

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 25.05.07.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 28.11.08 Bulletin 08/48.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

71 Demandeur(s) : ALSTOM TRANSPORT SA Société
anonyme — FR.

72 Inventeur(s) : ALACOQUE JEAN CLAUDE DOMINI-
QUE.

73 Titulaire(s) :

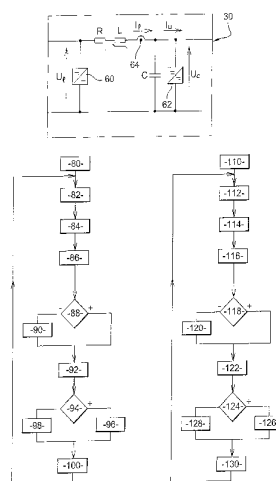
74 Mandataire(s) : CABINET LAVOIX.

54 PROCÉDE DE REGULATION D'UNE TENSION OU D'UN COURANT D'UN FILTRE RLC, SUPPORT
D'ENREGISTREMENT ET VEHICULES POUR CE PROCÉDE.

57 Ce procédé de régulation à réponse pile d'une tension
 U_c ou d'un courant I_l de sortie d'un filtre RLC passe-bas
comporte :

- le calcul (92) d'une consigne de courant I_{uc} pour l'inten-
sité moyenne I_u d'un courant continu I_u traversant un pre-
mier point de sortie du filtre entre des instants t_i et t_{i+1} , cette
consigne I_{uc} étant établie à partir des équations d'états dis-
crétisées du filtre de manière à ce que la tension U_c ou le
courant de ligne I_l soit égal à une consigne prédéterminée
de tension U_{cc} ou de courant de ligne I_{lc} à l'instant t_{i+1} ,

- la commande (100) d'un convertisseur électrique pour
produire un courant I_u traversant le filtre dont l'intensité
moyenne I_u entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne
de courant I_{uc} .



PROCEDE DE REGULATION D'UNE TENSION OU D'UN COURANT D'UN FILTRE RLC, SUPPORT D'ENREGISTREMENT ET VEHICULES POUR CE PROCEDE

5 La présente invention concerne un procédé de régulation d'une tension ou d'un courant d'un filtre RLC, un support d'enregistrement et des véhicules pour ce procédé.

Plus précisément, le déposant connaît des procédés de régulation d'une tension U_c entre un premier et un second points de sortie d'un filtre RLC passe-bas de période propre T_f , ce filtre RLC comportant deux points d'entrée électriquement
10 raccordés, respectivement, aux conducteurs d'un bus DC d'un véhicule électrique alimenté par l'intermédiaire d'une caténaire, le premier et le second points de sortie étant électriquement raccordés à un convertisseur électrique commandable permettant de commander le couple exercé par un moteur électrique de traction du véhicule électrique, la constante de temps statorique τ de ce moteur étant strictement inférieure
15 à la période propre T_f .

Ces procédés de régulation comportent la mesure ou l'estimation de l'intensité I_{li} d'un courant de ligne I_l traversant l'inductance du filtre à un instant t_i , de la tension U_{ci} entre les points de sortie du filtre à l'instant t_i , et d'une tension de ligne U_l entre les points d'entrée du filtre.

20 Le déposant connaît également des procédés de régulation d'un courant de ligne I_l traversant une inductance L d'un filtre RLC passe-bas de période propre T_f , ce filtre comportant :

- deux points d'entrée électriquement raccordés respectivement aux conducteurs d'un bus DC d'un véhicule électrique alimenté par une caténaire, et

- des premier et second points de sortie, le premier et le second points de
25 sortie étant électriquement raccordés à un convertisseur électrique commandable pour faire varier le couple d'un moteur électrique de traction du véhicule électrique, la constante de temps statorique τ de ce moteur électrique étant strictement inférieure à la période propre T_f .

30 Ces procédés comportent la mesure ou l'estimation de l'intensité I_{li} du courant de ligne I_l à un instant t_i , d'une tension U_{ci} entre les points de sortie du filtre à l'instant t_i et d'une tension de ligne U_l entre les points d'entrée du filtre.

Ici, par le terme « caténaire », on désigne aussi bien une ligne aérienne sur laquelle frotte un pantographe pour alimenter le véhicule électrique qu'un rail posé au sol sur lequel frotte un frotteur pour alimenter un véhicule électrique. Ce rail posé au sol est plus connu sous le terme de « troisième rail ».

5 La constante de temps statorique τ d'un moteur électrique est définie par la relation suivante :

$$\tau = \frac{L_m}{R_m}$$

où :

- L_m est l'inductance statorique du moteur électrique, et
- 10 - R_m est la résistance statorique du moteur électrique.

Cette constante de temps est typiquement comprise entre 4 ms et 200 ms pour les moteurs électriques de traction d'un véhicule électrique.

On définit la période propre T_f du filtre RLC par la formule suivante :

$$T_f = 2\pi\sqrt{LC}$$

15 Cette période propre T_f doit être strictement supérieure à la constante de temps τ du moteur, sinon le filtre RLC ne peut pas remplir sa fonction de filtre passe-bas par rapport à des variations rapides du courant consommé ou produit par le moteur. Le filtre RLC a aussi pour but de diminuer l'impédance de source, ou l'impédance de charge, vue par le convertisseur.

20 On définit ici, le temps de mise en vitesse du moteur électrique comme étant le temps nécessaire pour faire varier sa vitesse d'une fraction significative, par exemple 1/1000, de sa vitesse maximum avec son couple maximum.

Dans les procédés connus, la régulation fait intervenir une boucle de rétroaction pour établir la différence entre une consigne de tension U_{cc} entre les points
25 de sortie du filtre ou une consigne de courant de ligne I_{lc} et une valeur mesurée. Ces procédés fonctionnent correctement mais ne permettent pas de réagir assez rapidement à de brusques variations de la tension de ligne U_l ou du couple résistant du moteur. Par exemple, ces brusques variations de la tension de ligne U_l ou du couple résistant peuvent se produire :

- 30 - en cas de décollement du pantographe de la caténaire, c'est-à-dire lorsque le pantographe perd le contact mécanique et électrique avec la caténaire,

- en cas de recollement du pantographe à la caténaire, c'est-à-dire lorsque le pantographe rétablit le contact mécanique et électrique avec la caténaire, ou
- en cas de perte de l'adhérence entre les roues motrices du véhicule électrique et le support de roulement.

5 L'invention vise à remédier à ces problèmes en proposant un procédé plus rapide de régulation de la tension U_c ou du courant de ligne I_l .

Elle a donc pour objet un procédé de régulation à réponse pile de la tension U_c dans lequel, le procédé comporte :

- le calcul d'une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un
10 courant continu I_u traversant le premier point de sortie du filtre entre l'instant t_i et un instant t_{i+1} , cette consigne $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du filtre de manière à ce que la tension U_c soit égale à une consigne de tension prédéterminée U_{cc} à l'instant t_{i+1} , ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les intensités I_{li} , I_{li+1} du courant I_l de ligne respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , les
15 tensions U_{ci} et U_{ci+1} entre les points de sortie du filtre respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , la tension moyenne de ligne $\bar{U}_l$ entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$,
- la commande du convertisseur électrique pour produire un courant I_u traversant le point de sortie du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les instants t_i et
20 t_{i+1} étant strictement inférieur à 5τ .

L'invention a également pour objet un procédé de régulation à réponse pile de l'intensité du courant de ligne I_l dans lequel le procédé comporte :

- le calcul d'une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un
25 courant continu I_u traversant le premier point de sortie du filtre entre l'instant t_i et un instant t_{i+1} , cette consigne $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du filtre de manière à ce que la tension U_c soit égale à une consigne de tension prédéterminée U_{cc} à l'instant t_{i+1} , ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les intensités I_{li} , I_{li+1} du courant I_l de ligne respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , les tensions U_{ci} et U_{ci+1} entre les points de sortie du filtre respectivement aux instants t_i et
30 t_{i+1} , la tension moyenne de ligne $\bar{U}_l$ entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$,
- la commande du convertisseur électrique pour produire un courant I_u traversant le point de sortie du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et

t_{i+1} est égale à la consigne $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les instants t_i et t_{i+1} étant strictement inférieur à 5τ .

Les procédés de régulation à réponse pile sont plus connus sous le terme anglais de « Deadbeat Control ». Ces procédés permettent d'atteindre, dès le prochain instant de régulation t_{i+1} , la consigne. A cet effet, ces procédés ne mettent pas en œuvre de boucle de rétroaction.

Plus précisément, dans les procédés de régulation à réponse pile ci-dessus, la consigne d'intensité moyenne $\bar{I}_{uc}$ est déterminée à partir des équations d'états discrétisées du filtre RLC sans utiliser de boucle de rétroaction. Ces procédés permettent donc de garantir que la tension U_c ou le courant de ligne I_l a atteint sa consigne exactement à la fin de l'intervalle T . De plus, puisque l'intervalle T est ici choisi petit, c'est-à-dire inférieur à cinq fois la constante de temps τ du moteur, ces procédés réagissent beaucoup plus rapidement que des procédés de régulation implémentant une boucle de rétroaction. Dans ces conditions, les surtensions de la tension de ligne U_l ou les surintensités du courant de ligne I_l sont limitées beaucoup plus efficacement en particulier en cas de décollement ou recollement du pantographe, ou en cas de perte d'adhérence.

On remarquera également que les ajustements de l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ se font à des intervalles T inférieurs à 5τ . Les intervalles T sont donc très inférieurs au temps de mise en vitesse du moteur électrique du fait de l'inertie du véhicule électrique ramenée à l'arbre du moteur et à l'inertie du rotor du moteur électrique lui-même, de sorte qu'ils ne sont pas ressentis par le conducteur ou les passagers de ce véhicule. Ils ne perturbent donc pas non plus le procédé de commande du couple du moteur électrique.

Les modes de réalisation du procédé de régulation de la tension U_c peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- la consigne de tension U_{cc} est choisie systématiquement inférieure ou égale à une limite de tension U_{cmax} , la limite de tension U_{cmax} correspondant à la tension maximale admissible à l'entrée du convertisseur électrique ou entre les points de sortie du filtre ;

- la construction d'une estimation I_p du courant de ligne I_l qui sera atteinte si la tension U_c est égale à la consigne de tension U_{cc} à l'instant t_{i+1} ,

- la comparaison de l'estimation I_{lp} à au moins une limite prédéterminée de courant de ligne I_{lm} ,

- uniquement si la limite prédéterminée de courant de ligne I_{lm} est franchie, la modification de la consigne de tension U_{cc} de manière à obtenir une consigne de tension temporaire U_{ccm} qui correspond à une estimation de courant de ligne I_{lp} qui ne franchit pas la limite prédéterminée de courant de ligne I_{lm} , et l'utilisation de la consigne de tension temporaire U_{ccm} en lieu et place de la consigne de tension U_{cc} lors du calcul de la consigne de courant moyen $\bar{I}_{uc}$ uniquement pour l'intervalle T en cours, et

- si la limite prédéterminée I_{lm} n'est pas franchie, l'utilisation de la consigne de tension U_{cc} pour le calcul de la consigne de courant moyen $\bar{I}_{uc}$ pour l'intervalle T en cours ;

▪ la consigne $\bar{I}_{uc}$ est une solution du système d'équations suivant :

$$I_{lp} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{cc} = e^{\mu_1 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_1 \cdot \left(\mu_2 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_1 \right)$$

$$I_{lp} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{cc} = e^{\mu_2 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_2 \cdot \left(\mu_1 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_1 \right)$$

où :

- R et L sont les valeurs, respectivement, de la résistance et de l'inductance du filtre RLC raccordées en série entre les premiers points d'entrée et de sortie,

- C est la capacité du condensateur raccordé entre les premier et second points de sortie,

- μ_1 et μ_2 sont les valeurs propres d'une matrice d'évolution définies par la relation suivante :

$$\mu_1 = \frac{-R \cdot C + \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

$$\mu_2 = \frac{-R \cdot C - \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

- a_1 et a_2 sont les valeurs définies par les relations suivantes :

$$a_1 = \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1}$$

$$a_2 = \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2}$$

- la consigne de tension U_{cc} est construite à partir de la tension de ligne U_l de manière à ce que son spectre de puissance ne présente aucun harmonique au-delà de la fréquence $0,9/T_f$.

Les modes de réalisation du procédé de régulation de la tension U_c présentent en outre les avantages suivants :

- maintenir la tension U_c inférieure à la limite U_{cmax} permet d'éviter des déclenchements intempestifs d'un dispositif de sécurité tel qu'un hacheur rhéostatique permettant d'écarter toute surtension sur le bus DC,

- l'utilisation de la consigne temporaire de tension U_{cm} permet de maintenir l'intensité du courant de ligne I_l dans une plage acceptable tout en limitant les variations de la tension U_c , et

- choisir une consigne de tension U_{cc} de manière à ce que son spectre de puissance ne présente aucun harmonique au-delà de la fréquence $0,9/T_f$ permet à la fois d'éviter des oscillations du courant de ligne I_l et de la tension du condensateur U_c au voisinage de la fréquence propre du filtre et aussi de minimiser ainsi l'énergie de commande.

Les modes de réalisation du procédé de régulation de l'intensité du courant de ligne I_l peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

▪ la consigne de courant de ligne I_{lc} est choisie systématiquement inférieure ou égale à une limite I_{lmax} , la limite I_{lmax} correspondant à l'intensité du courant de ligne I_l à partir de laquelle un disjoncteur d'une sous-station d'alimentation de la caténaire ou un disjoncteur du véhicule est déclenché ;

▪ la consigne de courant de ligne I_{lc} est choisie systématiquement supérieure ou égale à une limite I_{lmin} , la limite I_{lmin} correspondant à l'intensité du courant de ligne en deçà de laquelle l'inductance L du filtre est désaturée ;

▪ la construction d'une estimation U_{cp} de la tension U_c qui sera atteinte entre les points de sortie à l'instant t_{i+1} si l'intensité du courant de ligne I_l est égale à la consigne I_{lc} à l'instant t_{i+1} ,

- la comparaison de l'estimation de tension U_{cp} à au moins une limite prédéterminée de tension U_{cm} ,

- uniquement si la limite prédéterminée de tension U_{cm} est franchie, la modification de la consigne de courant de ligne I_{lc} de manière à obtenir une consigne temporaire de courant de ligne I_{lcm} qui corresponde à une estimation U_{cp} qui ne franchit

pas la limite prédéterminée U_{cm} , et l'utilisation de la consigne temporaire de courant de ligne I_{lcm} en lieu et place de la consigne de courant de ligne I_{lc} lors de la commande du convertisseur uniquement pendant l'intervalle T en cours, et

- si la limite prédéterminée de tension U_{cm} n'est pas franchie, l'utilisation de la consigne de courant de ligne I_{lc} lors du calcul de la consigne de courant moyen $\bar{I}_{uc}$ pour l'intervalle T en cours ;

▪ la consigne de courant moyen $\bar{I}_{uc}$ est une solution du système d'équations suivant :

$$I_{lc} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{cp} = e^{\mu_1 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_1 \cdot \left(\mu_2 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_1 \right)$$

$$I_{lc} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{cp} = e^{\mu_2 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_2 \cdot \left(\mu_1 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_1 \right)$$

où :

- R et L sont les valeurs, respectivement, de la résistance et de l'inductance du filtre RLC raccordées en série entre les premiers points d'entrée et de sortie,

- C est la capacité du condensateur raccordé entre les premier et second points de sortie,

- μ_1 et μ_2 sont les valeurs propres d'une matrice d'évolution définies par la relation suivante :

$$\mu_1 = \frac{-R \cdot C + \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

$$\mu_2 = \frac{-R \cdot C - \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

- a_1 et a_2 sont les valeurs définies par les relations suivantes :

$$a_1 = \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1}$$

$$a_2 = \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2}$$

▪ une première phase de régulation de la seule tension U_c entre les premier et second points de sortie du filtre,

- une seconde phase de régulation du seul courant de ligne I_l ,

- le passage de la première phase vers la seconde phase dès que le courant de ligne I_l franchit une limite I_{lm} et le passage de la seconde phase vers la

première phase dès que le courant de ligne I_l franchit la même ou une autre limite en sens inverse.

Les modes de réalisation du procédé de régulation du courant de ligne I_l présentent en outre les avantages suivants :

- 5 - choisir la consigne de courant de ligne I_{lc} inférieure à la limite I_{lmax} permet d'éviter systématiquement des déclenchements intempestifs du disjoncteur d'une sous-station, ou du disjoncteur de protection des équipements du véhicule lui-même,
- choisir la consigne de courant de ligne I_{lc} systématiquement supérieure à la limite I_{lmin} permet de conserver systématiquement l'inductance L saturée et donc de
10 rester dans une zone de fonctionnement linéaire, ce qui évite que l'inductance L ne relâche brusquement une quantité importante d'énergie en se déssaturant,
- l'utilisation de la consigne temporaire de courant de ligne I_{lcm} permet de toujours maintenir la tension U_c dans une plage de fonctionnement acceptable tout en limitant les variations du courant de ligne I_l ,
- 15 - alterner entre des phases de régulation de la tension U_c seul et du courant de ligne I_l seul permet de maintenir à la fois la tension U_c et courant de ligne I_l dans des plages de fonctionnement acceptables.

Les procédés de régulation de la tension U_c ou du courant de ligne I_l peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- 20 - le procédé comporte la commande d'un rhéostat pour produire en combinaison avec la commande du convertisseur, le courant I_u traversant la première borne de sortie dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$;
- l'intervalle T est inférieur ou égal à $\tau/5$.

25 Les modes de réalisation ci-dessus des procédés de régulation de la tension U_c ou du courant de ligne I_l présentent en outre les avantages suivants :

- l'utilisation du rhéostat pour produire le courant I_u en plus du convertisseur permet de compenser plus rapidement une variation de la tension U_c ou du courant de ligne I_l que si seul le convertisseur était utilisé,
- 30 - choisir l'intervalle T inférieur ou égal à $\tau/5$ permet de limiter l'amplitude des variations du courant I_u , ce qui améliore les caractéristiques du procédé de régulation.

L'invention a également pour objet un support d'enregistrement d'informations comportant des instructions pour l'exécution de l'un quelconque des procédés de régulation ci-dessus, lorsque ces instructions sont exécutées par un calculateur électronique.

- 5 L'invention a également pour objet un véhicule électrique comportant :
- un bus DC formé de deux conducteurs,
 - au moins un moteur de traction du véhicule électrique ayant une constante de temps statorique τ ,
 - un convertisseur électrique commandable propre à faire varier le couple
 - 10 du moteur de traction,
 - un filtre passe-bas RLC comportant deux points d'entrée électriquement raccordés, respectivement, aux deux conducteurs du bus DC et des premier et second points de sortie électriquement raccordés au convertisseur électrique,
 - des capteurs ou des estimateurs propres à mesurer ou à estimer
 - 15 l'intensité I_{li} d'un courant de ligne I_l traversant l'inductance du filtre à l'instant t_i , une tension U_{ci} entre les points de sortie du filtre à l'instant t_i , une tension de ligne U_l entre les points d'entrée du filtre ;
 - un calculateur d'une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un courant continu I_u traversant le premier point de sortie du filtre entre
 - 20 l'instant t_i et un instant t_{i+1} , cette consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du filtre de manière à ce que la tension U_c soit égale à une consigne de tension prédéterminée U_{cc} à l'instant t_{i+1} , ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les intensités I_{li} , $I_{l,i+1}$ du courant I_l de ligne respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , les tensions U_{ci} et $U_{c,i+1}$ entre les points de sortie du filtre
 - 25 respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , la tension moyenne de ligne $\bar{U}_l$ entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$,
 - une unité de commande du convertisseur électrique pour produire un courant I_u traversant le point de sortie du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les
 - 30 instants t_i et t_{i+1} étant strictement inférieur à 5τ .

L'invention a également pour objet un autre véhicule électrique comportant :

- un calculateur d'une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un courant continu I_u traversant le premier point de sortie du filtre entre l'instant t_i et un instant t_{i+1} , cette consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du filtre de manière à ce que l'intensité du courant de ligne I_l soit égale à une consigne de courant de ligne I_{lc} prédéterminée à l'instant t_{i+1} , ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les intensités I_{li} , I_{li+1} du courant de ligne I_l , respectivement, aux instants t_i et t_{i+1} , les tensions U_{ci} et U_{ci+1} entre les points de sortie du filtre, respectivement, aux instants t_i et t_{i+1} , la tension moyenne $\bar{U}_l$ de la ligne entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$, et

- une unité de commande du convertisseur électrique pour produire un courant I_u traversant le point de sortie du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les instants t_i et t_{i+1} étant strictement inférieur à 5τ .

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en se référant aux dessins sur lesquels :

- la figure 1 est une illustration schématique d'un véhicule électrique équipé d'un filtre RLC en amont d'un convertisseur électrique,

- la figure 2 est un schéma équivalent simplifié du filtre RLC du véhicule de la figure 1,

- les figures 3 et 4 sont des organigrammes de procédés de régulation à réponse pile, respectivement, de la tension U_c et du courant de ligne I_l du filtre RLC du véhicule de la figure 1,

- la figure 5 est un diagramme d'état d'un procédé de régulation à réponse pile à la fois de la tension U_c et du courant de ligne I_l du filtre RLC de la figure 1,

- la figure 6 est une illustration d'une perturbation de la tension de ligne U_l ,

- la figure 7 est un graphe illustrant l'évolution temporelle de la tension U_c , du courant de ligne I_l , et d'un courant I_u en réponse à la perturbation représentée sur le graphe de la figure 6 en absence des procédés des figures 3 et 4, et

- la figure 8 est un graphe représentant l'évolution temporelle des mêmes grandeurs que celles représentées sur la figure 7 mais dans le cas où le procédé de régulation mis en œuvre est celui de la figure 5.

Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments.

Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détail.

5 La figure 1 représente un véhicule électrique 2 équipé d'un pantographe 4 frottant sur une caténaire aérienne 6. Le véhicule 2 est, par exemple, un véhicule ferroviaire tel qu'un train. La caténaire 6 est dans cet exemple alimentée en courant continu par l'intermédiaire de plusieurs sous-stations disposées à intervalles réguliers le long de la caténaire 6. Ces sous-stations sont, par exemple, séparées l'une de l'autre
10 par des distances supérieures à plusieurs kilomètres.

Pour simplifier la figure 1, seule une sous-station 8 a été représentée. Cette sous-station 8 est raccordée à un réseau triphasé 10 de distribution d'énergie électrique. La sous-station 8 convertit la tension triphasée en une tension continue délivrée sur le réseau 6. Typiquement, la sous-station 8 comprend un disjoncteur 12
15 apte à isoler électriquement la caténaire 6 du réseau 10 si le courant dans la caténaire 6 dépasse une limite I_{max} .

Le véhicule 2 est équipé d'un moteur électrique 16 propre à entraîner en rotation les roues motrices du véhicule par l'intermédiaire d'un arbre 18 d'entraînement.

Ici, le moteur 16 est un moteur triphasé synchrone ou asynchrone. Ce moteur
20 16 est alimenté par un convertisseur électrique 20 propre à générer une tension triphasée d'alimentation du moteur 16 à partir d'une tension continue U_c . Le moteur 16 fonctionne en traction et, en alternance, en générateur de tension triphasée, par exemple, lorsque le véhicule 2 freine.

La constante de temps statorique τ du moteur 16 est comprise entre 4 ms et
25 100 ms.

Ici, le convertisseur 20 est formé de trois bras raccordés en parallèle entre des points d'entrée 22 et 24. Chaque bras comprend deux interrupteurs commandables raccordés en série par l'intermédiaire d'un point milieu. Chaque point milieu est raccordé à une phase respective du moteur 16.

30 Les points 22 et 24 sont raccordés, respectivement, aux conducteurs 26 et 28 d'un bus DC par l'intermédiaire d'un filtre RLC 30.

Le conducteur 26 est raccordé électriquement au pantographe 4 par l'intermédiaire de différents équipements non représentés, comme par exemple un

disjoncteur, un transformateur et un pont redresseur, de manière à être alimenté en tension continue par l'intermédiaire de la caténaire 6. Le conducteur 28 est raccordé électriquement à un potentiel de référence 32, par l'intermédiaire des rails d'une voie ferrée, ou un deuxième conducteur qui peut être aérien ou sous forme de rail posé au sol sur lequel viennent frotter des frotteurs de retour de courant.

Le filtre 30 est un filtre RLC passe-bas dont la période propre T_f est strictement supérieure à la constante de temps τ du moteur 16. De préférence, la période propre T_f du filtre 30 est supérieure à au moins cinq ou dix fois la constante de temps τ du moteur 16 de manière à pouvoir remplir sa fonction de filtrage.

Le filtre 30 comprend deux points d'entrée 34 et 36 raccordés, respectivement, aux conducteurs 26 et 28 de manière à recevoir entre ces points d'entrée la tension de ligne U_l . Le filtre 30 comprend également deux points de sortie 38 et 40 électriquement raccordés, respectivement, aux points d'entrée 22 et 24 du convertisseur 20. Une résistance R et une inductance L sont raccordées en série entre les points 34 et 38. La résistance R et l'inductance L ont été ici représentées sous la forme de deux éléments distincts. Toutefois, dans la pratique, la résistance R et l'inductance L peuvent être formées par un seul et même composant tel qu'un bobinage.

Le courant traversant l'inductance L est noté I_l . Ce courant est appelé courant de ligne.

Le filtre 30 comprend également un condensateur C raccordé électriquement directement entre les points de sortie 38 et 40. La tension aux bornes de ce condensateur C est notée U_c . Le courant traversant le point 38 est noté I_u .

Le véhicule 2 peut comprendre également un rhéostat 46 de freinage électrique raccordé entre les points 38 et 40 et les points 22 et 24. Typiquement, ce rhéostat 46 est destiné à dissiper l'énergie électrique produite par le moteur 16 lorsque celui-ci fonctionne en générateur et que la caténaire 6 ou le véhicule 2 n'est pas en conditions de récupérer l'énergie de freinage. Par exemple, le rhéostat 46 est formé d'une résistance R_h raccordée en série avec un interrupteur commandable 48 entre les points de sortie 38 et 40. L'interrupteur 48 est commandable de manière à régler l'intensité du courant traversant la résistance R_h .

Le véhicule 2 comprend également une unité 50 de pilotage du rhéostat 46 et du convertisseur 20 à partir, en outre, de mesures réalisées au niveau du filtre 30. A cet effet, l'unité 50 est raccordée à une mémoire 52 contenant des instructions pour

l'exécution d'un des procédés des figures 3 à 5. La mémoire 52 contient également la valeur des différentes limites de fonctionnement qui seront décrites plus en détail en regard des figures 3 et 4.

L'unité 50 est réalisée à partir d'un ou plusieurs calculateurs électroniques.

5 Ici, l'unité 50 est, par exemple, formée d'un calculateur 54 propre à établir à partir de mesures réalisées au niveau du filtre 30 une consigne $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ du courant continu I_u sur un intervalle T .

L'unité 50 comprend également une unité de commande 56 propre à commander à la fois le rhéostat 46 et le convertisseur 20 pour atteindre la consigne $\bar{I}_{uc}$.
10 A cet effet, l'unité 56 est raccordée au rhéostat 46 et au convertisseur 20. L'unité 56 est également apte à commander le convertisseur 20 en fonction d'une consigne Γ_c de couple à fournir par le moteur 16 pour accélérer ou freiner le véhicule 2.

La figure 2 représente un schéma électrique simplifié du filtre 30 sur lequel sont définies les différentes conventions de signes pour la tension de ligne U_l , le courant de
15 ligne I_l , le courant I_u et la tension U_c . Sur la figure 2, des capteurs 60, 62 et 64, respectivement, de la tension de ligne U_l , de la tension U_c et de l'intensité du courant de ligne I_l ont été représentés. Ces capteurs 60, 62 et 64 sont raccordés au calculateur 54.

La figure 3 représente un procédé de régulation à réponse pile de la tension U_c mis en œuvre par l'unité 50 de pilotage.

20 Initialement, lors d'une étape 80, une période T d'échantillonnage est choisie. Dans la suite de cette description, on note t_i l'instant auxquels sont échantillonnées les différentes mesures réalisées par les capteurs 60, 62 et 64 et t_{i+1} le prochain instant d'échantillonnage. Ces instants t_i et t_{i+1} sont séparés par l'intervalle de temps T .

Ici, l'intervalle T est choisi suffisamment petit pour que pendant un seul
25 intervalle T l'intensité du courant I_u n'ait pas le temps d'atteindre sa valeur asymptotique, c'est-à-dire U_c / R_m , où R_m est la résistance statorique du moteur 16. En effet, cette valeur asymptotique peut être jusqu'à cent fois plus élevée qu'une limite supérieure $I_{u\max}$ acceptable pour l'intensité du courant I_u . A cet effet, l'intervalle T est donc choisi strictement inférieur à 5τ . De préférence, l'intervalle T est choisi inférieur à
30 $\frac{\tau}{5}$ ou à $\frac{\tau}{10}$. Ici, dans le contexte des véhicules électriques, l'intervalle T est généralement inférieur à 20 ms.

Il est également intéressant de choisir un intervalle T qui ne soit pas trop petit de manière à ce que l'intensité du courant I_u ait le temps de varier de façon significative entre les instants t_i et t_{i+1} . A cet effet, ici, l'intervalle T est choisi supérieur à $100 \mu s$.

Ensuite, à l'instant t_i , lors d'une étape 82, la tension U_c , la tension de ligne U_l et le courant de ligne I_l sont mesurées. Les résultats de ces mesures sont, respectivement notés U_{ci} , U_{li} et I_{li} . Lors de l'étape 82, il est également possible de calculer la valeur de l'inductance L du filtre 30 si celle-ci varie en fonction du courant I_l .

Lors d'une étape suivante 84, une consigne de tension U_{cc} pour la tension U_c est fixée. Par exemple, la consigne de tension U_{cc} est définie à partir de la valeur moyenne des tensions U_l mesurée aux précédents instants d'échantillonnage. La moyenne est réalisée sur une période de temps strictement supérieure à la période propre T_f du filtre 30 et, de préférence au moins dix fois supérieure à la période propre T_f . Par exemple, la consigne de tension U_{cc} est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$U_{cc} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{li} - R I_{li}) \quad (1)$$

où :

- N est le nombre d'intervalles T pris en compte pour calculer la moyenne,
- les tensions U_{li} sont les tensions de lignes mesurées aux instants i précédents,
- les I_{li} sont les intensités du courant de ligne I_l mesurées aux instants t_i précédents, et
- R est la résistance du filtre 30.

Ensuite, lors d'une étape 86, une estimation I_{lp} de l'intensité du courant I_l qui sera atteinte à l'instant t_{i+1} , si à l'instant t_{i+1} la tension U_c est égale à la consigne de tension U_{cc} est construite. Par exemple, l'estimation I_{lp} est construite à l'aide de la relation suivante :

$$I_{lp} = \frac{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C \cdot (a_2 - a_1) \cdot U_{cc} - \left(a_1 \cdot \mu_2 \cdot e^{\mu_2 \cdot T} - a_2 \cdot \mu_1 \cdot e^{\mu_1 \cdot T} \right) \cdot I_{li} + \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C \cdot \left[a_1 \cdot a_2 \cdot (\mu_1 - \mu_2) \cdot \bar{U}_l + \left(a_1 \cdot e^{\mu_2 \cdot T} - a_2 \cdot e^{\mu_1 \cdot T} \right) \cdot U_{ci} \right]}{(a_2 \cdot \mu_1 - a_1 \cdot \mu_2)} \quad (2)$$

où :

- C est la valeur de la capacité C du filtre 30,
- $\bar{U}_l$ est la valeur moyenne de la tension U_l sur l'intervalle T ,
- μ_1 , μ_2 , a_1 , a_2 sont définis ci-dessous,
- e^x est la fonction exponentielle.

On suppose ici que la tension de ligne est constante pendant l'intervalle T de sorte que la valeur moyenne de la $\bar{U}_l$ est égale à U_{li} .

μ_1 et μ_2 sont les valeurs propres d'une matrice d'évolution du filtre 30. Ces valeurs sont définies par les relations suivantes :

$$5 \quad \mu_1 = \frac{-R \cdot C + \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C} \quad (3)$$

$$\mu_2 = \frac{-R \cdot C - \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C} \quad (4)$$

où R, C et L sont, respectivement, les valeurs de la résistance R, de la capacité du condensateur C et la valeur de l'inductance L du filtre 30.

a_1 et a_2 sont définis par les relations suivantes :

$$10 \quad a_1 = \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1} \quad (5)$$

$$a_2 = \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2} \quad (6)$$

La relation (2) a été obtenue à partir des équations d'états discrétisées du filtre 30 suivantes, après élimination de $\bar{I}_u$ dans le système d'équations (7) et (8) suivant :

$$I_{li+1} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{ci+1} = e^{\mu_2 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_1 \cdot \left(\mu_2 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \right) \quad (7)$$

$$15 \quad I_{li+1} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{ci+1} = e^{\mu_1 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_2 \cdot \left(\mu_1 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \right) \quad (8)$$

où :

- U_{ci} et I_{li} sont la tension U_c et l'intensité du courant I_l mesurée à l'instant t_i ,
- I_{li+1} et U_{ci+1} sont l'intensité du courant I_l et la tension U_c à l'instant t_{i+1} .

Etant donné que le procédé de régulation implémenté est un procédé de
 20 régulation à réponse pile, à l'instant t_{i+1} , la tension $U_{c,i+1}$ est égale à la consigne de tension U_{cc} . De plus, en supposant que la tension de ligne U_l soit constante sur l'intervalle T, la tension moyenne $\bar{U}_l$ est égale à U_{li} . Dans ces conditions, les relations (7) et (8) forment un système de deux équations à deux inconnues, à savoir I_{li+1} et $\bar{I}_u$. Il est donc possible de résoudre analytiquement ce système d'équations pour obtenir
 25 l'estimation I_{lp} (2) qui correspond à la valeur I_{li+1} , en éliminant $\bar{I}_u$ dans le système d'équations (7) et (8).

La façon dont ont été obtenues les relations (7) et (8) est décrite plus en détail à la fin de cette description dans un chapitre appelé « Obtention des équations d'états discrétisées ».

Ensuite, lors d'une étape 88, l'estimation I_{lp} est comparée à des limites de fonctionnement I_{lmin} et I_{lmax} à l'intérieur desquelles l'intensité du courant de ligne I_l doit être maintenu. Par exemple, la limite I_{lmin} est choisie pour correspondre à un état saturé de l'inductance L , ce qui permet de maintenir l'inductance L saturée tant que le procédé de la figure 3 est exécuté. Ceci présente l'avantage d'éviter que l'inductance relâche brusquement une quantité d'énergie important lorsqu'elle se déssature. La limite I_{lmax} est, celle définie en regard du disjoncteur 12, ou du disjoncteur embarqué dans le véhicule pour protéger des équipements embarqués, en fonction de leur limite respective de déclenchement par véhicule. Pour le disjoncteur 12, cette limite de déclenchement est rapportée à chaque véhicule en fonction du nombre de véhicules susceptibles de circuler en même temps sur la portion de ligne alimentée par la sous-station protégée par le disjoncteur 12, par exemple : limite de disjonction de la sous-station divisée par le nombre de véhicules maximum.

Si l'estimation I_{lp} n'appartient pas à la plage $[I_{lmin}, I_{lmax}]$, lors d'une étape 90, le calculateur 54 modifie la consigne de tension U_{cc} pour obtenir une consigne temporaire de tension U_{ccm} qui permet d'obtenir à l'instant t_{i+1} une intensité du courant I_l comprise dans la plage $[I_{lmin}, I_{lmax}]$. Par exemple, la consigne temporaire de tension U_{ccm} est obtenue à l'aide de la relation suivante :

$$U_{ccm} = \frac{(a_2 \cdot \mu_1 - a_1 \cdot \mu_2) \cdot I_{lm} + (a_1 \cdot \mu_2 \cdot e^{\mu_2 \cdot T} - a_2 \cdot \mu_1 \cdot e^{\mu_1 \cdot T}) \cdot I_{li} - \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C \cdot [a_1 \cdot a_2 \cdot (\mu_1 - \mu_2) \cdot \bar{U}_l + (a_1 \cdot e^{\mu_2 \cdot T} - a_2 \cdot e^{\mu_1 \cdot T}) \cdot U_{ci}]}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C \cdot (a_2 - a_1)} \quad (9)$$

où I_{lm} est une valeur limite de l'intensité du courant de ligne I_l choisi dans l'ensemble composé de $\{I_{lmin}; I_{lmax}\}$.

Plus précisément, I_{lm} est choisi égal à I_{lmin} si l'estimation I_{lp} construite lors de l'étape 86 est plus petite que la limite I_{lmin} . Dans le cas contraire, c'est-à-dire si cette estimation est plus grande que la limite I_{lmax} , alors la valeur de l'intensité I_{lm} est choisie égale à la limite I_{lmax} .

La relation (9) permet d'obtenir la consigne temporaire de tension U_{ccm} qui est la plus proche de la consigne de tension U_{cc} initiale tout en maintenant l'intensité du courant de ligne I_l dans la plage $[I_{lmin}, I_{lmax}]$.

Après l'étape 90, lors d'une étape 92, le calculateur 54 calcule une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne du courant I_u entre les instants t_i et t_{i+1} .

Si lors de l'étape 88, l'estimation I_{ip} est comprise dans la plage $[I_{lmin}, I_{lmax}]$, alors le calculateur 54 procède directement à l'étape 92.

- 5 La consigne $\bar{I}_{uc}$ est déterminée de manière analytique pour que à l'instant t_{i+1} la tension U_c soit exactement égale à la consigne de tension U_{cc} ou à la consigne temporaire de tension U_{ccm} si l'étape 90 a été exécutée. Par exemple, la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est établie à l'aide de la relation suivante :

$$\bar{I}_{uc} = \frac{(e^{\mu_1 T} - e^{\mu_2 T}) \cdot I_{li} + C \cdot [\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot (a_1 - a_2) \cdot \bar{U}_l - (\mu_1 - \mu_2) \cdot U_{cc} - (\mu_2 \cdot e^{\mu_1 T} - \mu_1 \cdot e^{\mu_2 T}) \cdot U_{ci}]}{(a_2 \cdot \mu_1 - a_1 \cdot \mu_2)} \quad (10)$$

- 10 La relation (10) est obtenue en résolvant les équations d'états discrétisées définies par les relations (7) et (8) pour en extraire l'inconnu $\bar{I}_u$, après élimination de $I_{l,i+1}$ dans le système d'équations (7) et (8).

Ensuite, lors d'une étape 94, la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est comparée à une plage de fonctionnement prédéterminée $[\bar{I}_{u min}, \bar{I}_{u max}]$ acceptable.

- 15 A titre d'exemple, la limite $\bar{I}_{u min}$ est choisie comme étant égale à l'intensité moyenne minimale du courant I_u qui peut être généré par le convertisseur 20 lorsque le moteur 16 fonctionne en générateur. Cette moyenne est établie sur la période T d'échantillonnage. La limite $\bar{I}_{u min}$ est négative puisque le moteur fonctionne en générateur.

- 20 La limite $\bar{I}_{u max}$ est quant à elle, par exemple, choisie égale à la somme de l'intensité moyenne maximale du courant qui peut être absorbé par le rhéostat 46 et de l'intensité moyenne maximale du courant qui peut être absorbé par le convertisseur 20. L'intensité moyenne maximale absorbable par le convertisseur 20 est fonction des caractéristiques électriques de ce convertisseur. L'intensité moyenne maximale absorbable par le rhéostat est, par exemple, donnée par le rapport d'une tension maximale U_{cmax} admissible entre les conducteurs 26 et 28 sur la valeur de la résistance R_h . Ces moyennes sont établies sur la période T d'échantillonnage.

- 25 Si la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est dans la plage $[\bar{I}_{u min}, \bar{I}_{u max}]$ alors la consigne est transmise telle qu'elle à l'unité 56 de commande, lors d'une étape 96. Dans le cas contraire, une des deux limites $\bar{I}_{u min}$ ou $\bar{I}_{u max}$ est transmise à l'unité 56, lors d'une étape 98.
- 30

Plus précisément, lors de l'étape 98, la limite $\bar{I}_{u \min}$ est transmise à l'unité 56 en tant que consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ si la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ établie lors de l'étape 92 est inférieure à la limite $\bar{I}_{u \min}$. Dans le cas contraire, c'est la limite $\bar{I}_{u \max}$ qui est transmise en tant que consigne de l'intensité moyenne du courant I_u à l'unité 56.

5 A l'issue de l'étape 96 ou 98, lors d'une étape 100, l'unité 56 commande le convertisseur 20 et si nécessaire le rhéostat 46 pendant l'intervalle T pour produire un courant I_u dont l'intensité moyenne est égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$. Plus précisément, dans le cas où la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est positive, c'est-à-dire qu'il s'agit de consommer du courant, l'unité 56 peut soit commander uniquement le rhéostat
10 46 soit uniquement le convertisseur 20, soit à la fois le rhéostat 46 et le convertisseur 20 pour produire un courant I_u dont l'intensité moyenne pendant l'intervalle T est égal à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$.

Par exemple, si seul le rhéostat 46 est commandé, le rapport cyclique ou l'angle d'ouverture de l'interrupteur 48 est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$15 \quad \alpha = \frac{R_h \cdot \bar{I}_{uc}}{\bar{U}_c} \quad (11)$$

où $\bar{U}_c$ est la valeur moyenne de la tension U_c entre l'instant t_i et t_{i+1} .

La valeur moyenne $\bar{U}_c$ peut, par exemple, être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$20 \quad \bar{U}_c = \frac{U_{cc} + U_{ci}}{2} \quad (12)$$

L'unité 56 peut également modifier la consigne de couple Γ_c que doit produire le moteur 16 pour que l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ soit égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$.

Une commande simultanée du convertisseur 20 et du rhéostat 46 pour produire un courant I_u dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ égale à une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est également possible.

25 Dans le cas où la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est négative, c'est-à-dire que le convertisseur 20 génère du courant, l'unité 56 commande uniquement le convertisseur 20.

Les variations de la consigne de couple Γ_c nécessaires pour produire un courant I_u dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ est égale à la consigne $\bar{I}_{uc}$ sont réalisées tantôt
30 en positif, tantôt en négatif autour d'un point nominal. De plus, la consigne de couple Γ_c

modifiée ne dure que pendant l'intervalle T qui est très petit devant le temps de mise en vitesse du moteur électrique. Ainsi, le conducteur ou les passagers du véhicule 2 ne ressentent pas ces modifications de couple très rapides.

A l'issue de l'étape 100, le procédé retourne à l'étape 82. Les étapes 82 à 100 sont donc répétées à chaque instant d'échantillonnage.

La figure 4 représente un procédé de régulation à réponse pile de l'intensité du courant de ligne I_l , ce procédé débute par une étape 110 identique à l'étape 80. Ensuite, lors d'une étape 112, les tensions U_{ci} , U_{li} et le courant de ligne I_{li} sont mesurées. Cette étape 112 est, par exemple, identique à l'étape 82.

Lors d'une étape 114, une consigne de courant de ligne I_{lc} pour l'intensité du courant de ligne I_l est fixée. La consigne I_{lc} est choisie dans la plage $[I_{lmin}, I_{lmax}]$. Par exemple, la consigne I_{lc} est choisie égale à I_{lmin} ou à I_{lmax} .

Ensuite, lors d'une étape 116, une estimation U_{cp} de la tension U_c à l'instant t_{i+1} si l'intensité du courant de ligne I_l à cet instant est égale à la consigne de courant de ligne I_{lc} , est construite. Par exemple, cette estimation de tension U_{cp} est construite à l'aide de la relation suivante :

$$U_{cp} = \frac{(a_1 \cdot \mu_2 - a_2 \cdot \mu_1) \cdot I_{lc} - (a_1 \cdot \mu_2 \cdot e^{\mu_2 T} - a_2 \cdot \mu_1 \cdot e^{\mu_1 T}) \cdot I_{li} + \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C \cdot [a_1 \cdot a_2 \cdot (\mu_1 - \mu_2) \cdot \bar{U}_l - (a_2 \cdot e^{\mu_1 T} - a_1 \cdot e^{\mu_2 T}) \cdot U_{ci}]}{(a_1 - a_2) \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C} \quad (13)$$

La relation (13) est obtenue en résolvant le système d'équations d'états défini par les relations (7) et (8) dans le cas où $I_{l,i+1}$ est égal à I_{lc} en éliminant I_u dans le système d'équations (7) et (8).

Lors d'une étape 118, l'estimation de tension U_{cp} est comparée à une plage de fonctionnement $[U_{cmin}, U_{cmax}]$ acceptable.

La limite U_{cmax} est, par exemple, égale à la tension maximale acceptable entre les conducteurs 26 et 28 et au-delà de laquelle le rhéostat 46 est actionné pour écrêter toute tension dépassant cette limite de dimensionnement du convertisseur (20).

La limite U_{cmin} est par exemple choisie au minimum de tension acceptable pour le fonctionnement en régime dégradé, au delà de laquelle il faut recharger le condensateur à partir de la ligne.

Lors d'une étape 120, si l'estimation de tension U_{cp} n'appartient pas à la plage $[U_{cmin}, U_{cmax}]$, alors la consigne de courant de ligne I_{lc} est modifiée pour obtenir une consigne temporaire de courant de ligne I_{lcm} qui permet de maintenir la tension U_c dans la plage $[U_{cmin}, U_{cmax}]$ à l'instant t_{i+1} . Par exemple, ici, la consigne temporaire de courant

de ligne I_{lcm} est choisie pour que à l'instant t_{i+1} , la tension U_c soit égale à la limite U_{cmin} , ou à la limite U_{cmax} . Par exemple à cet effet, la consigne temporaire I_{lcm} est construite à l'aide de la relation suivante :

$$I_{lcm} = \frac{(a_1 \cdot \mu_2 \cdot e^{\mu_2 \cdot T} - a_2 \cdot \mu_1 \cdot e^{\mu_1 \cdot T}) \cdot I_{li} - \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C \cdot [a_1 \cdot a_2 \cdot (\mu_1 - \mu_2) \cdot \bar{U}_l - (a_2 \cdot e^{\mu_1 \cdot T} - a_1 \cdot e^{\mu_2 \cdot T}) \cdot U_{ci} - (a_1 - a_2) \cdot U_{cm}]}{a_1 \cdot \mu_2 - a_2 \cdot \mu_1} \quad (14)$$

5 où U_{cm} est une valeur choisie dans l'ensemble composé de $\{U_{cmin} ; U_{cmax}\}$.

Plus précisément, la valeur U_{cm} est choisie égale à U_{cmin} si l'estimation U_{cp} est inférieure à la limite U_{cmin} . Dans le cas contraire, c'est-à-dire si l'estimation U_{cp} est supérieure à la limite U_{cmax} , la valeur U_{cm} est choisie égale à la limite U_{cmax} .

10 A l'issue de l'étape 120, ou si l'estimation U_{cp} appartient à la plage $[U_{cmin} , U_{cmax}]$ une étape 122 de calcul d'une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne du courant I_u entre les instants t_i et t_{i+1} est réalisée. Plus précisément, la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est calculée pour que exactement à l'instant t_{i+1} l'intensité du courant de ligne I_l soit égale à la consigne du courant de ligne I_{lc} ou à la consigne temporaire de courant de ligne I_{lcm} si l'étape 120 a été exécutée.

15 Par exemple, la consigne $\bar{I}_{uc}$ est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\bar{I}_{uc} = \frac{(\mu_1 - \mu_2) \cdot I_{lc} - (\mu_1 \cdot e^{\mu_1 \cdot T} - \mu_2 \cdot e^{\mu_2 \cdot T}) \cdot I_{li} + \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot C \cdot (e^{\mu_1 \cdot T} - e^{\mu_2 \cdot T}) \cdot (U_{ci} - \bar{U}_l)}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot (a_1 - a_2)} \quad (15)$$

La relation (15) est obtenue en résolvant le système d'équations d'états discrétisées défini par les relations (7) et (8) dans le cas où $I_{l,i+1}$ est égal à I_{lc} et $\bar{I}_u$ est égal à $\bar{I}_{uc}$, après élimination de $U_{c,i+1}$.

20 Ensuite, l'unité 56 exécute des étapes 124, 126, 128, 130, respectivement, identiques aux étapes 94, 96, 98 et 100 du procédé de la figure 3.

25 Etant donné que l'unité 50 de pilotage ne peut pas agir sur la tension de ligne U_l qui est fixée par la tension de la caténaire 6, seule l'intensité du courant I_u peut être commandée. Dans ces conditions, pendant un intervalle T , il est uniquement possible de réguler soit seulement la tension U_c , soit seulement le courant de ligne I_l . En d'autres termes, les procédés des figures 3 et 4 ne peuvent pas être exécutés simultanément. Par contre, il est possible de réguler, en alternance, la tension U_c et le courant de ligne I_l en alternant l'exécution des procédés des figures 3 et 4. Cela permet par exemple de stabiliser la tension U_c tout en maintenant le courant de ligne I_l dans la plage de fonctionnement $[I_{lmin} , I_{lmax}]$. Par exemple, pour empêcher le dépassement de la limite I_{lmax} , le procédé de la figure 5 est mis en œuvre.

30

Le procédé de la figure 5 comporte :

- une phase 140 de régulation de la tension U_c à l'aide du procédé de la figure 3, et

- une phase 142 de régulation du courant de ligne I_l à l'aide du procédé de la figure 4.

L'unité 50 passe automatiquement de la phase 140 à la phase 142 lorsque l'intensité I_{li} mesurée devient strictement supérieure à la limite I_{lmax} .

A l'inverse, l'unité 50 passe automatiquement de la phase 142 à la phase 140 lorsque l'intensité I_{li} devient inférieure à la limite prédéterminée, par exemple, égale à I_{lmax} .

Ainsi, tant que l'intensité mesurée du courant I_l est strictement inférieure à la limite I_{lmax} , la tension U_c est maintenue égale à chaque instant t_i à la consigne de tension U_{cc} . Les oscillations de la tension de consigne U_{cc} suite à une perturbation de la tension de ligne U_l sont donc limitées. Si l'intensité du courant de ligne I_l dépasse la limite I_{lmax} , alors le premier objectif consistant à réguler la tension U_c est abandonné et on passe à la phase 142. Par exemple, lors de la phase 142, la consigne de courant de ligne I_{lc} peut être choisie égale à la limite I_{lmax} ou strictement inférieure à la limite I_{lmax} . La phase 142 s'arrête dès que l'intensité mesurée du courant de ligne I_l est inférieure ou égale à la limite I_{lmax} et l'on retourne alors à la phase 140.

Ainsi, en alternant temporellement les phases 140 et 142, la tension U_c peut être stabilisée tout en maintenant l'intensité du courant de ligne I_l inférieure à la limite I_{lmax} .

De façon similaire, les phases 140 et 142 sont exécutées en alternance pour maintenir l'intensité du courant I_l supérieure à la limite I_{lmin} .

Le fonctionnement du procédé de la figure 5 est illustré dans le cas particulier d'une perturbation de la tension de ligne U_l représentée sur le graphe de la figure 6. Cette perturbation consiste à faire chuter instantanément la tension de ligne U_l de 3000 volts à 2400 volts et à maintenir la tension de ligne U_l égale à 2400 volts pendant 0,1 seconde. Ensuite, la tension de ligne U_l remonte instantanément à 3450 volts et reste égale à cette valeur pendant 0,1 seconde avant de retourner, instantanément, à 3000 volts. Les variations de la tension de ligne U_l s'effectuent ici instantanément. On comprend donc que ce qui est représenté sur la figure 7 n'est qu'une perturbation théorique.

Les courbes représentées dans les figures 7 et 8 ont été obtenues par simulation d'un modèle du véhicule 2 avec les valeurs numériques suivantes :

- $L=3\text{mH}$,
- $R=25\text{m}\Omega$,
- 5 - $C=18\text{mF}$,
- $U_l=3000\text{V}$,
- $U_{c\text{max}}=3500\text{V}$,
- $I_{u\text{max}}=470\text{A}$,
- $I_{u\text{min}}=-470\text{A}$,
- 10 - $I_{l\text{max}}=2000\text{A}$,
- $R_h=2\Omega$.

La figure 7 représente l'évolution en fonction du temps de la tension U_c , de l'intensité du courant de ligne I_l et de l'intensité du courant I_u dans le cas où aucun procédé de régulation de la tension U_c ou du courant de ligne I_l n'est mis en œuvre. Comme on peut le constater, cela se traduit par des fortes oscillations de la tension U_c et de l'intensité du courant de ligne I_l .

Toute chose égale par ailleurs, le graphe de la figure 8 représente l'évolution temporelle de la tension U_c , et des intensités des courants I_l et I_u en réponse à la perturbation représentée sur la figure 6 lorsque le procédé de la figure 5 est mis en œuvre. De plus, on choisi ici la consigne de tension U_{cc} comme étant égale à la moyenne de la tension de ligne U_l sur les dix dernières millisecondes de manière à imposer de brusques variations de cette consigne qui se traduisent nécessairement par la création de situations où la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ atteint les limites de la plage $[\bar{I}_{u\text{min}}, \bar{I}_{u\text{max}}]$. On notera que ce choix est ici fait uniquement à titre d'illustration pour montrer ce qui se passe lorsque la consigne $\bar{I}_{uc}$ atteint l'une des limites $\bar{I}_{u\text{min}}$ ou $\bar{I}_{u\text{max}}$. Dans la pratique, la consigne de tension U_{cc} sera choisie de façon à lisser les perturbations de la tension de ligne U_l comme indiqué en regard de l'étape 82.

Comme illustré sur le graphe de la figure 8, la tension U_c est maintenue proche de la consigne de tension U_{cc} . On comprend donc qu'à l'aide de ce procédé, les variations de la tension U_c sont très bien maîtrisées même en cas de brusques variations de la tension de ligne U_l .

De plus, comme illustré par les paliers dans la courbe représentant l'évolution du courant I_u en fonction du temps, les limites $\bar{I}_{u \max}$ et $\bar{I}_{u \min}$ sont atteintes de sorte que pendant ces paliers, la tension U_c n'est pas strictement égale à la consigne de tension U_{cc} . Par contre, en dehors de ces paliers, la tension U_c est égale à la consigne de tension U_{cc} .

Ainsi, comme l'illustre la figure 8, grâce au procédé de la figure 5, les variations de la tension U_c sont maîtrisées tout en maintenant les intensités I_u et I_l dans leur plage de fonctionnement respective.

De nombreux autres modes de réalisation sont possibles.

Par exemple, le conducteur 26 du bus DC peut être raccordé au pantographe 4 par l'intermédiaire d'un redresseur tel qu'un pont redresseur à diodes et d'un transformateur dans le cas d'une caténaire alimentée en tension monophasée alternative.

L'une de l'intensité du courant de ligne I_l et de la tension U_c peut être estimée au lieu d'être mesurée. L'intensité du courant de ligne I_l et la tension U_c peuvent aussi être toutes les deux estimées.

Ce qui a été décrit ci-dessus s'applique également au cas des moteurs à courant continu. Dans ce cas, le convertisseur 20 est, par exemple, un hacheur/abaisseur.

Enfin, on notera que des contraintes techniques peuvent imposer d'utiliser une approximation $\hat{I}_{uc}$ de la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ et non pas la valeur exacte donnée par la relation (10) ou (15). Par exemple, une de ces contraintes techniques est le nombre de chiffres après la virgule que peut gérer le calculateur 54. Ainsi, dans cette description, on considère que d'un point de vue pratique, une consigne de courant $\hat{I}_{uc}$ est établie à partir du système d'équations d'états défini par les relations (7) et (8) si le coefficient d'intercorrélation α suivant est supérieur à 0,9 :

$$\alpha = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} \frac{\bar{I}_{uc}(t) \hat{I}_{uc}(t)}{\sqrt{\bar{I}_{uc\text{eff}} \hat{I}_{uc\text{eff}}}} dt \quad (16)$$

où :

- N est un nombre entier supérieur à 20 d'intervalles T pris en compte pour calculer le coefficient d'intercorrélation α ,

- $\bar{I}_{uc}(t)$ est la valeur exacte de la consigne pour l'intensité moyenne du courant I_u obtenue à l'aide de la relation (10) ou (15),

- $\hat{I}_{uc}(t)$ est l'approximation de la consigne $\bar{I}_{uc}(t)$ envoyée par le calculateur 54 à l'unité 56,

5 - $\bar{I}_{uceff}$ est défini par la relation suivante :

$$\bar{I}_{uceff} = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} \bar{I}_{uc}^2(t) dt \quad (17)$$

- $\hat{I}_{uceff}$ est défini par la relation suivante :

$$\hat{I}_{uceff} = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} \hat{I}_{uc}^2(t) dt \quad (18)$$

10 Tel que défini ci-dessus, le coefficient d'intercorrélation α représente le degré de corrélation entre l'approximation $\hat{I}_{uc}$ et la consigne de courant exacte $\bar{I}_{uc}$.

De préférence, si des approximations doivent être faites, celles-ci seront réalisées de manière à ce que le coefficient d'intercorrélation α défini ci-dessus soit même supérieur à 0,97 ou 0,99.

Annexe 1 :**Etablissement des équations d'états discrétisées du filtre 30****I – Modèle électrotechnique du filtre de ligne****5 I-1 – Système d'équations différentielles du filtre RLC**

$$U_l - U_c = L \cdot \frac{dI_l}{dt} + R \cdot I_l$$

$$I_l - I_u = C \cdot \frac{dU_c}{dt}$$

I-2 – Système d'équations d'états

10 Le filtre est un système du second ordre, il possède donc deux degrés de liberté. Le vecteur d'état est donc un vecteur à deux dimensions. Le courant de ligne et la tension du condensateur peuvent être choisis comme les deux coordonnées du vecteur d'état du filtre :

$$\vec{X}(t) = \begin{bmatrix} I_l(t) \\ U_c(t) \end{bmatrix}$$

15 Ces deux variables sont mesurées et donc connues. Si ce n'était pas le cas, il faudrait en estimer une ou l'observer.

Les variables de commande du système sont le courant d'utilisation et la tension de la ligne. La tension de la ligne n'étant pas modifiable directement, elle entre dans le modèle comme une variable de commande mesurée et non calculée.

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} I_u \\ U_l \end{bmatrix}$$

20 Le système d'équations d'états ainsi défini, peut s'écrire à partir des équations différentielles :

$$\begin{aligned} \frac{dI_l}{dt} &= -\frac{R}{L} \cdot I_l - \frac{1}{L} \cdot U_c + \frac{1}{L} \cdot U_l \\ \frac{dU_c}{dt} &= \frac{1}{C} \cdot I_l - \frac{1}{C} \cdot I_u \end{aligned}$$

L'équation d'état continue s'en déduit :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_l}{dt} \\ \frac{dU_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_l \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_u \\ U_l \end{bmatrix}$$

En comparant avec le système d'équations de la forme continue :

$$\begin{aligned} \dot{\vec{X}} &= A \cdot \vec{X} + B \cdot \vec{V} \\ \vec{Y} &= E \cdot \vec{X} \end{aligned}$$

on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{\vec{X}} &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{X} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{V} \\ \vec{Y} &= E \cdot \vec{X} \end{aligned}$$

Sachant de plus que le vecteur de mesure est le vecteur d'état :

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \\ E &= I_2 \end{aligned}$$

où :

- I_2 est la matrice unité de dimension 2,
- A est la matrice d'évolution libre, et
- B est la matrice de commande.

II – Diagonalisation de la matrice d'évolution

II – 1 – Equation caractéristique de la matrice d'évolution

C'est le déterminant de la matrice : $\mu \cdot I - A$, égalé à 0 :

$$\det \begin{bmatrix} \mu + \frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & \mu \end{bmatrix} = 0$$

$$\mu \cdot \left(\mu + \frac{R}{L} \right) + \frac{1}{L \cdot C} = 0$$

$$\mu^2 + \mu \cdot \frac{R}{L} + \frac{1}{L \cdot C} = 0$$

II – 2 – Valeurs propres de la matrice d'évolution

Ce sont les racines de l'équation caractéristique

$$\mu_1 = \frac{-R \cdot C + \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

$$\mu_2 = \frac{-R \cdot C - \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

Il est intéressant de noter que ces valeurs propres sont constantes dans la mesure où l'inductance ne varie pas avec le courant et qu'elles dépendent du courant dans le cas contraire.

Ces racines vérifient l'équation caractéristique :

$$\mu_1 \cdot \left(\mu_1 + \frac{R}{L} \right) = \mu_2 \cdot \left(\mu_2 + \frac{R}{L} \right) = -\frac{1}{L \cdot C}$$

ce que l'on peut encore écrire :

$$\left(\mu_i + \frac{R}{L} \right) \cdot \mu_i + \frac{1}{L \cdot C} = 0$$

L'équation caractéristique fournit également la somme et le produit des valeurs propres comme relations remarquables :

$$\mu_1 + \mu_2 = -\frac{R}{L} \quad \mu_1 \cdot \mu_2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

On peut aussi remarquer que la racine double $\mu_1 = \mu_2$ est obtenue pour :

$$R = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

qui est la résistance critique d'amortissement.

Si $R = 0$, $\mu_i = \pm i \cdot \omega$, avec : $\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$. On reconnaît les pôles complexes

conjugués. Si $R \neq 0$, les pôles sont complexes conjugués avec une partie réelle négative et si la résistance est suffisamment grande, au dessus de l'amortissement critique, les pôles sont réels négatifs.

II – 3 – Vecteurs propres de la matrice d'évolution

Ils sont calculés par :

$$\begin{matrix} 28 \\ (\mu_i \cdot I - A) \cdot \Pi_i = 0 \end{matrix}$$

soit :

$$\begin{bmatrix} \mu_i + \frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & \mu_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \pi_{1i} \\ \pi_{2i} \end{bmatrix} = 0$$

Le produit de matrices s'écrit alors sous forme d'un système d'équations :

$$\begin{matrix} 5 \\ \left(\mu_i + \frac{R}{L} \right) \cdot \pi_{1i} + \frac{1}{L} \cdot \pi_{2i} = 0 \\ -\frac{1}{C} \cdot \pi_{1i} + \mu_i \cdot \pi_{2i} = 0 \end{matrix}$$

De la deuxième équation du système on déduit :

$$\pi_{1i} = \mu_i \cdot C \cdot \pi_{2i}$$

relation qui permet de réécrire la première équation :

$$\left[\left(\mu_i + \frac{R}{L} \right) \cdot \mu_i + \frac{1}{L \cdot C} \right] \cdot \pi_{2i} = 0$$

10 Cette équation est toujours vérifiée pour les deux valeurs propres, quel que soit $\pi_{2i} \neq 0$, du fait que le premier facteur est identiquement nul d'après l'équation caractéristique.

Choisissons donc $\pi_{21} = -1$ et $\pi_{22} = 1$. On en déduit donc :

$$\pi_{11} = -\mu_1 \cdot C \text{ et } \pi_{12} = \mu_2 \cdot C$$

15 La matrice de passage est constituée par les vecteurs propres :

$$P = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} \\ \pi_{21} & \pi_{22} \end{bmatrix}$$

soit :

$$P = \begin{bmatrix} -\mu_1 \cdot C & \mu_2 \cdot C \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

L'inverse de la matrice de passage :

$$20 \quad P^{-1} = \frac{1}{(\mu_2 - \mu_1) \cdot C} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\mu_2 \cdot C \\ 1 & -\mu_1 \cdot C \end{bmatrix}$$

II – 3 – Matrice diagonale

On peut maintenant écrire :

29

$$A = P \cdot D^{-1} \cdot P^{-1}$$

avec :

$$D = \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{bmatrix} \quad D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\mu_2} \end{bmatrix}$$

III – Projection des équations d'états

5 III – 1 – Equations d'états discrétisées

Les équations d'états discrétisées sont obtenues par intégration depuis l'instant initial t_i , jusqu'à la fin t_{i+1} de la période d'échantillonnage de durée T :

$$\bar{X}_{t_{i+1}} = F \cdot \bar{X}_{t_i} + G \cdot \bar{V}_{t_i \rightarrow t_{i+1}}$$

avec :

$$10 \quad F = e^{A \cdot T} \quad G = A^{-1} \cdot (e^{A \cdot T} - I) \cdot B$$

Si $\bar{X}_{t_i}$, représente le vecteur d'état à l'instant initial, $\bar{X}_{t_{i+1}}$ représente alors la prédiction du vecteur d'état. On notera maintenant :

$$\bar{X}_i = \bar{X}_{t_i} \quad \text{et} \quad \bar{X}_p = \bar{X}_{t_{i+1}}$$

15 On utilise la matrice de passage p et la matrice diagonale de la matrice d'évolution pour calculer les matrices de transition et de commande :

$$F = P \cdot e^{D \cdot T} \cdot P^{-1} \quad G = A^{-1} \cdot P \cdot (e^{D \cdot T} - I) P^{-1} \cdot B$$

Le système d'équations d'états discrétisées, peut alors être écrit :

$$\bar{X}_p = P \cdot e^{D \cdot T} \cdot P^{-1} \cdot \bar{X}_i + A^{-1} \cdot P \cdot (e^{D \cdot T} - I) P^{-1} \cdot B \cdot \bar{V}$$

III – 2 - Projection des vecteurs d'états

20 Il suffit maintenant de projeter le système d'équations d'états discrétisées dans la base des vecteurs propres en multipliant à gauche par l'inverse de la matrice de passage et d'isoler les vecteurs « propres » d'états.

$$P^{-1} \cdot \bar{X}_p = e^{D \cdot T} \cdot P^{-1} \cdot \bar{X}_i + P^{-1} \cdot A^{-1} \cdot P \cdot (e^{D \cdot T} - I) \cdot P^{-1} \cdot B \cdot \bar{V}$$

en remarquant que :

$$25 \quad P^{-1} \cdot A^{-1} \cdot P = (P^{-1} \cdot A \cdot P)^{-1} = D^{-1}$$

on simplifie la relation vectorielle :

$$\left[P^{-1} \cdot \vec{X}_p \right] = e^{D \cdot T} \cdot \left[P^{-1} \cdot \vec{X}_i \right] + D^{-1} \cdot (e^{D \cdot T} - I) \cdot \left[P^{-1} \cdot B \right] \cdot \vec{\bar{V}}$$

Pour simplifier la représentation finale de l'équation d'état, multiplions les deux membres de l'équation par la constante : $(\mu_2 - \mu_1) \cdot C$:

5 $(\mu_2 - \mu_1) \cdot C \cdot \left[P^{-1} \cdot \vec{X}_p \right] = e^{D \cdot T} \cdot (\mu_2 - \mu_1) \cdot C \cdot \left[P^{-1} \cdot \vec{X}_i \right] + D^{-1} \cdot (e^{D \cdot T} - I) \cdot (\mu_2 - \mu_1) \cdot C \cdot \left[P^{-1} \cdot B \right] \cdot \vec{\bar{V}}$ Les vecteurs propres d'état sont définis par :

$$\vec{\Psi} = (\mu_2 - \mu_1) \cdot C \cdot \left[P^{-1} \cdot \vec{X} \right]$$

$$\vec{\Psi} = \begin{bmatrix} 1 & -\mu_2 \cdot C \\ 1 & -\mu_1 \cdot C \end{bmatrix} \cdot \vec{X}$$

$$\vec{\Psi} = \begin{bmatrix} 1 & -\mu_2 \cdot C \\ 1 & -\mu_1 \cdot C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_l \\ U_c \end{bmatrix}$$

10 Leurs coordonnées sont donc :

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_l - \mu_2 \cdot C \cdot U_c \\ I_l - \mu_1 \cdot C \cdot U_c \end{bmatrix}$$

L'équation matricielle d'état peut être écrite avec cette nouvelle définition, en notant par ailleurs que :

$$e^{D \cdot T} = \begin{bmatrix} e^{\mu_1 \cdot T} & 0 \\ 0 & e^{\mu_2 \cdot T} \end{bmatrix}$$

15
$$\vec{\Psi}_p = e^{D \cdot T} \cdot \vec{\Psi}_i + \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\mu_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{\mu_1 \cdot T} - 1 & 0 \\ 0 & e^{\mu_2 \cdot T} - 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\mu_2 \cdot C \\ 1 & -\mu_1 \cdot C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_u \\ \bar{U}_l \end{bmatrix}$$

$$\vec{\Psi}_p = e^{D \cdot T} \cdot \vec{\Psi}_i + \begin{bmatrix} \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1} & 0 \\ 0 & \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu_2 & \frac{1}{L} \\ \mu_1 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_u \\ \bar{U}_l \end{bmatrix}$$

$$\vec{\Psi}_p = e^{D \cdot T} \cdot \vec{\Psi}_i + \begin{bmatrix} \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1} & 0 \\ 0 & \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu_2 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \\ \mu_1 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \end{bmatrix}$$

Le vecteur « propre » de commande $\vec{\Xi}$ est défini par :

31

$$\vec{\Xi} = \begin{bmatrix} \mu_2 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \\ \mu_1 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \end{bmatrix}$$

Le système des équations d'états peut maintenant être écrit de manière simplifiée :

$$\vec{\Psi}_p = e^{D \cdot T} \cdot \vec{\Psi}_i + \begin{bmatrix} \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1} & 0 \\ 0 & \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2} \end{bmatrix} \cdot \vec{\Xi}$$

5 soit encore :

$$\begin{aligned} \Psi_{1p} &= e^{\mu_1 \cdot T} \cdot \Psi_{1i} + \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1} \cdot \Xi_1 \\ \Psi_{2p} &= e^{\mu_2 \cdot T} \cdot \Psi_{2i} + \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2} \cdot \Xi_2 \end{aligned}$$

Enfin, en posant :

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1} \\ a_2 &= \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2} \end{aligned}$$

les équations « propres » d'états deviennent :

10

$$\begin{aligned} \Psi_{1p} &= e^{\mu_1 \cdot T} \cdot \Psi_{1i} + a_1 \cdot \Xi_1 \\ \Psi_{2p} &= e^{\mu_2 \cdot T} \cdot \Psi_{2i} + a_2 \cdot \Xi_2 \end{aligned}$$

On peut maintenant expliciter le système précédent en utilisant la définition des variables intermédiaires :

15

$$\begin{aligned} I_{lp} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{cp} &= e^{\mu_1 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_1 \cdot \left(\mu_2 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \right) \\ I_{lp} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{cp} &= e^{\mu_2 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_2 \cdot \left(\mu_1 \cdot \bar{I}_u + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \right) \end{aligned}$$

REVENDEICATIONS

1. Procédé de régulation d'une tension U_c entre un premier et un second points
 5 (38, 40) de sortie d'un filtre RLC (30) passe-bas de période propre T_f , ce filtre RLC
 comportant deux points (34, 36) d'entrée électriquement raccordés, respectivement,
 aux conducteurs (26, 28) d'un bus DC d'un véhicule électrique alimenté par
 l'intermédiaire d'une caténaire, le premier et le second points (38, 40) de sortie étant
 électriquement raccordés à un convertisseur électrique commandable (20) permettant
 10 de commander le couple exercé par un moteur électrique (16) de traction du véhicule
 électrique, la constante de temps statorique τ de ce moteur étant strictement inférieure
 à la période propre T_f ,

ce procédé comportant la mesure (82) ou l'estimation de l'intensité I_{li} d'un courant de
 ligne I_l traversant l'inductance (L) du filtre à un instant t_i , de la tension U_{ci} entre les
 15 points (38, 40) de sortie du filtre à l'instant t_i , et d'une tension de ligne U_l entre les points
 (34, 36) d'entrée du filtre,

caractérisé en ce que ce procédé est un procédé de régulation à réponse pile
 comportant :

- le calcul (92) d'une consigne $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un
 20 courant continu I_u traversant le premier point (38) de sortie du filtre entre l'instant t_i et un
 instant t_{i+1} , cette consigne $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du
 filtre de manière à ce que la tension U_c soit égale à une consigne prédéterminée de
 tension U_{cc} à l'instant t_{i+1} , ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les
 intensités I_{li} , I_{li+1} du courant I_l de ligne respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , les tensions
 25 U_{ci} et U_{ci+1} entre les points (38, 40) de sortie du filtre respectivement aux instants t_i et
 t_{i+1} , la tension moyenne de ligne $\bar{U}_l$ entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$,

- la commande (100) du convertisseur électrique pour produire un courant
 I_u traversant le point (38) de sortie du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants
 t_i et t_{i+1} est égale à la consigne $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les instants t_i et t_{i+1} étant
 30 strictement inférieur à 5τ .

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la consigne de tension U_{cc} est
 choisie systématiquement inférieure ou égale à une limite U_{cmax} , la limite U_{cmax}

correspondant à la tension maximale admissible à l'entrée du convertisseur électrique (20) ou entre les points (38, 40) de sortie du filtre.

3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le procédé comporte :

- 5 - la construction (86) d'une estimation I_{lp} du courant de ligne I_l qui sera atteinte si la tension U_c est égale à la consigne de tension U_{cc} à l'instant t_{i+1} ,
- la comparaison (88) de l'estimation I_{lp} à au moins une limite prédéterminée I_{lm} ,
- uniquement si la limite prédéterminée I_{lm} est franchie, la modification (90)
- 10 de la consigne de tension U_{cc} de manière à obtenir une consigne temporaire de tension U_{ccm} qui correspond à une estimation I_{lp} qui ne franchit pas la limite prédéterminée I_{lm} , et l'utilisation de la consigne temporaire de tension U_{ccm} en lieu et place de la consigne de tension U_{cc} lors du calcul de la consigne $\bar{I}_{uc}$ uniquement pour l'intervalle T en cours, et
- 15 - si la limite prédéterminée I_{lm} n'est pas franchie, l'utilisation de la consigne de tension U_{cc} pour le calcul de la consigne $\bar{I}_{uc}$ pour l'intervalle T en cours.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la consigne $\bar{I}_{uc}$ est une solution du système d'équations suivant :

$$I_{lp} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{cc} = e^{\mu_1 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_1 \cdot \left(\mu_2 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \right)$$

$$20 \quad I_{lp} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{cc} = e^{\mu_2 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_2 \cdot \left(\mu_1 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_l \right)$$

où :

- R et L sont les valeurs, respectivement, de la résistance et de l'inductance du filtre RLC raccordées en série entre les premiers points d'entrée et de sortie,
- C est la capacité du condensateur raccordé entre les premier et second points de
- 25 sortie,
- μ_1 et μ_2 sont les valeurs propres d'une matrice d'évolution définies par la relation suivante :

$$\mu_1 = \frac{-R \cdot C + \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

$$\mu_2 = \frac{-R \cdot C - \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

- a_1 et a_2 sont les valeurs définies par les relations suivantes :

$$a_1 = \frac{e^{\mu_1 T} - 1}{\mu_1}$$

$$a_2 = \frac{e^{\mu_2 T} - 1}{\mu_2}$$

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la consigne de tension U_{cc} est construite à partir de la tension de ligne U_l de manière à ce que son spectre de puissance ne présente aucun harmonique au-delà de la fréquence $0,9/T_f$.

6. Procédé de régulation d'un courant de ligne I_l traversant une inductance L d'un filtre RLC passe-bas de période propre T_f , ce filtre comportant :

- deux points (34, 36) d'entrée électriquement raccordés respectivement aux conducteurs (26, 28) d'un bus DC d'un véhicule électrique alimenté par une caténaire, et

- des premier et second points (38, 40) de sortie, le premier point de sortie étant électriquement raccordé à un convertisseur électrique commandable (20) pour faire varier le couple d'un moteur électrique (16) de traction du véhicule électrique, la constante de temps statorique τ de ce moteur électrique (16) étant strictement inférieure à la période propre T_f ,
ce procédé comportant :

- la mesure (112) ou l'estimation de l'intensité I_{li} du courant de ligne I_l à un instant t_i , d'une tension U_{ci} entre les points (38, 40) de sortie du filtre à l'instant t_i et d'une tension de ligne U_l entre les points (34, 36) d'entrée du filtre, caractérisé en ce que ce procédé est un procédé de régulation à réponse pile comportant :

- le calcul (122) d'une consigne $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un courant continu I_u traversant le premier point (38) de sortie du filtre entre l'instant t_i et un instant t_{i+1} , cette consigne $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du filtre de manière à ce que l'intensité du courant de ligne I_l soit égale à une consigne de courant de ligne I_{lc} prédéterminée, à l'instant t_{i+1} , ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les intensités I_{li} , I_{li+1} du courant de ligne I_l , respectivement, aux instants t_i et t_{i+1} , les tensions U_{ci} et U_{ci+1} entre les points (38, 40) de sortie du filtre,

respectivement, aux instants t_i et t_{i+1} , la tension moyenne $\bar{U}_l$ de la ligne entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$, et

- la commande (130) du convertisseur électrique (20) pour produire un courant I_u traversant le point (38) de sortie dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les instants t_i et t_{i+1} étant strictement inférieur à 5τ .

7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel la consigne de courant de ligne I_{lc} est choisie systématiquement inférieure ou égale à une limite I_{lmax} , la limite I_{lmax} correspondant à l'intensité du courant de ligne I_l à partir de laquelle un disjoncteur d'une sous-station d'alimentation de la caténaire ou du véhicule électrique est déclenché.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 ou 7, dans lequel la consigne de courant de ligne I_{lc} est choisie systématiquement supérieure ou égale à une limite I_{lmin} , la limite I_{lmin} correspondant à l'intensité du courant de ligne en deçà de laquelle l'inductance L du filtre est désaturée.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, dans lequel le procédé comporte :

- la construction (116) d'une estimation U_{cp} de la tension U_c qui sera atteinte entre les points (38, 40) de sortie du filtre à l'instant t_{i+1} si l'intensité du courant de ligne I_l est égale à la consigne de courant de ligne I_{lc} à l'instant t_{i+1} ,

- la comparaison (118) de l'estimation de tension U_{cp} à au moins une limite prédéterminée de tension U_{cm} ,

- uniquement si la limite prédéterminée de tension U_{cm} est franchie, la modification (120) de la consigne de courant de ligne I_{lc} de manière à obtenir une consigne temporaire de courant de ligne I_{lcm} qui corresponde à une estimation de tension U_{cp} qui ne franchit pas la limite prédéterminée de tension U_{cm} , et l'utilisation (130) de la consigne temporaire de courant de ligne I_{lcm} en lieu et place de la consigne de courant de ligne I_{lc} lors de la commande du convertisseur uniquement pendant l'intervalle T en cours, et

- si la limite prédéterminée de tension U_{cm} n'est pas franchie, l'utilisation de la consigne de courant de ligne I_{lc} lors du calcul de la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intervalle T en cours.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, dans lequel la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ est une solution du système d'équations suivant :

36

$$I_{lc} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{cp} = e^{\mu_1 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_2 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_1 \cdot \left(\mu_2 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_1 \right)$$

$$I_{lc} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{cp} = e^{\mu_2 \cdot T} \cdot (I_{li} - \mu_1 \cdot C \cdot U_{ci}) + a_2 \cdot \left(\mu_1 \cdot \bar{I}_{uc} + \frac{1}{L} \cdot \bar{U}_1 \right)$$

où :

- R et L sont les valeurs, respectivement, de la résistance et de l'inductance du filtre RLC raccordées en série entre les premiers points d'entrée et de sortie,

- C est la capacité du condensateur raccordé entre les premier et second points de sortie,

- μ_1 et μ_2 sont les valeurs propres d'une matrice d'évolution définies par la relation suivante :

$$\mu_1 = \frac{-R \cdot C + \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

$$\mu_2 = \frac{-R \cdot C - \sqrt{R^2 \cdot C^2 - 4 \cdot L \cdot C}}{2 \cdot L \cdot C}$$

- a_1 et a_2 sont les valeurs définies par les relations suivantes :

$$a_1 = \frac{e^{\mu_1 \cdot T} - 1}{\mu_1}$$

$$a_2 = \frac{e^{\mu_2 \cdot T} - 1}{\mu_2}$$

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel le procédé comporte :

- une première phase (140) de régulation de la seule tension U_c entre les premier et second points de sortie du filtre conformément à l'une quelconque des revendications 1 à 5,

- une seconde phase (142) de régulation de la seule intensité du courant de ligne I_l conformément à l'une quelconque des revendications 6 à 10,

- le passage de la première phase (140) vers la seconde phase (142) dès que l'intensité du courant de ligne I_l franchit une limite I_{lm} et le passage de la seconde phase vers la première phase dès que l'intensité du courant de ligne I_l refranchit la même ou une autre limite en sens inverse.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le procédé comporte la commande d'un rhéostat pour produire en combinaison avec la commande du convertisseur, le courant I_u traversant la première borne de sortie

du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$.

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'intervalle T est inférieur ou égal à $\tau/5$.

14. Support (52) d'enregistrement d'informations, caractérisé en ce qu'il comporte des instructions pour l'exécution d'un procédé conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, lorsque ces instructions sont exécutées par un calculateur électronique.

15. Véhicule électrique comportant :

- un bus DC formé de deux conducteurs (26, 28),
- au moins un moteur (16) de traction du véhicule électrique ayant une constante de temps statorique τ ,
- un convertisseur électrique commandable (20) propre à faire varier le couple du moteur de traction,

- un filtre (30) passe-bas RLC comportant deux points (34, 36) d'entrée électriquement raccordés, respectivement, aux deux conducteurs (26, 28) du bus DC et des premier et second points (38, 40) de sortie électriquement raccordés au convertisseur électrique (20),

- des capteurs (60, 62, 64) ou des estimateurs propres à mesurer ou à estimer l'intensité I_{li} d'un courant de ligne I_l traversant l'inductance (L) du filtre à l'instant t_i , une tension U_{ci} entre les points (38, 40) de sortie du filtre à l'instant t_i , une tension de ligne U_l entre les points (34, 36) d'entrée du filtre, caractérisé en ce que le véhicule comporte :

- un calculateur (54) d'une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un courant continu I_u traversant le premier point (38) de sortie entre l'instant t_i et un instant t_{i+1} , cette consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du filtre de manière à ce que la tension U_c soit égale à une consigne prédéterminée de tension U_{cc} à l'instant t_{i+1} , ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les intensités I_{li} , I_{li+1} du courant I_l de ligne respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , les tensions U_{ci} et U_{ci+1} entre les points (38, 40) de sortie du filtre respectivement aux instants t_i et t_{i+1} , la tension moyenne de ligne $\bar{U}_l$ entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$,

- une unité (56) de commande du convertisseur électrique pour produire un courant I_u traversant le point (38) de sortie du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les instants t_i et t_{i+1} étant strictement inférieur à 5τ .

5 16. Véhicule électrique comportant :

- un bus DC formé de deux conducteurs (26, 28),
- au moins un moteur (16) de traction du véhicule électrique ayant une constante de temps statorique τ ,

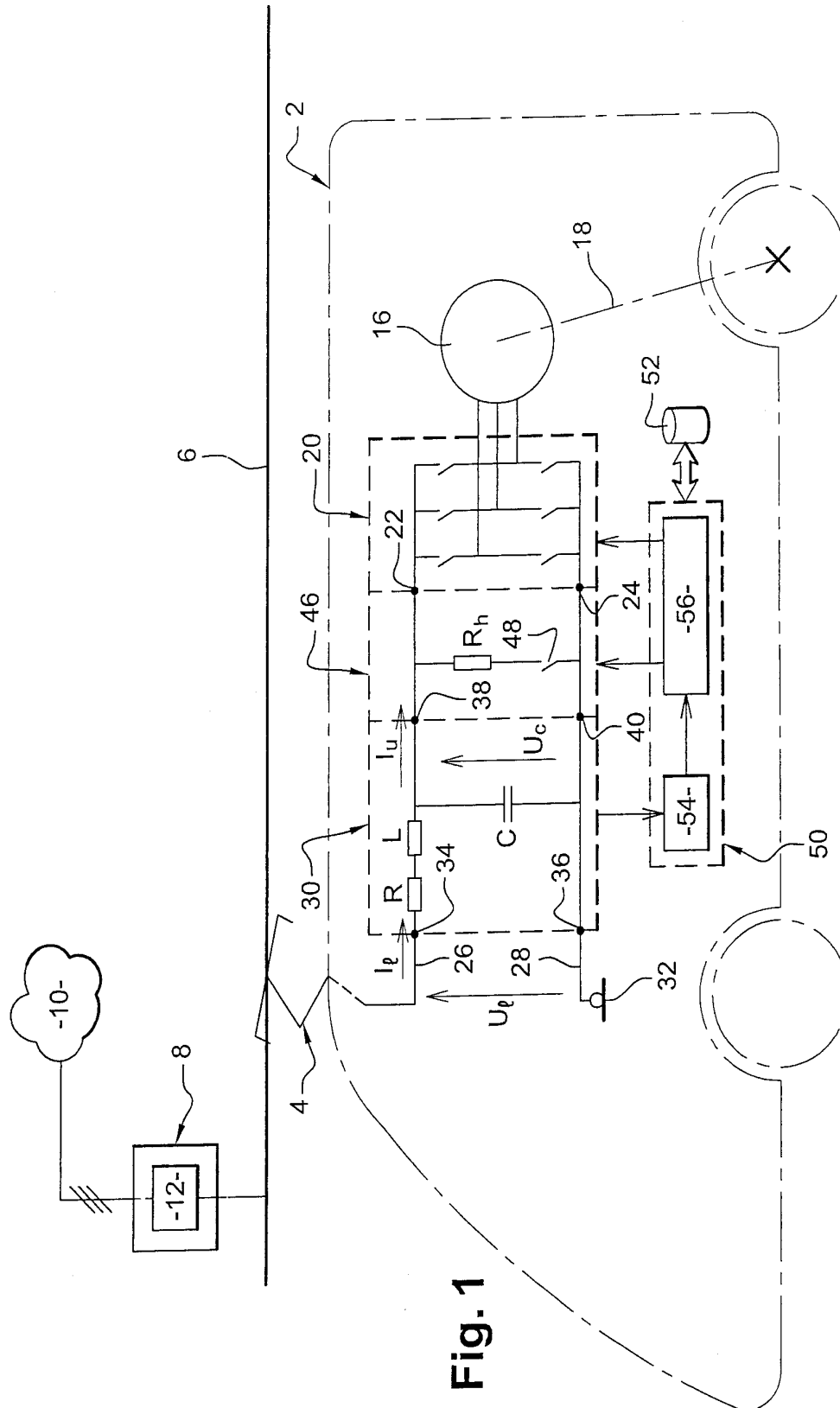
10 - un convertisseur électrique commandable (20) propre à faire varier le couple du moteur de traction,

- un filtre (30) passe-bas RLC comportant deux points (34, 36) d'entrée électriquement raccordés, respectivement, aux deux conducteurs (26, 28) du bus DC et des premier et second points (38, 40) de sortie électriquement raccordés au convertisseur électrique (20),

15 - des capteurs (60, 62, 64) ou des estimateurs propres à mesurer ou à estimer l'intensité I_{li} d'un courant de ligne I_l traversant l'inductance (L) du filtre à l'instant t_i , une tension U_{ci} entre les points (38, 40) de sortie du filtre à l'instant t_i , une tension U_l entre les points (34, 36) d'entrée du filtre,
caractérisé en ce que le véhicule comporte :

20 - un calculateur (54) d'une consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ pour l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ d'un courant continu I_u traversant le premier point (38) de sortie du filtre entre l'instant t_i et un instant t_{i+1} , cette consigne de courant $\bar{I}_{uc}$ étant établie à partir des équations d'états discrétisées du filtre de manière à ce que l'intensité du courant de ligne I_l soit égale à une consigne de courant de ligne I_{lc} prédéterminée à l'instant t_{i+1} ,
25 ces équations d'états discrétisées reliant entre elles les intensités I_{li} , $I_{l,i+1}$ du courant de ligne I_l , respectivement, aux instants t_i et t_{i+1} , les tensions U_{ci} et $U_{c,i+1}$ entre les points (38, 40) de sortie du filtre, respectivement, aux instants t_i et t_{i+1} , la tension moyenne $\bar{U}_l$ de la ligne entre les instants t_i et t_{i+1} et l'intensité moyenne $\bar{I}_u$, et

30 - une unité (56) de commande du convertisseur électrique (20) pour produire un courant I_u traversant le point (38) de sortie du filtre dont l'intensité moyenne $\bar{I}_u$ entre les instants t_i et t_{i+1} est égale à la consigne de courant $\bar{I}_{uc}$, l'intervalle T de temps entre les instants t_i et t_{i+1} étant strictement inférieur à 5τ .



2/5

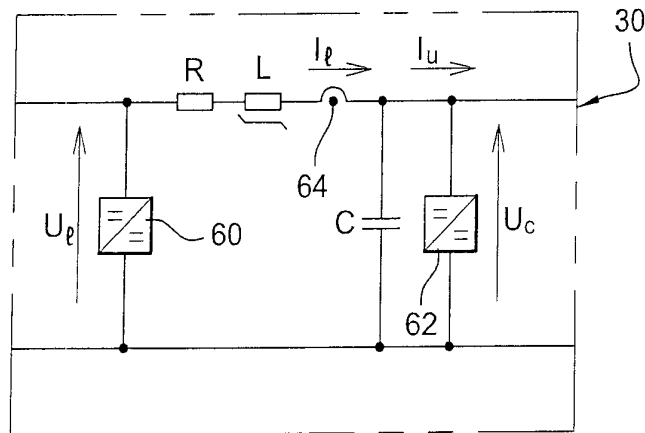


Fig. 2

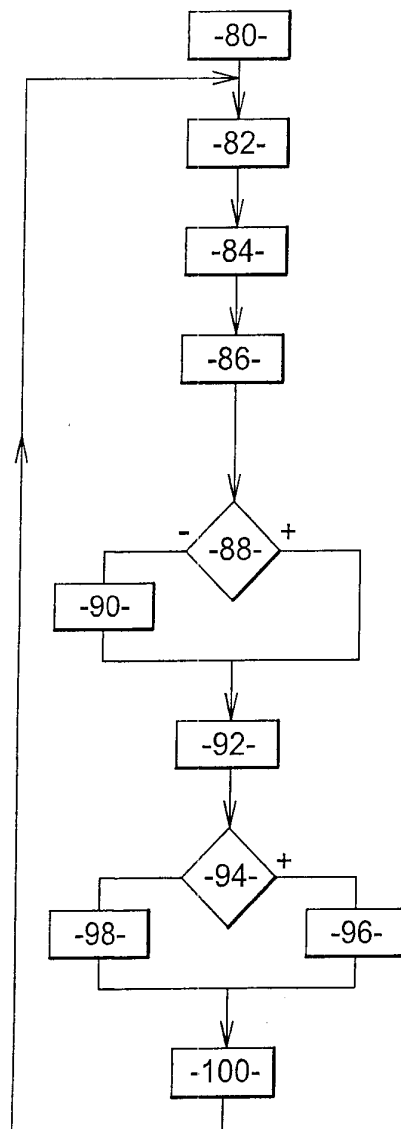


Fig. 3

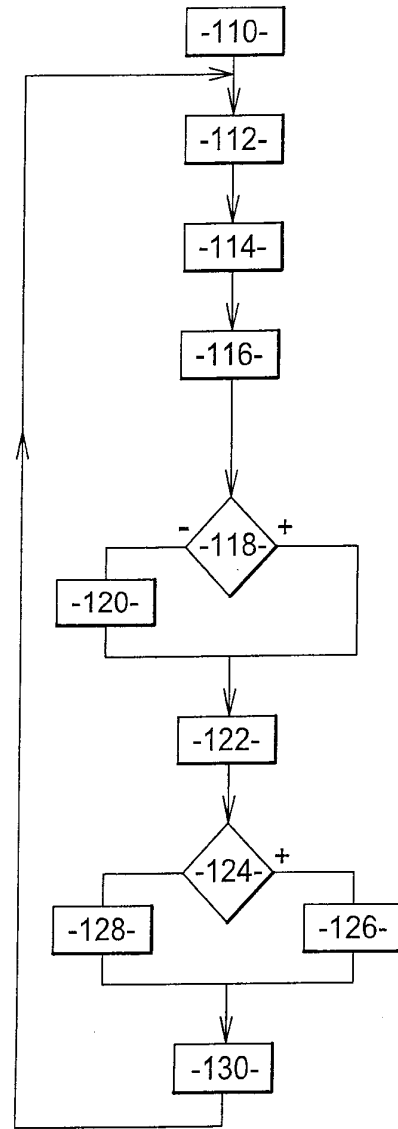
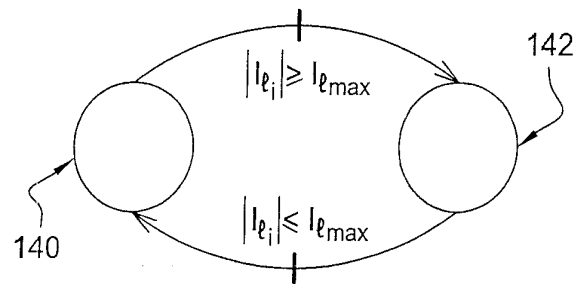
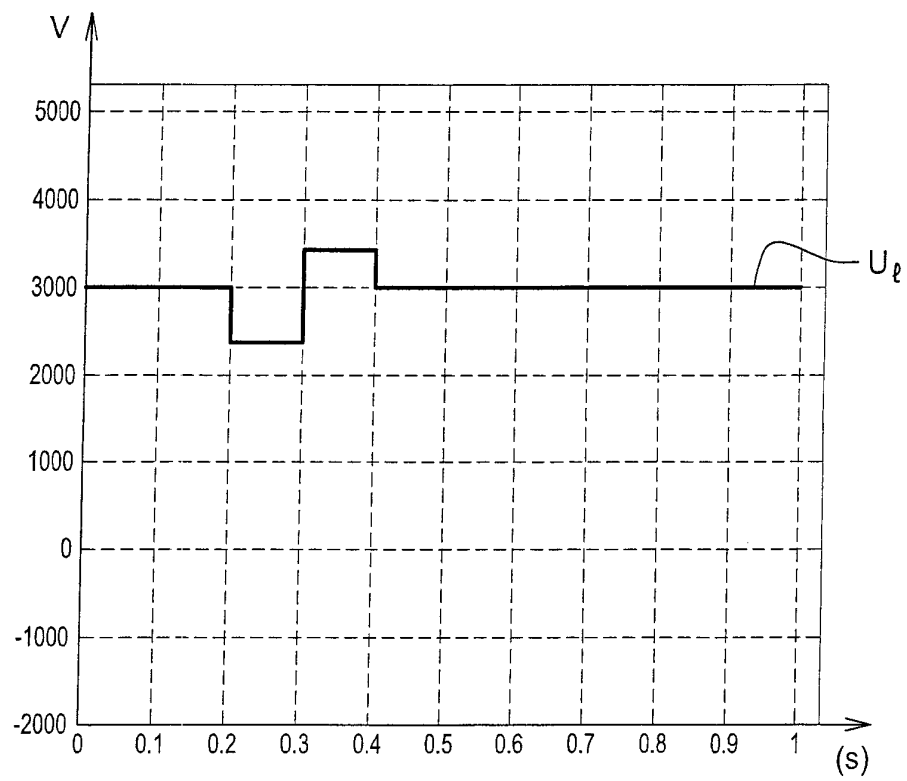
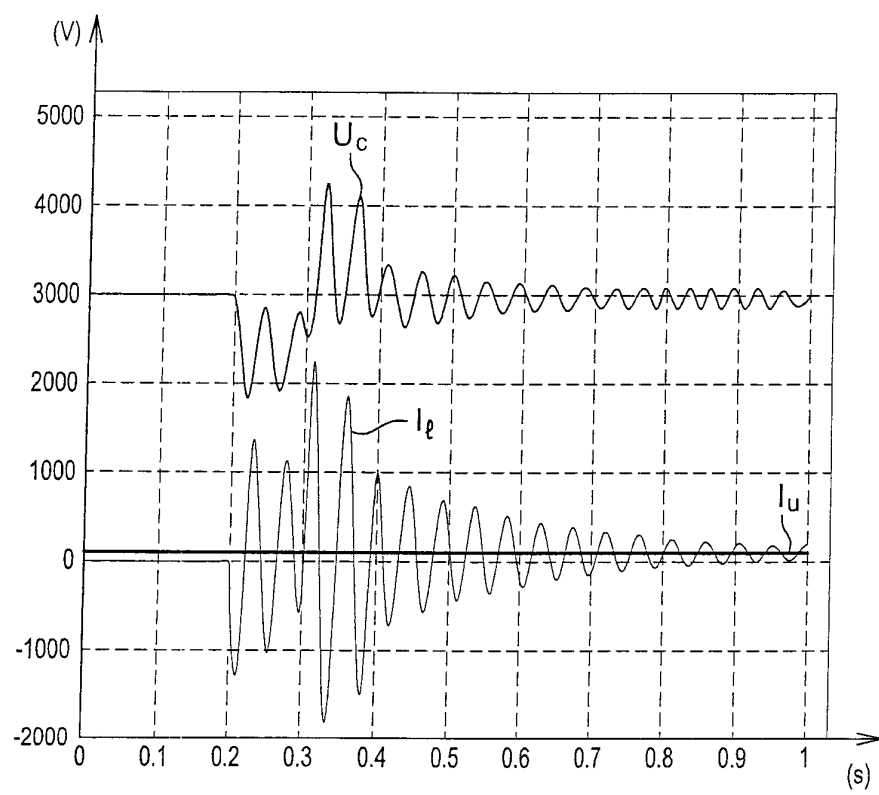


Fig. 4

3/5

**Fig. 5****Fig. 6**

4/5

**Fig. 7**

5/5

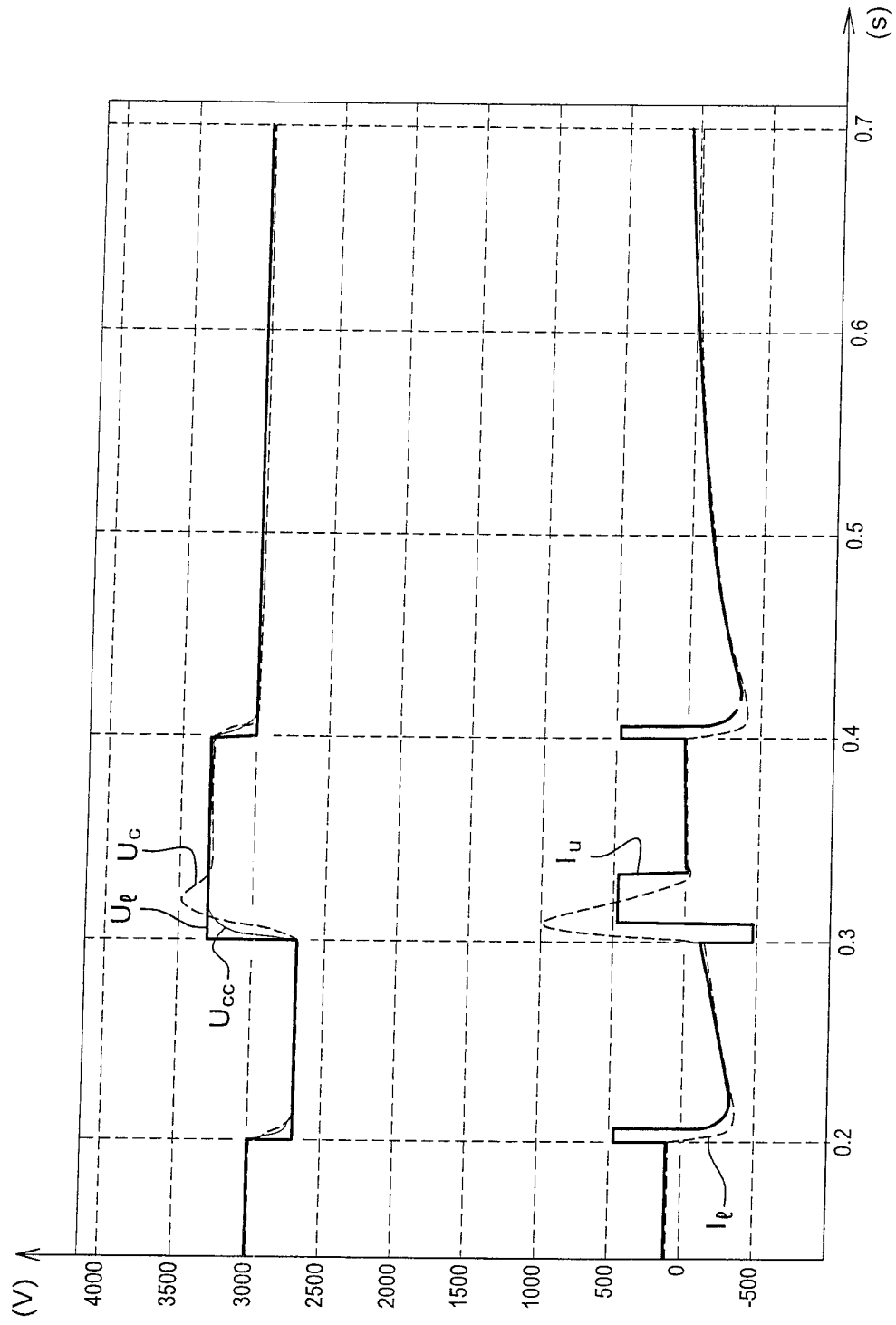


Fig. 8

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 695584
FR 0703719

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	JP 60 059904 A (HITACHI LTD) 6 avril 1985 (1985-04-06) * abrégé; figure 1 *	1-16	H02M1/15 B60L9/00
A	JP 2005 318683 A (TOKYO SHIBAURA ELECTRIC CO; HIGASHI NIPPON RYOKAKU TETSUDO) 10 novembre 2005 (2005-11-10) * abrégé; figure 14 *	1-16	
A	TAKAO KAWABATA ET AL: "DEAD BEAT CONTROL OF THREE PHASE PWM INVERTER" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 5, no. 1, janvier 1990 (1990-01), pages 21-28, XP000103609 ISSN: 0885-8993 * le document en entier *		
A	KOJIMA M ET AL: "NOVEL VECTOR CONTROL SYSTEM USING DEADBEAT-CONTROLLED PWM INVERTER WITH OUTPUT LC FILTER" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 40, no. 1, janvier 2004 (2004-01), pages 162-169, XP001226166 ISSN: 0093-9994 * le document en entier *		
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H02M H02P B60L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
28 janvier 2008		Braccini, Roberto	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE**RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0703719 FA 695584**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **28-01-2008**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 60059904 A	06-04-1985	JP 2551549 B2	06-11-1996
JP 2005318683 A	10-11-2005	AUCUN	