

Architecture électrique et gestion de l'énergie

La solution de mobilité d'Eurotube vise à développer un mode de transport sous vide à très haute vitesse et adapté au contexte Européen. Le principe général de la chaîne de traction se caractérise par un système de propulsion distribué sur une partie de la voie notamment aux abords des stations (voir figure 1). Sur ces zones, la capsule est accélérée jusqu'à la vitesse maximale ou décélérée jusqu'à l'arrêt afin de permettre le chargement et le déchargement des capsules. On notera qu'en dehors de ces zones pour assurer le maintien de la vitesse, la capsule dispose d'une chaîne de traction embarquée alimentée par un Système de Stockage d'Énergie (SSE). Du fait des enjeux énergétiques les travaux de l'HESSO se sont focalisés sur le système de distribution de l'électricité stationnaire indispensable à l'alimentation de la chaîne de traction distribué (voir figure 1). Les spécificités de la chaîne de traction induisent que le système de distribution de l'électricité stationnaire réponde aux cahiers des charges suivants :

- Fournir une connexion fiabilisée au réseau électrique HT en maîtrisant les coûts d'exploitation ;
- Garantir une qualité d'alimentation avec une variation de tension de maximum de $\pm 30\%$ de la tension nominale ;
- Permettre la récupération de l'énergie de freinage pour des raisons d'efficacité énergétique et économique lié à la fourniture d'électricité ;
- Intégrer des sources d'énergies renouvelables pour aider à réduire l'impact carbone notamment de la consommation auxiliaire.

L'architecture de ce système repose donc sur une solution de sous-station hybride (Hybrid Power Substation HPSS) car elle interconnecte plusieurs sources dont certaines sont réversibles. Dans la mesure où cette architecture est également distribuée et donc interconnectée par des lignes électriques subissant des variations de tension, on parle alors de solution d'électrification par mini-réseau ou (mini-grid). Pour ce type d'électrification il apparaît nécessaire d'intégrer un système de stockage d'énergie (SSE) et/ou de contrôle de la charge. Au travers de ces systèmes pilotables, il est possible de contrôler de la fluence des énergies en fonction d'objectifs complémentaires : exploitation du plan de transport, coûts d'investissement et d'exploitation, stabilité électrique, continuité d'alimentation et bien entendu environnementaux.

A titre d'exemple, lorsque la capsule doit être freinée en vue de son arrêt à une station, l'énergie de freinage est récupérée pour l'accélération d'autres trains de capsules circulant en sens inverse. Ainsi, en fonction du cadencement, une partie de l'énergie de freinage peut être stockée (cette phase apparaît généralement aux heures creuses d'exploitation en raison de la réduction du trafic et donc de consommateur). Cette énergie stockée peut alors être utilisée pour limiter les appels de puissance sur le réseau électrique. Au-delà de la limite physique, la puissance crête fait l'objet d'une composante de la facturation par le gestionnaire de réseau de transport ou de distribution (respectivement GRT ou GRD). Ainsi le système de stockage d'énergie est utilisé à la fois pour accroître l'efficacité énergétique que réduire les coûts liés à l'accès au réseau électrique.

Tout l'enjeu du projet est dans un premier temps de déterminer une solution d'électrification répondant aux besoins d'un tel mini-réseau et de dimensionner électriquement les équipements (position, puissance et capacité). Dans un deuxième temps, la finalité est de déterminer le pilotage énergétique permettant de garantir une efficacité énergétique, une réduction des coûts d'exploitation et de garantir le respect du plan de tension.

Méthode de dimensionnement et de pilotage énergétique d'un système d'électrification distribué pour l'alimentation des solutions de transport sous vide partiel :

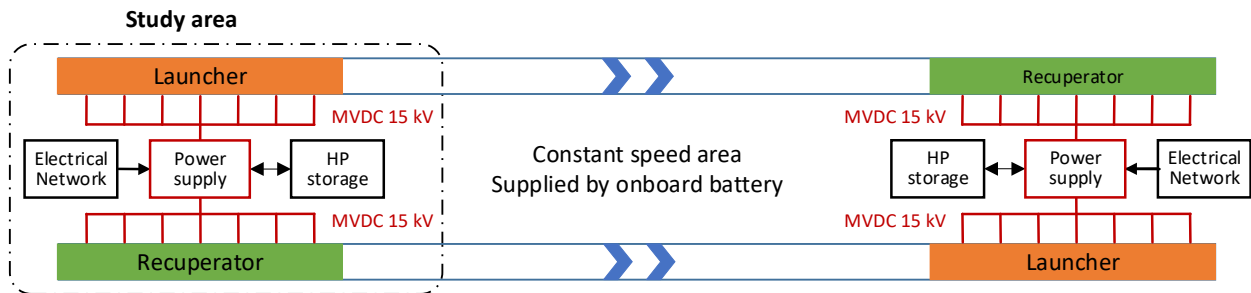


Figure 1. Système Hyperloop avec lanceur en vert et récupérateur en orange

Dans le cadre spécifique de l'alimentation électrique d'Eurotube, le déplacement des capsules entraîne une charge variable en fonction de la puissance et de la position sur la ligne. La distribution de l'énergie au système de propulsion est donc répartie sur toute la longueur de la zone de lancement et de récupération. Comme pour les réseaux électriques chacun des moteurs linéaires doit être alimenté dans une plage de tension acceptable. Pour satisfaire ce critère, le dimensionnement de la ligne repose sur le type de tension AC ou DC, le niveau de tension et finalement la section. Dans le cadre deux pistes ont été étudiées : la première conventionnelle basée sur une distribution AC 25kV et la seconde innovante en MVDC 15kV. Pour réduire les pertes et donc les chutes de tension, la position optimale de connexion du départ de ce réseau de distribution correspond à 0,65 L avec L la distance de lancement. Dans le cadre de la solution MVDC la position est similaire en raison des appels de puissance de la charge qui sont particulièrement important lorsque la capsule arrive à sa vitesse commerciale. Par rapport à la solution AC 25 kV, la solution de réseau MVDC 15 kV nécessite moins de convertisseurs d'électroniques de puissance. Effectivement les onduleurs de traction répartie sur la ligne nécessitent une tension DC en entrée. Ainsi la distribution en AC 25kV doit être redressée en amont de chacun des onduleurs. Dans cette comparaison, il convient également de prendre en compte le système de protection, la tenue des isolants tant au niveau des convertisseurs de puissance que des câbles de distribution ainsi que les verrous technologiques à lever. Pour ces raisons, le choix d'une électrification en MVDC 15kV est plus adaptée au besoin du système Hyperloop.

Du point de vue du raccordement au réseau électrique, il est nécessaire d'étudier la puissance totale soutirée (phase d'accélération) ou injectée (phase de freinage) par la sous-station (voir figure 3). En fonction du débit, le pic de charge des capsules peut être supérieur à la puissance de raccordement soutirée au réseau électrique. De plus le raccordement fait l'objet d'un contrat pour lequel une taxe à la puissance est facturée par le GRT. Dans cette étude, un Système de Stockage d'Énergie est introduit dans la mini-réseau. L'objectif peut être multiples : permettre la récupération d'énergie de freinage, stabiliser la tension du mini-réseau, et écrêter les appels de puissances (fonction peak shaving). Le système de gestion de l'énergie (EMS) de cet ESS est basé sur «droop control » (voir figure 2) qui repose sur les règles suivantes :

- Lorsque la puissance totale mesurée de la sous-station est inférieure à la limite définie, le SSE fonctionne comme une charge et se recharge ;
- Lorsque la puissance mesurée au niveau du soutirage du réseau électrique est proche de la limitation de puissance définie pour réduire les coûts, la puissance de décharge sera rapidement augmentée jusqu'à sa puissance maximale ;
- Pour maximiser la durée de vie de la batterie, l'énergie de charge et l'énergie de décharge sont régulées pour avoir la même valeur à chaque période. A savoir, l'énergie nette dans la batterie à chaque période sera régulée pour être nulle.

Du point de vue technologique du SE, les caractéristiques en puissance conduisent à s'orienter sur les supercondensateurs. Le dimensionnement a conduit à retenir un module de SSE d'une

puissance de 2,6 MW et d'une capacité énergétique de 75 kWh. Comme le montre la figure 3, en intégrant deux modules de SSE (5,2 MW), la puissance maximale de la sous-station (P_{SST}) est efficacement réduite par rapport au cas sans HPS.

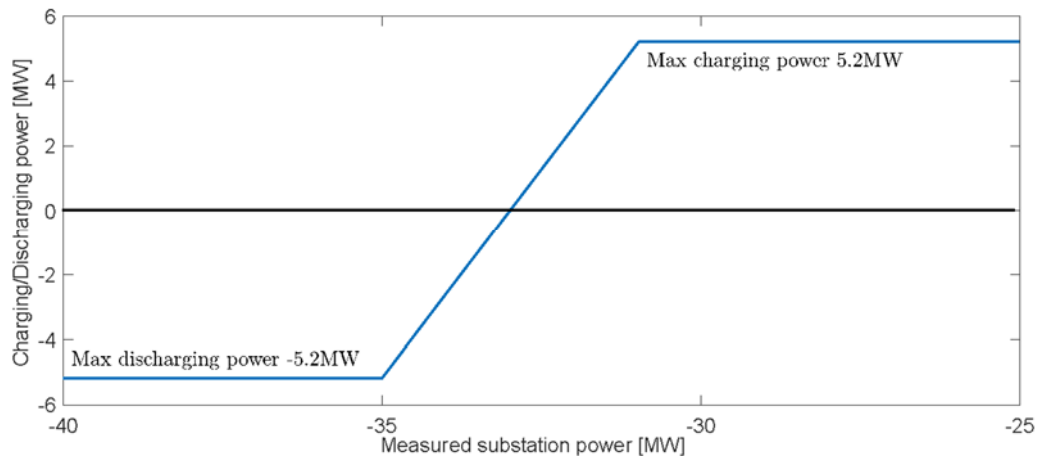


Figure 20 Règle de droop control

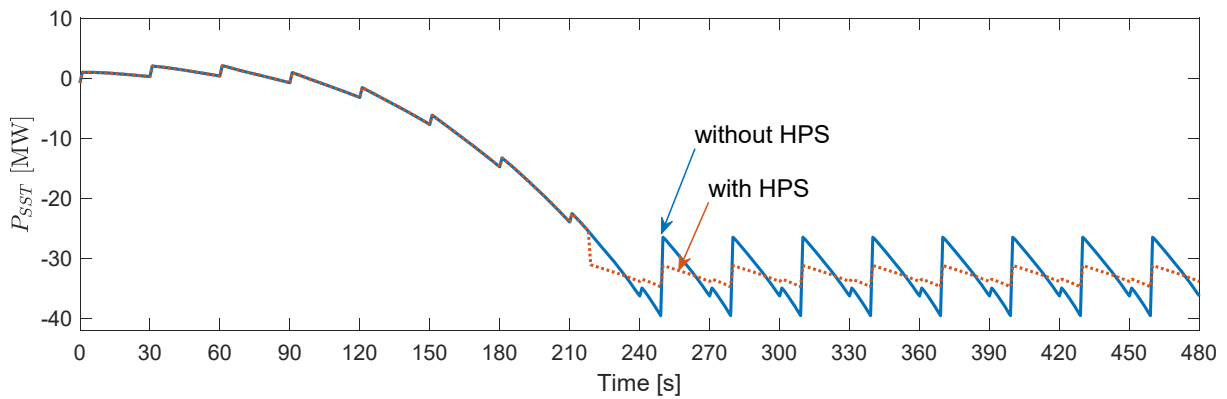


Figure 3. Puissance totale fournie par la sous-station

Une analyse économique a également été développée dans ce projet. Les résultats montrent que le cycle de vie du SSE peut atteindre environ 10 ans dans cette application et que les bénéfices annuels moyens peuvent atteindre 111.5 kCHF. En considérant une évolution à la hausse du prix de l'électricité la rentabilité est amenée à s'améliorer.