

Modélisation et simulation d'un ascenseur entraîné par une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un banc de supercondensateurs

B. Blunier, A. Djerdir, A. Miraoui

Laboratoire de recherche en électronique, électrotechnique et systèmes, L2ES
Laboratoire mixte de recherche UFC et UTBM associé à l'INRETS – n° LRE-T31
UTBM (Bât. F) – Rue Thierry Mieg – F90 010 Belfort
benjamin.blunier@utbm.fr

Résumé— Le but de cet article est de présenter les avantages de la récupération d'énergie lors de la descente d'un ascenseur. Afin d'éviter les problèmes de réinjection de l'énergie dans le réseau électrique, le choix a été fait de récupérer cette énergie dans des supercondensateurs. L'utilisation d'une machine synchrone à aimants permanents sans réducteur permet d'obtenir un rendement et une compacité bien meilleurs que les solutions déjà existantes. Une modélisation ainsi que les résultats de la simulation d'un tel système sont présentés.

Mots clés— Machine synchrone à aimants permanents, ascenseur, supercondensateurs, hacheur, onduleur de tension, récupération d'énergie.

I. INTRODUCTION

Les supercondensateurs représentent une des dernières innovations concernant les composants dédiés au stockage de l'énergie. Ces derniers sont très adaptés aux applications nécessitant une forte sollicitation en puissance pendant des temps très courts et comprenant de nombreux cycles de charges-décharges.

Le domaine énergie-puissance des supercondensateurs (Fig. 1) se situe entre celui des accumulateurs électrochimiques et des condensateurs classiques.

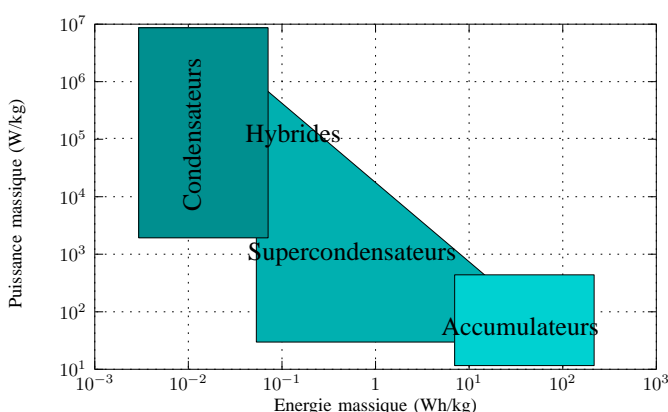


Fig. 1. Diagramme de Ragone [8] : comparatif des performances des condensateurs, supercondensateurs et accumulateurs

Malgré leur faible densité énergétique par rapport aux accumulateurs classiques, les supercondensateurs peuvent répondre

aux besoins de nombreux systèmes électriques. Tel est le cas par exemple des ascenseurs [3] : durant les phases d'accélération, la sollicitation en puissance est élevée. L'alimentation d'un ascenseur par un banc de supercondensateurs permettrait de restituer l'énergie lors de la descente, évitant ainsi de dissiper l'énergie dans des résistances de freinage ou d'être confronté aux problèmes liés à la réinjection d'électricité dans le réseau (tarification, pollution du réseau électrique etc.). La seule énergie à fournir serait donc la compensation des pertes du système. Cette énergie pourrait être fournie par une source secondaire telle que le réseau électrique, une pile à combustible ou des énergies renouvelables (solaire, éolien etc.).

L'entraînement de l'ascenseur par une machine synchrone à aimant permanents (MSAP) sans réducteur permettrait d'une part d'augmenter le rendement du système — les ascenseurs classiques sont équipés de machines avec réducteurs — et de diminuer de 70 % (cas de l'ascenseur *GeN2* du constructeur *Otis*) l'encombrement occupé par la machine.

Cet article décrit la modélisation et la simulation d'un ascenseur entraîné par une MSAP sans réducteur alimentée par un banc de supercondensateurs. Le cahier des charges du système sera basé sur les caractéristiques de l'ascenseur *GeN2*.

II. PRÉSENTATION DU SYSTÈME

A. Système global

Le système à simuler (Fig. 2) peut se décomposer en quatre sous-systèmes :

- l'ascenseur représenté par un système charge-contre-poids ;
- l'entraînement comprenant la MSAP associée à son convertisseur et sa commande ;
- l'alimentation principale comprenant le banc de supercondensateurs associé à son convertisseur et sa commande ;
- l'alimentation secondaire (PAC, solaire, éolien, réseau etc.).

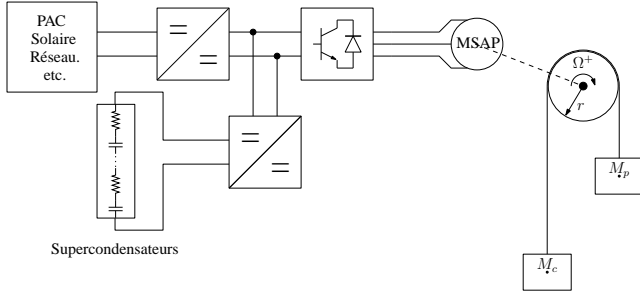


Fig. 2. Schéma du système

B. Cahier des charges

Le cahier des charges utilisé pour effectuer la simulation est inspiré de l'ascenseur *GeN2* du constructeur *Otis* [1]. Les caractéristiques sont données par le tableau ci-dessous.

Caractéristiques de l'ascenseur	
Charge (M_c)	630 kg
Vitesse (v_c)	1 m/s
Course	40 m à 1,0 m/s
Rayon de la poulie (r)	10 cm
Accélération maximale (γ_{max})	$0,8 \pm 0,13 \text{ m/s}^2$

III. MODÉLISATION DES SOUS-SYSTÈMES

A. Modélisation du système de masses

En effectuant un bilan des forces du système charge-contrepoids, il est possible de calculer le couple résistant sur le moteur :

$$\Gamma_r = (M_c - M_p) g r + (M_c + M_p) r^2 \frac{d\Omega}{dt} \quad (1)$$

Avec,

g : accélération terrestre ;

Ω : vitesse de rotation de la MSAP.

Afin de minimiser la puissance maximale ($\Gamma_r \Omega$) à fournir pour lever la charge à vitesse constante ($d\Omega/dt = 0$), la masse du contrepoids doit être égale à la moitié de la charge maximale. La masse du contrepoids sera donc égale à 315 kilogrammes d'après le cahier des charges.

B. Modélisation de la MSAP

1) *Équations électriques* : le modèle de la machine a été réalisé dans le repère de Park [9] et mis sous représentation d'état :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \mathcal{A}(\Omega) \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \mathcal{L}^{-1} \left[\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ p \phi_f \Omega \end{pmatrix} \right] \quad (2)$$

Où

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(\Omega) &= \mathcal{L}^{-1} \mathcal{R}(\Omega) \\ \mathcal{R}(\Omega) &= \begin{pmatrix} R & -p L_q \Omega \\ p L_d \Omega & R \end{pmatrix} \\ \mathcal{L} &= \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Avec,

L_d, L_q : inductances statoriques directe et en quadrature dans le repère de Park ;

i_d, i_q : courants statoriques direct et en quadrature dans le repère de Park ;

ϕ_f : flux de l'aimant permanent ;

v_d, v_q : tensions statoriques directe et en quadrature dans le repère de Park ;

R : résistance statorique ;

p : nombre de paires de pôles de la machine.

Les représentations symbolique et fonctionnelle de la MSAP dans le repère de Park sont données respectivement par Fig. 3(a) et Fig. 3(b).

2) *Expression du couple électromagnétique* : l'expression du couple électromagnétique de la MSAP est la suivante :

$$\Gamma = p \left((L_d - L_q) i_d + \phi_f \right) i_q \quad (3)$$

Si la machine est à pôles lisses comme c'est le cas dans cette application, les inductances L_d et L_q sont égales et l'expression du couple électromagnétique de la machine se réduit à l'expression suivante :

$$\Gamma = p \phi_f i_q \quad (4)$$

On remarque dans l'expression (4) que le couple de la MSAP à pôles lisses ne dépend plus du courant i_d . La stratégie de commande consiste donc à maintenir le courant i_d à zéro afin de limiter les pertes dans les résistances de la machine.

3) *Équations mécaniques* : l'expression du couple mécanique de la MSAP est donnée par l'équation suivante :

$$\Gamma = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega + \Gamma_r \quad (5)$$

Avec,

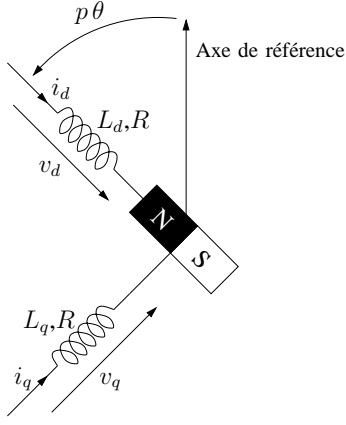
J : inertie du rotor de la machine synchrone ;

f : coefficient de frottement mécanique ;

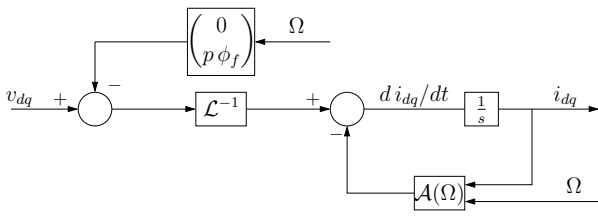
Γ_r : couple résistant.

En remplaçant Γ_r par son expression donnée par (1), l'expression de Γ devient :

$$\left(J + (M_c + M_p) r^2 \right) \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma - f \Omega + (M_c - M_p) g r \quad (6)$$



(a) Représentation symbolique



(b) Représentation fonctionnelle

Fig. 3. Représentations de la MSAP dans le repère de Park

C. Modélisation du banc de supercondensateurs

Un supercondensateur peut être modélisé par le schéma donné par Fig. 4

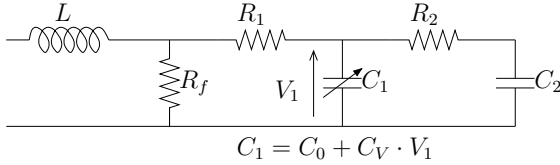


Fig. 4. Modèle équivalent d'un supercondensateur

Dans le modèle, on distingue plusieurs parties [5] :

- **la branche principale**, représentée par la résistance R_1 et le condensateur C_1 . Elle détermine l'évolution de l'énergie pendant les cycles de charge et décharge. La valeur C_1 varie en fonction de la tension présente à ses bornes : $C_1 = C_0 + C_V \cdot V_1$;
- **la branche lente**, représentée par la résistance R_2 et le condensateur C_2 . Elle intervient lors du phénomène de redistribution des charges internes du composant intervenant à la fin de charge ou de la décharge ;
- **l'inductance** L , de l'ordre de quelques nano-henrys. Elle représente la limitation en fréquence du composant et peut être négligée dans la plupart des applications ;
- **la résistance** R_f , de l'ordre de quelques kilo-ohms. Elle

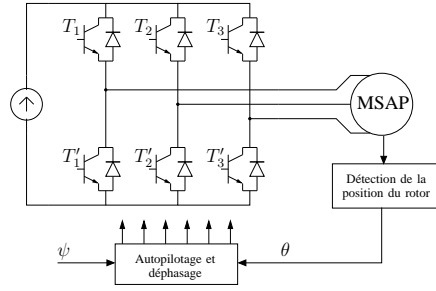
représente la résistance de fuite du composant.

IV. TOPOLOGIE ET COMMANDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

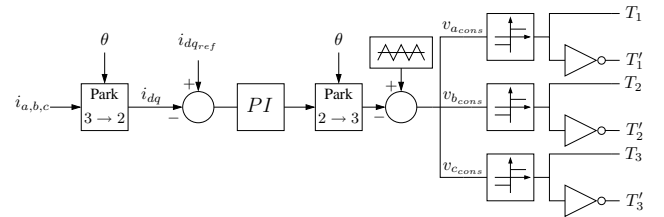
A. Convertisseur statique associé à la MSAP

Une stratégie de contrôle à couple maximal de la machine synchrone nécessite un contrôle *direct* des courants de la machine [7]. L'utilisation d'un bus continu en amont de l'onduleur impose l'utilisation d'un onduleur de tension.

La topologie retenue est donc un onduleur de tension contrôlé en courant (Fig. 5(a)). Les courants seront traités dans le repère de Park afin de réguler des grandeurs continues, évitant ainsi les problèmes liés au suivi des consignes sinusoïdales à fréquence variable [7] (Fig. 5(b)).



(a) Topologie du convertisseur : convertisseur de tension



(b) Commande de la MSAP : contrôle des courants dans le repère de Park

Fig. 5. Choix de la topologie et de la commande de la MSAP

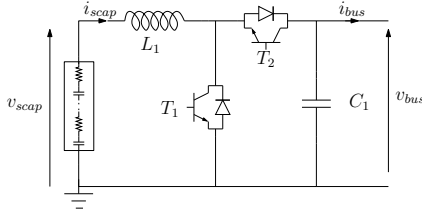
B. Convertisseur associé au banc de supercondensateurs

La topologie permettant d'assurer l'échange d'énergie entre le banc de supercondensateurs et le bus continu est un hacheur élévateur-abaisseur (Fig. 6(a)). Le but du hacheur est de maintenir une tension constante sur le bus continu : un régulateur proportionnel-intégral a été utilisé (Fig. 6(b)).

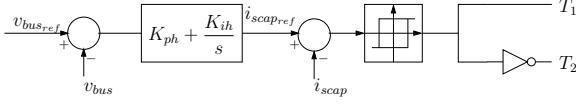
V. ÉLÉMENTS DE DIMENSIONNEMENT

A. Choix des paramètres de la MSAP

Le choix des paramètres de la machine porte sur le produit $p \phi_f$. Afin de faire ce choix, on part de la contrainte suivante : le rendement de la machine fonctionnant en génératrice doit être une valeur cible η_G (fonction objectif). Ce rendement doit



(a) Hacheur élévateur-abaisseur



(b) Schéma de commande et de régulation de la tension du bus continu v_{bus}

Fig. 6. Topologie et commande du convertisseur associé au banc de supercondensateurs

être obtenu quand l'ascenseur est à vitesse constante (on ne tiendra pas compte de la phase d'accélération).

Le rendement de la machine en fonctionnement générateur s'écrit (en limitant les pertes aux seules pertes électriques dans les résistances de la machine),

$$\eta_G = \frac{-\text{Puissance mécanique} - \text{Pertes}}{-\text{Puissance mécanique}} \quad (7)$$

$$= \frac{-\Gamma \Omega - R i_q^2}{-\Gamma \Omega} \quad (8)$$

Remarque 1 : la valeur de la puissance mécanique est négative en fonctionnement générateur. Il faut donc, dans le calcul du rendement, affecter la puissance mécanique du signe moins.

À vitesse constante Ω_{max} , le couple résistant Γ_r et le couple électromagnétique Γ sont égaux et d'après (1) et (4),

$$\Gamma = \Gamma_r \quad (9)$$

$$p \phi_f i_q = f \Omega_{max} + (M_c - M_p) r g \quad (10)$$

L'expression du courant i_q est donc,

$$i_q = \frac{f \Omega_{max} + (M_c - M_p) r g}{p \phi_f} \quad (11)$$

On en déduit donc l'expression du produit $p \phi_f$ en utilisant (9), (11) et (7),

$$p \phi_f = \sqrt{\frac{R \left((M_c - M_p) r g \right) - f \Omega_{max}}{(\eta_G - 1) \Omega_{max}}} \quad (12)$$

Si on choisit par exemple, un rendement de 95 %, et en prenant $R = 0,02 \, \Omega$ et $f = 0,01 \, \text{N.m.s.rad}^{-1}$ (les autres valeurs sont fixées par le cahier des charges), on obtient, $p \phi_f = 3,51$. Ce dimensionnement assure qu'il y aura effectivement récupération d'énergie lors de la descente de l'ascenseur.

B. Dimensionnement du banc de supercondensateurs

Le dimensionnement a été réalisé à l'aide du programme mis à disposition par le constructeur *maxwell* [2].

Les paramètres suivants ont été choisis :

- tension maximale : $v_{scap_{max}} = 100 \, \text{V}$;
- tension minimale : $v_{scap_{min}} = 50 \, \text{V}$;
- courant moyen : $\langle i_{scap} \rangle \approx 40 \, \text{A}$;
- temps de décharge (charge) : $T_{ch} = 42 \, \text{s}$.

Le résultat proposé par le programme est le suivant :

- nombre de supercondensateurs : $n = 40$ branchés en série ;
- capacité d'un supercondensateur : $2700 \, \text{F}$;
- résistance série d'un supercondensateur : $1 \, \text{m}\Omega$;
- capacité du système : $C = 67,50 \, \text{F}$ ($C = 2700/n$) ;
- résistance du système : $R = 0,04 \, \Omega$ ($n \cdot 1 \, \text{m}\Omega$).

VI. SIMULATION DU SYSTÈME GLOBAL

La simulation du système global (Fig. 7) a été réalisée dans le cas le plus défavorable :

- la charge est maximale : $M_c = 630 \, \text{kg}$;
- la course est maximale : $40 \, \text{m}$;
- l'accélération est maximale : $\gamma_{max} = 0,8 \, \text{m.s}^{-2}$;
- la vitesse est maximale : $v_c = 1 \, \text{m/s}$ ($\Omega_{max} = 10 \, \text{rad/s}$).

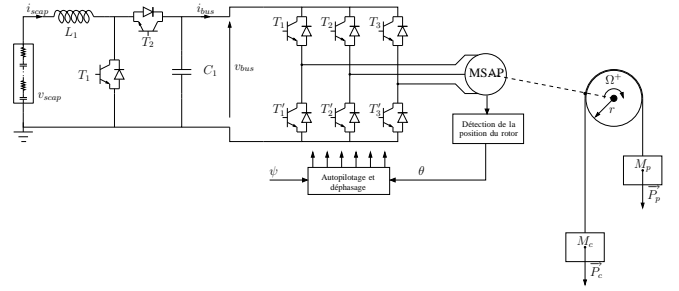


Fig. 7. Schéma du système global

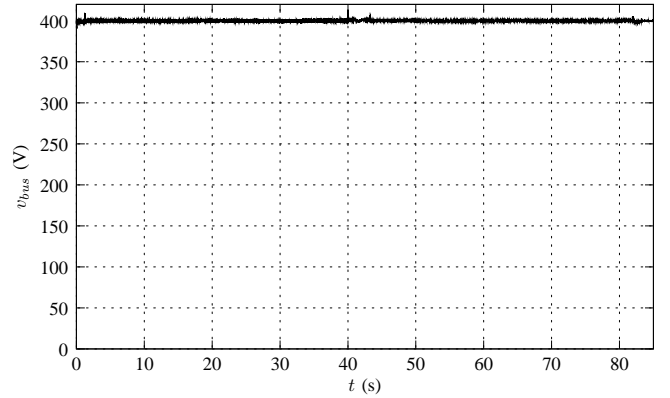


Fig. 8. Tension du bus continu v_{bus}

On constate que la tension du bus (Fig. 8) est constante quelque soit le courant absorbé par la machine et quelque soit la tension du banc de supercondensateurs. Le bloc de régulation du hacheur remplit bien son rôle. Le profil de la

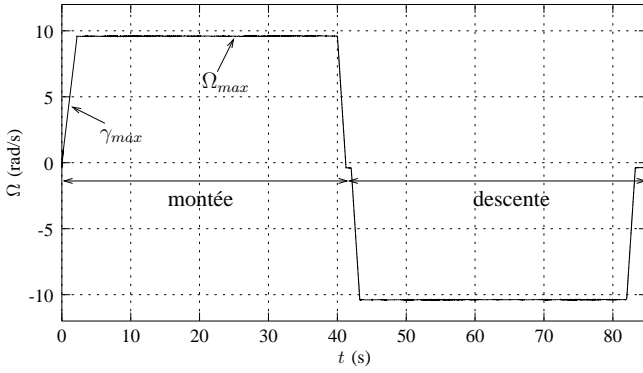


Fig. 9. Profil de la vitesse

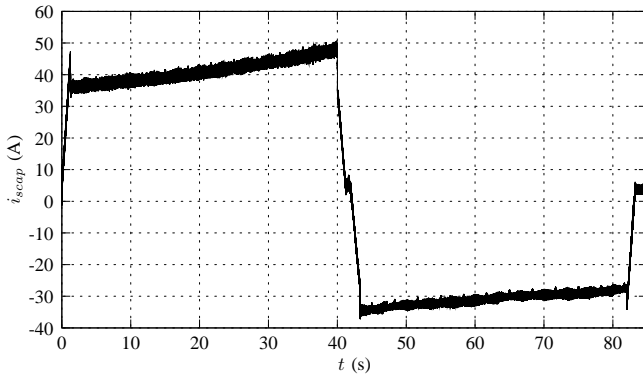


Fig. 10. Courant des supercondensateurs i_{scap}

vitesse, le courant des supercondensateurs et la tension du banc de supercondensateurs sont donnés respectivement par Fig. 9, Fig. 10 et Fig. 11. La tension v_{scap} donnée par Fig. 11 nous permet de calculer l'énergie contenue dans le banc de supercondensateurs ($1/2 C v_{scap}^2$)

Le bilan énergétique du système donne les résultats suivants :

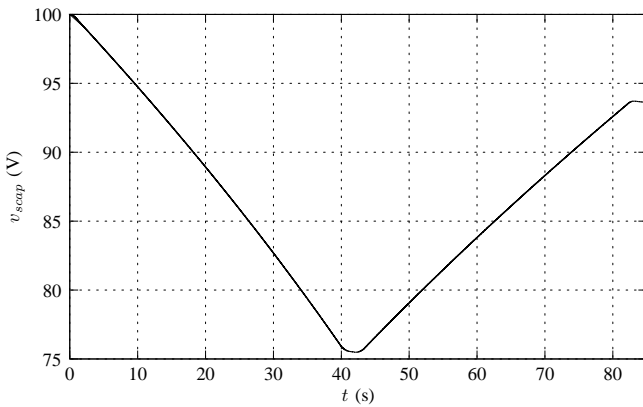


Fig. 11. Tension du banc de supercondensateurs v_{scap}

- Énergie stockée¹ dans le banc de supercondensateurs au départ : $E_{init} = 337,5$ kJ ;
- Énergie restante en fin de montée : $E_H = 189,8$ kJ (l'énergie dépensée est donc égale à 147,7 kJ) ;
- Énergie disponible après la descente : $E_{fin} = 291,9$ kJ (l'énergie restituée est donc égale à 102,1 kJ) ;

L'énergie récupérée dans les supercondensateurs à la fin de la simulation est donc égale à 86,5 % de l'énergie qui était disponible au départ.

L'énergie à fournir pour effectuer un nouvel aller-retour dans les mêmes conditions et en repartant des conditions initiales sera donc de 45,6 kJ contre 147,7 kJ s'il n'y avait pas eu de récupération d'énergie.

Remarque 2 : toutes les pertes n'ont pas été incluses dans le modèle et les valeurs des résistances de la machine ont été fixées arbitrairement (un dimensionnement physique permettrait de les calculer). Le rendement énergétique présenté ici ($\eta = 86,5\%$) n'est donc pas un rendement qui serait obtenu avec un système réel. Cependant, on pourra s'attendre à un rendement réel élevé (machine électrique sans réducteur).

VII. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les premiers résultats d'un système de récupération d'énergie à base d'une machine synchrone à aimants permanents et d'un banc de supercondensateurs. Les résultats de simulation démontrent la faisabilité d'un tel système.

Les prochaines étapes du travail consisteront à dimensionner physiquement la machine synchrone et déterminer les paramètres électriques réels en utilisant la condition sur le rendement (12) présentée dans cet article. La réalisation d'une maquette à échelle réduite est en cours afin de valider les résultats.

LISTE DES SYMBOLES

Lettres grecques

Γ	Couple électromagnétique de la MSAP
γ_{max}	Accélération maximale de l'ascenseur
Γ_r	Couple résistant dû aux masses
η_G	Rendement de la MSAP en fonctionnement génératrice
ϕ_f	Flux créé par l'aimant permanent
Ω	Vitesse de rotation de la MSAP

Lettres romaines

C	Capacité du banc de supercondensateurs
E_{fin}	Énergie disponible à la fin d'un aller-retour de l'ascenseur
E_H	Énergie restante dans le banc de supercondensateurs à la fin de la montée
E_{init}	Énergie maximale stockée dans le banc de supercondensateurs

¹Toute l'énergie stockée dans un supercondensateur n'est pas utilisée à cause des contraintes sur le rendement. C'est pourquoi le banc de supercondensateurs n'a pas été dimensionné pour avoir une tension finale nulle. Pour plus d'explications, on pourra se reporter à [4].

f	Coefficient de frottements mécaniques
g	Accélération terrestre
i_{bus}	Courant du bus continu
i_d	Courant suivant l'axe d
i_q	Courant suivant l'axe q
i_{scap}	Courant du banc de supercondensateurs
$i_{scap_{ref}}$	Courant de référence des supercondensateurs
J	Inertie rotorique de la MSAP
L_d	Inductance suivant l'axe d
L_q	Inductance suivant l'axe q
M_c	Masse de la charge
M_p	Masse du contre-poids
n	Nombre de supercondensateurs dans le banc
r	Rayon de la poulie
R	Résistance d'une phase
s	Variable de Laplace
T_{ch}	Temps de décharge des supercondensateurs
v_{bus}	Tension du bus continu
$v_{bus_{ref}}$	Tension de référence du bus continu
v_c	Vitesse maximale de l'ascenseur
v_d	Tension suivant l'axe d
v_q	Tension suivant l'axe q
v_{scap}	Tension aux bornes des supercondensateurs
$v_{scap_{max}}$	Tension maximale aux bornes du banc de supercondensateurs
$v_{scap_{min}}$	Tension minimale aux bornes du banc de supercondensateurs

REFERENCES

- [1] Otis Elevator compagny. Brochure gen2, 2000. <http://www.otis.com>.
- [2] Maxell Technologies. Maxwell technologies' ultracapacitor model, 2004. <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/>.
- [3] P. BARRADE et A. RUFER. A supercapacitor-based energy-storage system for elevators with soft commutated interface. Publication, Laboratoire d'Électronique Industrielle (LEI), 2002. <http://leiwww.epfl.ch>.
- [4] P. BARRADE et A. RUFER. Current capability and power density of supercapacitors : Considerations on energy efficiency. Publication, Laboratoire d'Électronique Industrielle (LEI), 2003. <http://leiwww.epfl.ch>.
- [5] F. BELHACHEMI. *Mise en œuvre de supercapacités dans les montages de l'électronique de puissance*. Thèse, INPL, GREEN, Nancy, 2001. <http://www.green.u-nancy.fr/>.
- [6] M. ETIQUE. Entraînements réglés, chapitre 3. Cours universitaire, École d'ingénieurs du canton de Vaud (eivd), Institut d'automatisation industrielle (IAI), mars 2003. <http://www.eivd.ch>.
- [7] M. LAJOIE-MAZENC et P. VIAROUGE. Alimentation des machines synchrones. traité génie électrique, Techniques de l'ingénieur.
- [8] J.C. LASSÈGUES. Supercondensateurs. traité génie électrique, Techniques de l'ingénieur.
- [9] J.P. LOUIS et C. BERGMANN. Commande numérique des machines synchrones. traité génie électrique, Techniques de l'ingénieur.
- [10] A. RUFER. Power-electronic interface for a supercapacitor-based energy-storage substation in dc-transportation networks. Publication, Laboratoire d'Électronique Industrielle (LEI), 2003. <http://leiwww.epfl.ch>.