

Le Frein Electronique à Récupération d'Energie

par Jean-Marc HOTTON (cav 156)

Remarques préalables :

Avec l'arrivée massive des nouveaux régulateurs de traction disponibles de plus en plus facilement dans le commerce, et ce à des prix très démocratiques, l'occasion était rêvée pour en examiner plus en détail un des éléments essentiels : « le freinage en récupération ».

Cette fonction est en effet bien souvent implantée par défaut et son fonctionnement est régulièrement passé sous silence alors qu'il est un atout précieux de ce type de régulateur. Pour mémoire, au sein du PTVF nous utilisons énormément les régulateurs de la firme **4QD** en Angleterre. C'est ce type de régulateur qui équipe mon locotracteur «Albert/43», type Socofer à l'échelle du 1/3 en 7 ¼.

Dans la réalité, en traction électrique, il y a deux possibilités pour utiliser le « frein moteur » :

- Le frein rhéostatique (dynamique) où l'énergie produite par les moteurs électriques est dissipée dans des résistances, bien souvent dans le rhéostat même de démarrage. En Belgique, ce système est mis en œuvre par exemple sur l'ancienne série 18 (Paris-Bruxelles) et sur la série 20. Il peut aussi être mis en œuvre sur des engins diesel équipés spécialement d'un groupe de résistances. En Belgique, nous avons les séries diesel 52, 53 et 55 équipées de ce système.
- Le frein en récupération où l'énergie produite est renvoyée à la caténaire. Pour être efficace, ce système demande à ce qu'un autre train monte la rampe contraire au même moment, pour absorber l'énergie produite. En Belgique, nous avons la série 23 équipée de ce système.



Jean-Marc HOTTON aux commandes d'ALBERT/43. La type 18 SNCB au freinage rhéostatique efficace (à vitesses élevées).

Préambules :

Ce système de freinage électronique permet d'émuler un frein mécanique de bonne qualité, tout en assurant la récupération de l'énergie cinétique convertie lors du freinage, le mouvement étant transformé en électricité par le moteur.

Ce système est applicable sur des moteurs ne permettant pas normalement la récupération. L'électronique de contrôle assure la transparence du système vis-à-vis de l'utilisateur, ce qui permet une conduite instinctive sans aucun apprentissage particulier. Au contraire, la progressivité ainsi que la disponibilité instantanée permettront aux novices d'opérer avec la souplesse et la sûreté de conducteurs chevronnés.

Principes :

Au cœur du système se trouve un convertisseur DC-DC élévateur de tension dont la fonction est de restituer à la batterie l'énergie récupérée du moteur travaillant en génératrice. Ce convertisseur est bien entendu contrôlé par un calculateur permettant de prendre en compte de nombreux paramètres différents et non déterminables à l'avance mais qui entrent en jeu au moment de la mise en œuvre du frein électronique et dans les conditions variables de circulation.

En effet, il s'agit de suivre au plus près la consigne de fonctionnement, tout en intégrant des données sur lesquelles aucun contrôle n'est possible : vitesse instantanée, mais aussi constante de tension et self-inductance du moteur. Il faut aussi tenir compte du courant maximal tolérable.

L'asservissement va donc régler en temps réel le rapport de transformation du convertisseur, de façon à imposer au moteur un couple de freinage déterminé par la position du potentiomètre de commande. Il va pour ce faire tenir compte des caractéristiques propres au moteur et ce de manière automatique. Cela signifie en clair qu'il n'y a aucun réglage à faire, ce qui est heureux car certains réglages seraient difficiles à réaliser au niveau des amateurs que nous sommes tous.

Le seul réglage à réaliser est celui du courant maximal. Ce réglage ne peut être modifié au gré de l'utilisateur, il dépend des caractéristiques du moteur et du régulateur.

En réalité, les choses se présentent un peu différemment car le courant de pointe de freinage ne sera présent que pendant un court moment de la période de freinage, qui elle-même ne présente qu'une faible partie du temps de fonctionnement total. Le rapport cyclique effectif est donc très faible.

D'autre part, étant donné que la tension lors du freinage sera sensiblement plus faible que lors du fonctionnement en traction, un « coup de feu » n'est pas à craindre au niveau du collecteur. Il n'y a donc lieu que de surveiller l'échauffement par effet joule des conducteurs du moteur, cet effet étant fortement atténué pour les raisons exposées plus haut.

Qu'elles sont les retombées pratiques de tout cela ?

En fait, le courant de pointe lors du freinage pourra en toute sécurité atteindre deux à trois fois le courant nominal du moteur, et le couple de freinage pourra donc excéder le triple du couple moteur (en cas de freinage les frottements se rajoutent, alors qu'ils se soustraient en traction). La plupart du temps, il ne sera pas possible d'exploiter la totalité de ce couple en raison de difficultés d'adhérence (poids de l'engin) et le réglage du courant maximal servira essentiellement à éviter tout risque de blocage des roues motrices dans toute la gamme des conditions d'utilisation.

Spécificités du frein :

Ce frein se démarque des dispositifs classiques sous plusieurs rapports :

Comparé à un frein rhéostatique, en dehors de l'aspect récupération, ce système se distingue par le fait qu'il possède une gamme utilisable beaucoup plus importante. Le frein rhéostatique voit son efficacité croître avec la vitesse, ce qui le rapproche plutôt d'un limiteur de vitesse ou d'un ralentisseur. Pour l'utiliser en tant que frein à part entière, il faut réduire les résistances tout au long de la période de freinage afin de conserver une efficacité à peu près constante. Cette contrainte disparaît dans le cas du frein électronique, et de plus le courant maximal est limité automatiquement, ce qui évite les fausses manœuvres pouvant entraîner le risque d'un blocage des roues ou un échauffement excessif du moteur.

Comparé à un frein classique à récupération, il faut d'abord remarquer qu'il est superflu de surexciter le moteur, ce qui permet l'emploi de moteurs non spécifiquement prévus pour ce genre d'applications. Citons en particulier les moteurs à aimant permanent dont l'emploi se répand de plus en plus, même pour de fortes puissances. D'autre part, la surexcitation n'est utilisable que jusqu'à un certain point, au-delà duquel plus aucune récupération ni freinage ne sont possibles. La saturation des pièces polaires et le courant maximal des bobinages imposent une vitesse minimale sous laquelle il est impossible de freiner. Il est toujours possible bien sûr d'orienter la conception du moteur de traction vers l'optimisation des caractéristiques en récupération, mais cette optimisation se fera forcément au détriment du fonctionnement en moteur et sera donc fort désavantageuse pour l'utilisation normale. De plus, il va se poser le même problème que pour le freinage rhéostatique classique, mais de façon encore plus aiguë. Le freinage va dépendre très fortement de la vitesse, au point qu'il suffira d'une faible variation pour passer du freinage maximal à l'absence de freinage. En pratique, il faudra disposer d'un moyen de contrôle pour maîtriser la puissance de freinage ou alors se résoudre à perdre une certaine part de l'énergie dans des résistances ballast. Cette solution ne peut donc servir que de façon très accessoire en raison de ses applications limitées, au contraire du freinage électronique dont l'ambition est d'être le système de freinage principal utilisable dans tous les cas, à l'exception des freinages d'urgence et de l'immobilisation en gare.

Notons que si les automatismes inclus dans le frein électronique sont pleinement utilisés, les autres systèmes de freinage (mécaniques, pneumatiques) seront contrôlés par une commande unique, ce qui permet à l'utilisateur de se concentrer sur la conduite plutôt que sur le choix du frein le plus approprié. C'est le cas sur le plus récent projet du PTVF : la GP38, à l'initiative de Jacques Fécherolle et de Georges Smars, ici présent aux commandes d'un de ces engins.



Aspects particuliers de la récupération :

Il faut d'abord mettre en perspective l'**aspect récupération**. En effet si le dispositif a été baptisé « **frein électronique à récupération d'énergie** » et non « dispositif de récupération par freinage », il y a plusieurs bonnes raisons à cela. La première est que tout système a été conçu au départ comme un frein, aussi efficace, performant et facile à utiliser que possible. La récupération d'énergie n'est jamais qu'un sous-produit, certes précieux, du freinage. Elle ne constitue donc pas la première priorité et comme tout est question de compromis, elle est forcément soumise à de nombreux aléas.

Il ne faut donc pas s'attendre à des améliorations miraculeuses résultant de raisonnements simplistes du type :
" Puisque environ 50 % de la puissance utilisée ne sert qu'à accélérer le convoi jusqu'à la vitesse commerciale, on doit pouvoir doubler l'autonomie rien qu'en récupérant la puissance du freinage "...

Il faut déjà tenir compte des frottements mécaniques qui vont prélever un lourd tribut à tous les stades du parcours, aussi bien pendant l'accélération que durant la phase de palier et de freinage. Ajoutons à cela le rendement bien moins qu'unitaire du moteur en tant que moteur et surtout en tant que générateur, car l'optimisation de la machine ne peut être réalisée que pour l'un des deux modes de fonctionnement.

Enfin, le mode de fonctionnement donnant **la priorité au freinage** va encore imposer des pertes supplémentaires à deux niveaux : on va obliger le générateur (moteur) à travailler dans des conditions très défavorables, car pour obtenir le couple de freinage imposé, on devra souvent travailler à un courant supérieur à celui donnant le meilleur rendement. En effet, on peut en première approximation considérer que celui-ci sera obtenu quand l'équilibre sera réalisé entre les pertes à vide (frottements, pertes fer, etc.) et les pertes dues à la charge (frottements supplémentaires de la transmission, pertes cuivre, etc.).

Lorsque l'on travaille à un régime inférieur au régime nominal, il faudrait également réduire le courant débité, afin de garder un rendement optimal (quoique réduit par rapport au rendement nominal), ce ne sera généralement pas le cas et l'on va ainsi se trouver pénalisé.

De plus, le convertisseur de tension devra solliciter le moteur d'autant plus que le rapport entre la tension de batterie et la force contre-électromotrice du moteur sera important, ce qui va augmenter les pertes de conversion.

Enfin, le rendement de charge de la batterie n'est pas idéal lui non plus et il ne faut donc pas s'attendre à récupérer chaque ampère-heure investi.

En bref, cela signifie que le rendement va très vite s'effondrer parallèlement à la vitesse, et cet effet sera d'autant plus marqué que le freinage demandé sera intense.

Dans ces conditions, on peut alors se demander **quel est l'intérêt d'un tel dispositif ?**

En fait, il est quand même intéressant pour au moins **trois raisons** :

- Le rendement quoique modeste, n'est pas du tout à négliger : on peut en effet tabler sur une valeur moyenne de 5 % (rapport entre l'énergie récupérée pour l'énergie investie dans la traction) dans des conditions d'exploitation typiques. Ce qui permettrait par exemple de gagner environ une demi-heure sur une journée normale d'utilisation au PTVF (4h), ce qui est déjà pas mal. Notons par ailleurs que si le rendement tombe trop bas que pour assurer la moindre récupération, le système passe dans un autre mode de fonctionnement qui est la pseudo-immobilisation, dans laquelle le moteur est court-circuité (avec toutefois une soigneuse limitation du courant).
- Le fait d'inverser périodiquement le sens de fonctionnement de la batterie (alternance charge/décharge) est favorable à son rendement, car il permet d'éviter une polarisation trop poussée des éléments. L'on peut de la sorte récupérer une part plus importante de l'énergie électrique stockée lors de la charge initiale. La durée de vie de la batterie sera également augmentée, particulièrement dans le cas où elle n'est pas prévue pour des cycles charge complète/décharge complète (par exemple batterie de démarrage pour véhicule à moteur thermique ou batterie de semi-traction).
- Ce type de freinage ne consomme ni électricité, ni air comprimé, ni huile de coude, ni garnitures quelconques; il est plus facile à utiliser et à moduler. Cela suffirait déjà à le rendre intéressant. Si l'on tient compte en plus des avantages procurés par cette nouvelle technique, sa supériorité sur les systèmes classiques apparaît très nettement.

Cas pratique au PTVF :

Sur le réseau du PTVF, le plus bel endroit où l'on peut mettre en œuvre le frein électronique se situe sur la descente de la ligne 10 après le passage à niveau qui jouxte le local du club. Imaginez-vous aux commandes du locotracteur «Albert/43» : après franchissement du PN et du croisement du second quai de déchargement, vous devez activer très progressivement le frein électronique de manière à retenir le convoi et à pouvoir soit s'arrêter au signal fermé en bas de la descente, soit franchir les aiguillages du complexe de la bretelle double numéro 1 à la vitesse autorisée de 4 km/h.

Avec un peu de doigté et d'habitude, il est possible d'obtenir ce résultat en une seule manœuvre de la commande.



CHAMPIONNES du FREINAGE par RECUPÉRATION

Autre époque, autres techniques. Sorties d'usines entre 1954 et 1958, les locomotives CC14000 et CC14100 de la SNCF remorquèrent sur la transversale Est (Dunkerque-Thionville) les trains les plus lourds du monde sous la caténaire la plus légère du monde (slogan de l'époque!). Au moment où le thyristor n'était encore qu'une curiosité, elles éblouirent le monde ferroviaire par leurs possibilités de traction. Elles remorquèrent sur ce parcours au profil très tourmenté, durant plus de 45 ans, des trains de marchandises de 1850 tonnes et plus suivant la section de ligne. Ces "usines roulantes", limitées à 60 km/h, auraient arraché la gare ! De Dunkerque à Lumes notamment, la fierté des mécaniciens était d'assurer la conduite de leur train sans donner un coup de frein !!! Utilisation en priorité du freinage par récupération. Mais il fallait travailler avec beaucoup d'anticipation.