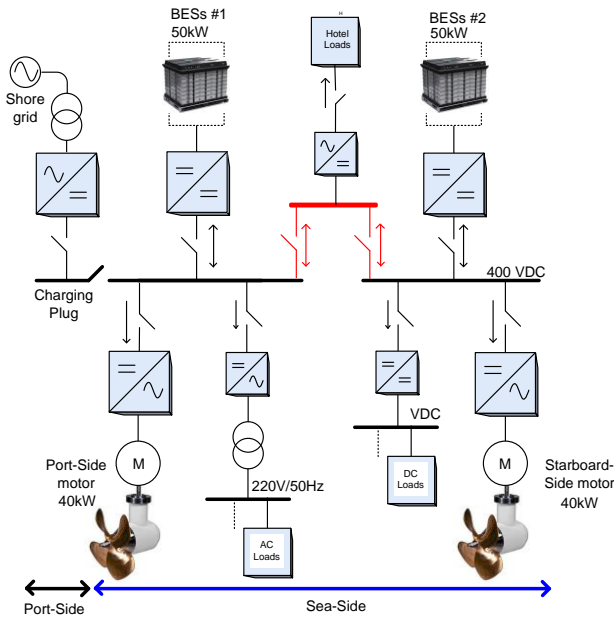


Fig. 2. Configuration du Micro-réseau de bord.

Deux BESSs avec une capacité totale de 100kW sont utilisées pour alimenter les charges à bord (propulsion, services, ..). Des convertisseurs buck-boost bidirectionnels sont utilisés comme interfaces pour connecter les deux BESSs au bus commun. Celles-ci représentant la principale source d'énergie à bord, ce qui rend nécessaire l'installation d'alimentation à quoi pour la recharge.

## III. STRATEGIE DE CONTROLE PROPOSEE

La stratégie de contrôle hiérarchique proposée est illustrée par la Fig. 3. Cette stratégie combine deux niveaux de contrôle principaux. Le premier assure le contrôle de la tension et du courant, et assure le contrôle de la répartition des charges entre les deux unités BESSs. Le deuxième niveau comprend une stratégie de gestion des flux de puissance en temps-réel. Cette stratégie permet de définir la participation en puissance pour chaque BESS de manière à assurer l'équilibrage des états de charge SOC. Cet équilibrage est important pour éviter la décharge excessive et la déconnexion des BESS ce qui permettra ainsi d'améliorer la fiabilité du système.

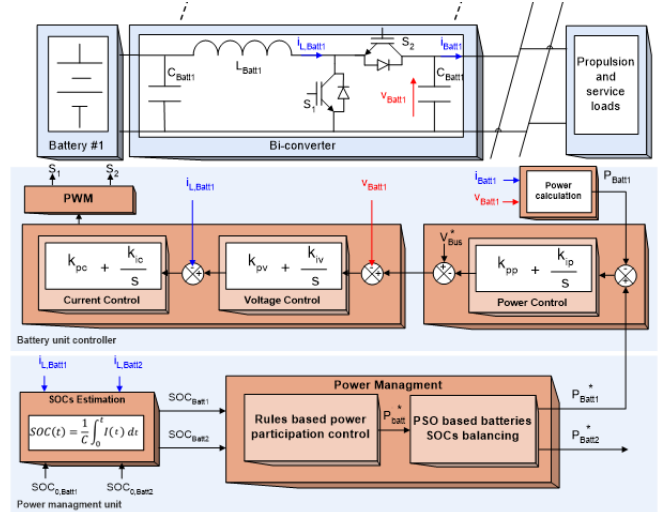


Fig. 3. Stratégie de contrôle proposée - BESS<sub>i</sub>

- Des régulateurs PI sont utilisés pour le contrôle de la tension et du courant (1) et (2).

$$I_{Batt,i}^* = k_{pc} (V_{Batt,i}^* - V_{Batt,i}) + k_{ic} \int (V_{Batt,i}^* - V_{Batt,i}) \quad (1)$$

$$V_{cmd,i}^* = k_{pv} (I_{Batt,i}^* - I_{Batt,i}) + k_{iv} \int (I_{Batt,i}^* - I_{Batt,i}) \quad (2)$$

où  $V_{Batt,i}^*$  et  $I_{Batt,i}^*$  représentant les tension et courant de références.  $V_{cmd,i}^*$  le signal de commande.  $k_{pc}$ ,  $k_{pv}$ ,  $k_{iv}$  et  $k_{ip}$  représentent les gains de contrôle de tension et de courant.

- La répartition des charges est assuré comme suit par une technique de statisme de type V/P – un régulateur PI est ajouté.

$$V_{Batt,i}^* = V_{Bus} - k_{pp} (P_{Batt,i}^* - P_{Batt,i}) - k_{ip} \int (P_{Batt,i}^* - P_{Batt,i}) \quad (3)$$

où  $P_{Batt,i}^*$  représente la puissance de référence définie par le niveau de contrôle secondaire pour BESS<sub>i</sub>.  $k_{pp}$  et  $k_{ip}$  représentent les gains de contrôle.

- Le niveau secondaire assure la gestion en temps réel de la participation des chaque BESS en fonction de leur SOC. Le principe de l'équilibrage des SOC proposé est illustré par la Fig. 4. Un algorithme d'optimisation par essaim de particules

(PSO – Particles Swarm Optimization) est utilisé [10]. Ce dernier vise à définir le rapport de participation de chaque BESS de manière à assurer l'équilibrage des SOC, ce qui est important pour éviter une décharge excessive de BESS. La fonction objective utilisée est donnée ci-après.

$$f = \sum_{i=1}^n \left( k_{Batt,i} - \frac{SOC_i}{\sum_{j=1}^m SOC_j} \right)^2 \quad (4)$$

où  $k_{Batt,i}$  et  $SOC_i$  représentent le facteur de participation et l'état de charge estimé de BESSi. Les facteurs de participation obtenus sont utilisés comme suit :

$$P_{Batt,i}^* = k_{Batt,i} P_{Load} \quad (5)$$

où  $P_{Load}$  représente la puissance totale demandée par le ferry,  $P_{Batt,i}^*$  la puissance de référence BESSi.

Les gains des contrôleurs sont définis par placement des pôles et sont listés dans le Tableau 1.

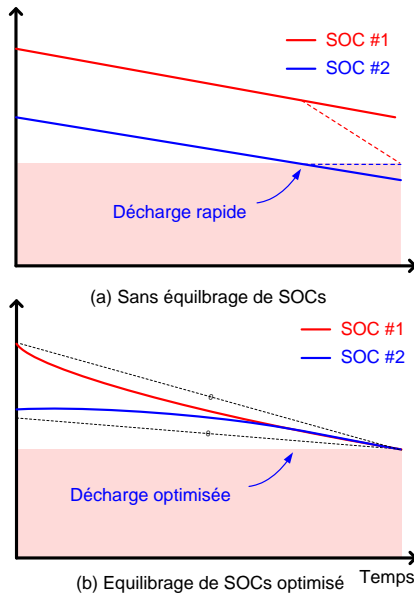


Fig. 4. Principe de l'équilibrage de SOC proposé.

Tableau 1 : Paramètres de contrôle

Parameter	Symbol	Value
Current control loop		
Proportional gain	$k_{pv}$	$2 \times 0.7 \times 1.1 \times 10^{-3} \times 250$
Integral gain	$k_{iv}$	$1.1 \times 10^{-3} \times 250^2$
Voltage control loop		
Proportional gain	$k_{pc}$	$2 \times 0.7 \times 1 \times 10^{-3} \times 1000$
Integral gain	$k_{ic}$	$1 \times 10^{-3} \times 1000^2$
Power control loop		
Proportional gain	$k_{pp}$	1
Integral gain	$k_{ip}$	100

#### IV. REAL-TIME SIMULATION RESULTS.

L'efficacité de la stratégie de contrôle hiérarchique proposée a été évaluée à l'aide de simulations en temps-réel. La configuration de la simulation Hardware-in-the-Loop est illustrée par Fig. 5. Cette configuration combine une unité

dSPACE 1006 et une unité Typhoon HIL 604. L'ensemble de la stratégie de contrôle et de gestion des flux de puissance a été développée dans Matlab/Simulink et implémentée sur dSPACE 1006, tandis que le circuit de puissance comprenant tous les BESS, les convertisseurs électroniques de puissance et les composants passifs ont été implémentés dans le Typhoon HIL 604. L'interface HIL dS a été utilisée pour le mappage des signaux entre dSPACE et Typhoon. Les paramètres du système sont listés dans le Tableau 2.

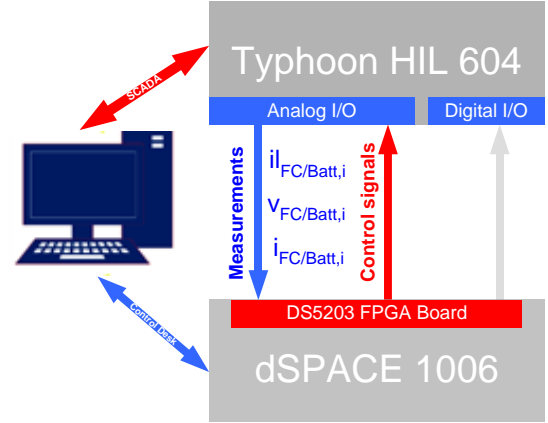


Fig. 5 Configuration du banc de test utilisé - Hardware in the Loop Simulation.

Le profil de charge considéré est inspiré du ferry Ampere qui relie Lavik à Oppedal en Norvège. Dans cette étude, le profil de charge comprend à la fois les charges de propulsion et les charges hôtelières/services. Ce profil représente différentes étapes, notamment la manœuvre au port, le départ, l'accélération, la traversée et l'arrivée. Il est à noter que, pour des raisons de simplicité, la capacité des BESS est supposée suffisante pour une opération de ferry d'une journée.

Les résultats obtenus dans cette étude sont illustrés dans les Fig. 6 et Fig. 8. La Fig. 6 montre que la participation en puissance des BESS embarqués était initialement inégale en raison du déséquilibre du SOC des BESS, mais après l'application des facteurs de participation en puissance optimisés, la participation en puissance des BESS est devenue comparable. La Fig. 7 montre que les pentes de décharge des BESS étaient différentes jusqu'à ce que le SOC des BESS soit équilibré. La Fig. 8 montre que le facteur de participation à la puissance pour chaque BESS est défini proportionnellement à son niveau de SOC ; une participation égale est obtenue après quelques cycles.

Tableau 1 : Paramètres du système

Parameter	Symbol	Value
Power converter		
Filter capacitor	$C_{Batt,i}$	1100μF
Filter inductance	$L_{Batt,i}$	1mH
Battery		
Battery type	Lithium-ion	-
Nominal voltage	-	48 V
Rated capacity	-	240kWh
Initial state of charge	$SOC_1, SOC_2$	90%, 70%

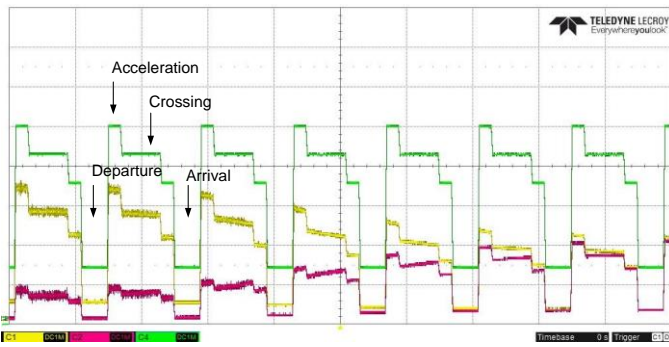


Fig. 3. Résultat de test HIL: Participation de BESS #1 (Jaune), BESS#2 (Rose), et profil de charge (vert).

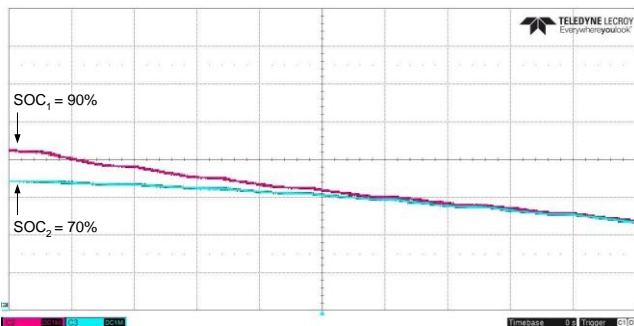


Fig. 8. Real Time Simulation results of the ferry BESS State-of-Charge levels, SOC#1 (Pink), and SOC#2 (Blue).

## CONCLUSION

Dans cet article, une stratégie de contrôle a été proposée pour le maintien de la tension de bus et la gestion des flux de puissance dans un bateau tout électrique alimenté par batteries. Cette stratégie est basée sur un schéma de contrôle hiérarchique qui comprend à la fois un niveau de contrôle primaire (contrôle de la tension – répartition des charges) et un niveau de contrôle secondaire pour la gestion des flux de puissances et l'équilibrage des SOC. Les performances de cette stratégie ont été vérifiées en temps réel sur un système HIL combinant dSPACE et une cible Typhoon HIL, et ceci en tenant compte d'un profil de charge représentatif du ferry.

Les principales contributions de ce document sont les suivantes :

- Le développement d'un contrôle hiérarchique et d'une stratégie de gestion pour un Micro-réseau embarqué de type DC.
- La stratégie proposée comprend le contrôle de la tension et du courant, le contrôle du partage de la puissance et la gestion de la puissance.

- Une stratégie optimisée d'équilibrage de l'état de charge a été proposée à l'aide de l'optimisation par essaim particulaire.
- Des tests Hardware in the Loop en temps réel ont été effectués en utilisant dSPACE1006 et Typhoon HIL 604.

## REFERENCES

- [1] S. Fang, Y. Wang, B. Gou, and Y. Xu, "Toward Future Green Maritime Transportation: An Overview of Seaport Microgrids and All-Electric Ships," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 69, no. 1, pp. 207–219, Jan. 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2950538.
- [2] S. Gota, C. Huizenga, K. Peet, N. Medimorec, and S. Bakker, "Decarbonising transport to achieve Paris Agreement targets," *Energy Effic*, vol. 12, no. 2, pp. 363–386, Feb. 2019, doi: 10.1007/S12053-018-9671-3/TABLES/3.
- [3] F. D'Agostino, A. Fidigatti, E. Ragaini, and F. Silvestro, "Integration of Shipboard Microgrids within Land Distribution Networks: Employing a Ship Microgrid to Meet Critical Needs," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 69–80, Dec. 2019, doi: 10.1109/MELE.2019.2943979.
- [4] Z. Jin, G. Sulligoi, R. Cuzner, L. Meng, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Next-Generation Shipboard DC Power System: Introduction Smart Grid and dc Microgrid Technologies into Maritime Electrical Networks," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 45–57, Jun. 2016, doi: 10.1109/MELE.2016.2544203.
- [5] F. Ahmad, M. Khalid, and B. K. Panigrahi, "Development in energy storage system for electric transportation: A comprehensive review," *J Energy Storage*, vol. 43, p. 103153, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.103153.
- [6] M. U. Mutarrif *et al.*, "Adaptive Power Management of Hierarchical Controlled Hybrid Shipboard Microgrids," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21397–21411, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3153109.
- [7] Z. X. Xiao, Y. Z. Guan, H. W. Fang, Y. Terriche, and J. M. Guerrero, "Dynamic and Steady-State Power-Sharing Control of High-Efficiency DC Shipboard Microgrid Supplied by Diesel Generators," *IEEE Syst J*, 2021, doi: 10.1109/JSYST.2021.3111685.
- [8] P. Xie, S. Tan, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "MPC-informed ECMS based real-time power management strategy for hybrid electric ship," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 126–133, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.02.013.
- [9] D. Park and M. Zadeh, "Dynamic Modeling, Stability Analysis, and Power Management of Shipboard DC Hybrid Power Systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 225–238, Mar. 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3119231.
- [10] M. A. Hossain, H. R. Pota, S. Squartini, and A. F. Abdou, "Modified PSO algorithm for real-time energy management in grid-connected microgrids," *Renew Energy*, vol. 136, pp. 746–757, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.01.005.