

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

11 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 121 193

21 N° d'enregistrement national : 21 02892

51 Int Cl⁸ : F 16 K 17/20 (2020.12), F 16 K 1/04, 31/02, G 05 B 15/00, G 05 D 7/06

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 23.03.21.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 30.09.22 Bulletin 22/39.

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 :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : Centre National d'Études Spatiales Etablissement public — FR, CONCEPTION DE SYSTEMES ET TECHNOLOGIE MECANIQUE (CSTM) Société à responsabilité limitée — FR, INSTITUT CATHOLIQUE D'ARTS ET METIERS (ICAM) Association (loi de 1901) — FR et CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public à caractère scientifique et technologique — FR.

72 Inventeur(s) : DESCHAUX Flavien, ARIBA Yassine, De SEZE Damien, GOUAISBAUT Frédéric et DUGUE François.

73 Titulaire(s) : Centre National d'Études Spatiales Etablissement public, CONCEPTION DE SYSTEMES ET TECHNOLOGIE MECANIQUE (CSTM) Société à responsabilité limitée, INSTITUT CATHOLIQUE D'ARTS ET METIERS (ICAM) Association (loi de 1901), CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (EPST).

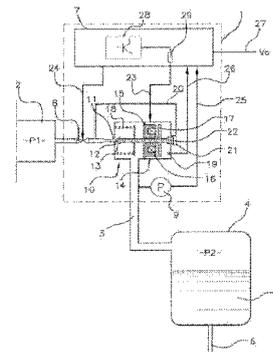
74 Mandataire(s) : CABINET GERMAIN ET MAUREAU.

54 Procédé de commande d'un actionneur électromagnétique d'un détendeur, et actionneur et détendeur configuré pour mettre en œuvre ledit procédé.

57 Détendeur (1) à commande électronique, comportant une vanne (10) commandée insérée entre une source (2) à une première pression (P1) et une sortie (3) à une seconde pression (P2), un capteur de pression (9) adapté pour mesurer la seconde pression et un calculateur (7) adapté pour commander la vanne (10) de sorte à générer une perte de charge entre la source et la sortie en permettant d'asservir la seconde pression (P2) à une pression de consigne (Pref), la vanne (10) comprenant un actionneur (14) pour entraîner un organe (13) de restriction d'une section de passage (11) du fluide, entre la source (2) et la sortie (3) de fluide, de manière à faire varier ladite section de passage, la restriction (11) se faisant au moyen d'un orifice (12) de passage du fluide et un organe obturateur (13) placé dans l'axe de l'orifice et agencé pour qu'un déplacement axial de l'organe obturateur (13) entraîne une variation de la section de passage (11) du fluide, le détendeur (1) comportant un capteur de position (19) de l'organe obturateur (13), caractérisé en ce que le calculateur (7) fait converger, selon une première loi de commande (LC1), la position (X1) l'organe obturateur (13) vers une position de consigne (Yr), la position de consigne (Yr) étant déterminée par une deuxième loi de commande (LC2) pour faire converger la seconde pression (P2) vers la pression de consigne (Pref), sur la base d'un modèle (MD) d'un débit (Dcol) du détendeur

(1), ladite deuxième loi de commande (LC2) étant déterminée en outre sur la base d'un modèle (MP) de la seconde pression (P2) fonction du débit du détendeur (Dcol) et d'un débit de consommation (Ds) en aval de la sortie (3) de fluide.

Figure 2



FR 3 121 193 - A1



Description

Titre de l'invention : Procédé de commande d'un actionneur électromagnétique d'un détendeur, et actionneur et détendeur configuré pour mettre en œuvre ledit procédé

- [0001] La présente invention concerne le domaine des actionneurs électromagnétiques, configurés en particulier pour actionner un détendeur à commande électronique, plus particulièrement un tel détendeur adapté pour réguler la pression d'un fluide en aval du détendeur.
- [0002] Il est connu d'utiliser un actionneur électromagnétique pour actionner un détendeur. Il est en particulier connu de commander l'actionneur selon une tension déterminée pour produire une force électromagnétique donnée et obtenir ainsi un positionnement précis d'un clapet de soupape d'un détendeur, par exemple, ou d'un piston de pompe, ou pour d'autres applications de l'actionneur électromagnétique, par exemple pour le contrôle actif antivibratoire d'une structure.
- [0003] La loi de commande pour les actionneurs électromagnétiques connus ne permet cependant pas d'obtenir un débit précis à partir d'une position de clapet donnée.
- [0004] L'invention a donc pour but de proposer une solution à tout ou partie de ces problèmes.
- [0005] A cet effet, la présente invention concerne un détendeur à commande électronique, du type comportant une vanne commandée insérée entre une source de fluide à une première pression et une sortie de fluide à une seconde pression, la seconde pression étant inférieure à la première pression, un capteur de pression adapté pour mesurer la seconde pression et un calculateur de commande adapté pour commander la vanne de telle sorte que la vanne génère une perte de charge entre la source de fluide et la sortie permettant d'asservir la seconde pression à une pression de consigne;
- la vanne commandée comprenant un actionneur adapté pour restreindre une section de passage du fluide, entre la source et la sortie de fluide, de manière à faire varier ladite section de passage,
 - la restriction se faisant au moyen d'un orifice de passage du fluide et d'un organe obturateur placé dans l'axe de l'orifice et agencé pour qu'un déplacement axial de l'organe obturateur entraîne une variation de la section de passage du fluide,
 - l'organe obturateur étant entraîné par l'actionneur,
 - le détendeur comportant un capteur de position de l'organe obturateur, caractérisé en ce que le calculateur de commande est adapté pour faire converger, selon une première loi de commande, la position de l'organe obturateur vers une position de consigne, la position de consigne étant déterminée par une deuxième loi de

commande pour faire converger la seconde pression vers la pression de consigne, sur la base d'un modèle d'un débit du détendeur, le débit du détendeur étant le débit du fluide s'écoulant à travers la section de passage entre le détendeur et la sortie de fluide, ledit modèle du débit du détendeur étant défini en fonction de la position de l'organe obturateur, ladite deuxième loi de commande étant déterminée en outre sur la base d'un modèle de la seconde pression fonction du débit du détendeur et d'un débit de consommation en aval de la sortie de fluide.

[0006] Selon un mode de réalisation, l'invention comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, seules ou en combinaison techniquement acceptable.

[0007] Selon un mode de réalisation, la dynamique de l'organe obturateur n'est pas prise en compte, autrement dit dans lequel la première loi de commande est telle que la position de l'organe obturateur est égale à la position de consigne, et dans lequel le modèle de la seconde pression est un modèle linéaire, sans saturation du débit.

[0008] Selon un mode de réalisation, le modèle linéaire sans saturation du débit est défini par l'équation :

[0009] [Math.1]

$$\dot{P}_2 = K_s (D_{col} - D_s)$$

[0010] Selon un mode de réalisation, la dynamique de l'organe obturateur n'est pas prise en compte, autrement dit dans lequel la première loi de commande est telle que la position de l'organe obturateur est égale à la position de consigne, et dans lequel le modèle de la seconde pression est un modèle linéaire, avec saturation du débit.

[0011] Selon un mode de réalisation le modèle linéaire avec saturation du débit est défini par les équations :

[0012] [Math.2]

$$\dot{P}_2 = K_s (sat_1(D_{col}) - D_s)$$

[0013] avec :

[0014] [Math.3]

$$sat_1(D_{col}) = \begin{cases} D_{max} & \text{si } D_{col} > D_{max}, \\ D_{col} & \text{si } D_{min} \leq D_{col} \leq D_{max} \\ D_{min} & \text{si } D_{col} < D_{min}. \end{cases}$$

[0015] Selon un mode de réalisation, la deuxième loi de commande est une loi de type proportionnelle intégrale saturée, et dans lequel le modèle de la seconde pression est un modèle linéaire avec saturation du débit.

[0016] Selon un mode de réalisation, la deuxième loi de commande, de type proportionnelle

intégrale saturée, selon le modèle linéaire détermine la position de consigne selon l'équation :

[0017] [Math.4]

$$y_r = \frac{1}{c} \left(\text{sat}_1 \left((K_p(P_{ref} - F_2) + K_i \int_0^t (P_{ref} - F_2(\theta)) d\theta) - d \right) \right)$$

[0018] Selon un mode de réalisation, la deuxième loi de commande est une loi de type proportionnelle intégrale saturée, et dans lequel le modèle de la seconde pression est un modèle non linéaire avec saturation du débit.

[0019] Selon un mode de réalisation, la deuxième loi de commande, de type proportionnelle intégrale saturée selon le modèle non linéaire de la seconde pression, détermine la position de consigne selon l'équation:

[0020] [Math.5]

$$y_r = -\sqrt{d_1 \text{sat}_1 \left(K_p(P_{ref} - F_2) + K_i \int_0^t (P_{ref} - F_2(\theta)) d\theta \right) + d_2 + c_2}$$

[0021] Selon un mode de réalisation, l'actionneur est un actionneur électromagnétique à réluctance variable comprenant une armature ferromagnétique fixe, un bobinage d'aimantation solidaire de cette armature et un équipage mobile en translations alternatives, solidaire de l'organe obturateur, l'actionneur étant agencé pour qu'un déplacement de l'équipage mobile entraîne un déplacement axial de l'organe obturateur par rapport à l'orifice de passage du fluide, la première loi de commande étant déterminée pour faire converger la position vers la position de consigne en appliquant une tension aux bornes du bobinage pour produire une force magnétique désirée s'appliquant à l'équipage mobile de manière à entraîner le déplacement axial de l'organe obturateur vers la position de consigne.

[0022] Selon un mode de réalisation, la première loi de commande est basée sur un premier modèle non saturé de calcul de la force magnétique désirée, le premier modèle non saturé ne prenant pas en compte une saturation magnétique de l'armature ferromagnétique.

[0023] Selon un mode de réalisation, la première loi de commande est basée sur un deuxième modèle non saturé de calcul de la force magnétique désirée, le deuxième modèle non saturé prenant en compte un épanouissement des lignes de champ dans un espace compris entre l'armature ferromagnétique et l'équipage mobile.

[0024] Selon un mode de réalisation, la première loi de commande est basée sur un modèle saturé de calcul de la force magnétique, le modèle saturé prenant en compte la saturation magnétique de l'armature ferromagnétique, et un épanouissement des lignes de champ dans un espace compris entre l'armature ferromagnétique et l'équipage mobile.

- [0025] Selon un mode de réalisation, le modèle saturé de calcul de la force magnétique désirée comprend une première partie du modèle applicable lorsque qu'un courant qui circule dans le bobinage d'aimantation est inférieur à un courant de saturation, et une deuxième partie du modèle applicable lorsque le courant est supérieur au courant de saturation, la deuxième partie du modèle étant identifiée à partir de mesures de la force magnétique désirée réalisées, pour différentes valeurs du courant supérieures au courant de saturation, au cours d'une phase d'identification de la deuxième partie du modèle.
- [0026] Selon un mode de réalisation, la première loi de commande comprend en outre un effet intégral pour une limiter un bruit dû à une reconstruction d'une vitesse de l'organe obturateur estimée à partir de la position mesurée de l'organe obturateur.
- [0027] Selon un mode de réalisation, la première loi de commande comprend en outre un effet intégral pour compenser une erreur de modélisation.
- [0028] Selon un mode de réalisation, le détendeur comporte en outre un dispositif élastique adapté pour rappeler l'organe obturateur dans une position telle que l'équipage mobile est distant de l'armature ferromagnétique fixe.
- [0029] Selon un mode de réalisation, le détendeur comporte un dispositif de compensation au moins partielle des efforts exercés par la pression du fluide sur l'organe obturateur.
- [0030] Pour sa bonne compréhension, un mode de réalisation et/ou de mise en oeuvre de l'invention est décrit en référence aux dessins ci-annexés représentant, à titre d'exemple non limitatif, une forme de réalisation ou de mise en oeuvre respectivement d'un dispositif et/ou d'un procédé selon l'invention. Les mêmes références sur les dessins désignent des éléments similaires ou des éléments dont les fonctions sont similaires.
- [0031] [fig.1] est une représentation schématique d'un détendeur selon l'invention.
- [0032] [fig.2] est une représentation schématique plus détaillée d'un détendeur selon l'invention.
- [0033] [fig.3] est une représentation schématique d'un mode d'opération d'une loi de commande du détendeur selon l'invention.
- [0034] [fig.4] est une représentation schématique d'un premier mode d'opération simplifié de la loi de commande du détendeur selon l'invention, dans lequel le modèle de positionnement de l'actionneur est négligé.
- [0035] [fig.5] est une représentation schématique d'un deuxième mode d'opération simplifié de la loi de commande du détendeur selon l'invention.
- [0036] [fig.6] est une représentation schématique d'un troisième mode d'opération de la loi de commande du détendeur selon l'invention.
- [0037] [fig.7] est une représentation schématique du circuit magnétique de l'actionneur du détendeur selon l'invention.

- [0038] Comme cela est illustré sur la [fig.1], un détendeur 1 de pression est un dispositif 1 utilisé pour détendre un fluide contenu dans un réservoir ou une source 2 à une première pression P1, typiquement très élevée, vers une sortie 3 configurée pour déboucher en aval du dispositif 1 dans un autre réservoir 4 à une pression P2 plus faible, par exemple quelques bars ou dizaines de bars, selon les utilisations. Par exemple, dans le système de propulsion d'un lanceur spatial, le fluide pourra être de l'hélium contenu dans la source 2 à une pression P1 de 400 bars, le détendeur 1 étant configuré pour détendre l'hélium de la source 2 vers la sortie 3 se déversant dans une cavité 4 d'un réservoir de combustible 5 de manière à maintenir ledit combustible 5 à une pression P2 de quelques bars, en amont d'une chambre de combustion 6.
- [0039] Comme cela est illustré de manière détaillée sur la [fig.2], un détendeur 1 selon un mode d'opération de l'invention comprend une vanne 10 commandée, insérée entre la source 2 de fluide à une première pression P1 et la sortie 3 de fluide à une seconde pression P2 ; le détendeur 1 comprend en outre un capteur de pression 9 adapté pour mesurer la seconde pression P2 et un calculateur 7 de commande adapté pour commander la vanne 10 de telle sorte que la vanne génère une perte de charge entre la source de fluide et la sortie permettant d'asservir la seconde pression P2 à une pression de consigne Pref ; la vanne 10 commandée comprend un actionneur 14 adapté pour restreindre une section de passage 11 du fluide, entre le détendeur 1 et la sortie 3 de fluide, de manière à faire varier ladite section de passage ; la restriction se faisant au moyen d'un orifice 12 de passage du fluide et d'un organe obturateur 13 placé dans l'axe de l'orifice et agencé pour qu'un déplacement axial de l'organe obturateur 13 entraîne une variation de la section de passage du fluide ; l'organe obturateur 13 étant entraîné par l'actionneur (14) ; le détendeur 1 comprend également un capteur de position 19 configuré pour mesurer une position X1 de l'organe obturateur 13 le long de la direction de déplacement de l'organe obturateur 13.
- [0040] Comme cela est représenté sur la [fig.3], le calculateur 7 de commande du détendeur 1 est adapté pour faire converger, selon une première loi de commande LC1, la position X1 de l'organe obturateur 13 vers une position de consigne Yr, la position de consigne Yr étant déterminée par une deuxième loi de commande LC2 pour faire converger la seconde pression P2 vers la pression de consigne Pref, sur la base d'un modèle MD d'un débit Dcol du détendeur 1, le débit Dcol du détendeur 1 étant le débit du fluide s'écoulant à travers la section de passage entre le détendeur 1 et la sortie 3 de fluide; ledit modèle MD du débit Dcol du détendeur 1 est défini en fonction de la position X1 de l'organe obturateur 13 ; en outre, ladite deuxième loi de commande LC2 est déterminée sur la base d'un modèle MP de la seconde pression P2, ledit modèle MP de la seconde pression P2 étant fonction du débit Dcol du détendeur 1 et d'un débit de consommation Ds en aval de la sortie 3 de fluide ; le débit de

consommation D_s en aval de la sortie 3 de fluide est, par exemple, déterminé par la consommation de combustible 5 dans la chambre de combustion en aval du réservoir 4.

[0041] Selon un exemple de réalisation, l'actionneur (14) est un actionneur électromagnétique à réluctance variable comprenant une armature (15) ferromagnétique fixe, un bobinage (16) d'aimantation solidaire de cette armature et un équipage mobile (17) en translations alternatives, solidaire de l'organe obturateur (13), l'actionneur étant agencé pour qu'un déplacement de l'équipage mobile entraîne un déplacement axial de l'organe obturateur par rapport à l'orifice (12) de passage du fluide, la première loi de commande (LC1) étant déterminée pour faire converger la position (X_1) vers la position de consigne (Y_r) en appliquant une tension (U) aux bornes du bobinage (16) pour produire une force magnétique désirée (F_d) s'appliquant à l'équipage mobile de manière à entraîner le déplacement axial de l'organe obturateur (13) vers la position de consigne (Y_r).

[0042] En particulier, lorsque la dynamique de l'organe obturateur n'est pas prise en compte, autrement dit la position X_1 de l'organe obturateur 13 est égale à la position de consigne Y_r , comme cela est illustré sur la [fig.4], le modèle MP de la seconde pression P2 est par exemple un modèle linéaire, sans saturation du débit.

[0043] Plus particulièrement, le modèle linéaire sans saturation du débit est défini par l'équation :

[0044] [Math.1]

$$\dot{P}_2 = K_s (D_{col} - D_s)$$

[0045] dans laquelle \dot{P}_2 est la dérivée temporelle de la seconde pression P2, et dans laquelle K_s est une constante.

[0046] Par exemple, sous certaines hypothèses d'écoulement d'un fluide gazeux, en régime de compression et de détente adiabatique, avec une température constante T_2 du fluide dans la cavité 5 du réservoir 4, on peut établir que :

[0047] [Math.6]

$$K_s = \frac{rT_2}{V_2}$$

[0048] où V_2 est le volume du fluide dans la cavité 5 du réservoir 4, et r est la constante de gaz parfait divisée par la masse molaire du fluide gazeux.

[0049] Selon un autre exemple de réalisation, illustré sur la [fig.5], la dynamique de l'organe obturateur 13 n'étant toujours pas prise en compte, autrement dit la position X_1 de l'organe obturateur 13 étant toujours supposée égale à la position de consigne Y_r , le modèle MP de la seconde pression P2 est par exemple un modèle linéaire, avec saturation du débit.

[0050] Plus particulièrement, le modèle linéaire avec saturation du débit est défini par les équations :

[0051] [Math.2]

$$\dot{P}_2 = K_s \left(\text{sat}_1(D_{col}) - D_s \right)$$

[0052] et:

[0053] [Math.3]

$$\text{sat}_1(D_{col}) = \begin{cases} D_{max} & \text{si } D_{col} > D_{max}, \\ D_{col} & \text{si } D_{min} \leq D_{col} \leq D_{max} \\ D_{min} & \text{si } D_{col} < D_{min}. \end{cases}$$

[0054] Selon ce modèle, le débit D_{col} du détendeur 1 est borné à l'intérieur d'un intervalle compris entre D_{min} et D_{max} .

[0055] Selon un autre exemple de réalisation, illustré à la [fig.6], la deuxième loi de commande LC2 est une loi de type proportionnelle intégrale saturée, et le modèle MP de la seconde pression P2 est un modèle linéaire avec saturation du débit.

[0056] Plus particulièrement, la deuxième loi de commande LC2, de type proportionnelle intégrale saturée, détermine la position de consigne Y_r selon l'équation :

[0057] [Math.4]

$$y_r = \frac{1}{c} \left(\text{sat}_1 \left((K_p(P_{ref} - P_2) + K_i \int_0^t (P_{ref} - P_2(\theta)) d\theta) - d \right) \right)$$

[0058] dans laquelle K_p et K_i sont des gains constants, et dans laquelle d est un paramètre d'un modèle MD du débit D_{col} du détendeur 1 ; selon un exemple dudit modèle MD du débit D_{col} du détendeur 1, ledit débit D_{col} du détendeur 1 est une fonction linéaire de la position X_1 de l'organe obturateur 13, définie par l'équation :

[0059] [Math. 7]

$$D_{col}(X_1) = c X_1 + d$$

[0061] où c est un autre paramètre de cette fonction linéaire.

[0062] Avantagement, on choisira pour le paramètre c , une valeur égale au produit d'un premier coefficient c_s , et d'une masse volumique et d'une vitesse du fluide au col du détendeur, i.e. là où la section de passage du détendeur est la plus faible pour la position déterminée X_1 de l'organe obturateur 13; on choisira en outre pour le paramètre d , une valeur égale au produit d'un deuxième coefficient d_s et de la masse volumique et de la vitesse du fluide au col du détendeur; le premier coefficient c_s et le deuxième coefficient d_s sont les deux paramètres d'une fonction linéaire affine qui représente la section de passage S_{col} du détendeur 1 en fonction d'une distance e , ou entrefer, séparant l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17 en

translations alternatives, solidaire de l'organe obturateur 13, de sorte que :

[0063] [Math. 8]

[0064] $S_{col}(e) = c_s e + d_s$

[0065] Selon un autre exemple de réalisation, la deuxième loi de commande LC2 est une loi de type proportionnelle intégrale saturée, et le modèle MP de la seconde pression P2 est un modèle non linéaire avec saturation du débit.

[0066] Plus particulièrement, la deuxième loi de commande LC2, de type proportionnelle intégrale saturée, détermine la position de consigne Y_r selon l'équation :

[0067] [Math.5]

$$y_r = -\sqrt{d_1 \text{sat}_1 \left(K_p (P_{ref} - P_2) + K_i \int_0^t (P_{ref} - P_2(\theta)) d\theta \right) + d_2 + c_2}$$

[0068] dans laquelle K_p et K_i sont les gains constants, et dans laquelle d_2 et c_2 sont en particulier déterminés par les équations ci-dessous :

[0069] [Math. 9]

[0070] $c_1 = d - b^2$

[0071] [Math. 10]

[0072] $c_2 = -c/2b$

[0073] [Math. 11]

[0074] $d_2 = -c_1/b$

[0075] [Math. 12]

[0076] $d_1 = 1/b\rho_{col}C_{col}$

[0077] avec ρ_{col} = une masse volumique du fluide au col du détendeur, i.e. là où la section de passage du détendeur est la plus faible pour la position déterminée X_1 de l'organe obturateur 13 ,

[0078] et C_{col} = une vitesse du fluide au col du détendeur,

[0079] et où les paramètres b, c, et d sont les coefficients d'un modèle du second degré MD du débit D_{col} du détendeur 1 ; en fonction de la position X_1 de l'organe obturateur 13, ledit modèle étant défini par l'équation :

[0080] [Math. 13]

[0081] $D_{col}(X_1) = b (X_1)^2 + c X_1 + d$

[0082] Avantagement, on choisira pour le paramètre c, une valeur égale au produit d'un premier coefficient c_s , et de la masse volumique ρ_{col} et de la vitesse C_{col} du fluide au col du détendeur ; encore plus avantageusement, on choisira en outre pour le paramètre d, une valeur égale au produit d'un deuxième coefficient d_s et de la masse volumique ρ_{col} et de la vitesse C_{col} du fluide au col du détendeur; encore plus avantageusement, on choisira pour le paramètre b, une valeur égale au produit d'un troisième coefficient b_s , et de la masse volumique ρ_{col} et de la vitesse C_{col} du fluide au col du détendeur; le

premier coefficient c_s , le deuxième coefficient d_s , le troisième coefficient b_s , étant les coefficients d'une fonction du second degré, qui représente la section de passage S_{col} du détendeur 1 en fonction de l'entrefer e , séparant l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17 en translations alternatives, solidaire de l'organe obturateur 13, de sorte que :

[0083] [Math. 14]

[0084] $S_{col}(e) = b_s e^2 + c_s e + d_s$

[0085] L'entrefer e est déterminé, à une constante près, par la position X_1 de l'organe obturateur 13.

[0086] La première loi de commande LC1 est déterminée pour faire converger la position X_1 vers la position de consigne Y_r en appliquant une tension U aux bornes du bobinage 16 pour produire une force magnétique désirée F_d s'appliquant à l'équipage mobile de manière à entraîner le déplacement axial de l'organe obturateur 13 vers la position de consigne Y_r .

[0087] La force magnétique est une fonction d'un courant i qui circule dans le bobinage 16 d'aimantation, solidaire de l'armature ferromagnétique 15, et dépend d'une inductance L d'un circuit magnétique formé par le bobinage 16, de l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17. Cette inductance L dépend de l'entrefer e qui sépare l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17. Selon une formule connue de l'homme du métier la force magnétique F_{mag} créée par le circuit magnétique sur l'équipage mobile 17 peut s'écrire :

[0088] [Math.15]

$$F_{mag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(e)}{\partial e}$$

[0089] Un modèle de la force magnétique désirée est donc déterminé par un modèle correspondant de l'inductance du circuit magnétique formé par le bobinage 16 de l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17.

[0090] En particulier, selon un premier exemple, la première loi de commande LC1 est basée sur un premier modèle non saturé de calcul de la force magnétique désirée F_d , ledit premier modèle non saturé ne prenant pas en compte une saturation magnétique de l'armature ferromagnétique 15.

[0091] Pour être représentatif de la complexité des phénomènes magnétiques à prendre en compte, ce modèle non saturé, plus particulièrement selon un deuxième exemple, peut prendre en compte un épanouissement des lignes de champ dans un espace compris entre l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17.

[0092] Sur la [fig.7] représentant un exemple de réalisation d'un circuit magnétique formé par le bobinage 16 de l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17, une ligne de champ moyenne 30 du champ magnétique créée dans le circuit magnétique

par la circulation du courant dans le bobinage 16 non représenté sur la figure. Les sections S1 et S3 représentées sur la [fig.7], sont les sections d'un tube de flux magnétique dans l'air, dans l'espace de l'entrefer qui sépare l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17. Lesdites sections S1 et S3 dépendent de l'entrefer pour tenir compte d'un effet d'épanouissement des lignes de champ.

[0093] Sous l'hypothèse d'une absence d'inductance de fuite, un exemple de modèle non saturé ne prenant pas en compte une saturation magnétique de l'armature ferromagnétique 15, mais prenant en compte un effet d'épanouissement des lignes de champ sera basé sur une inductance L modélisée selon la formule :

[0094] [Math.16]

$$L = \frac{N^2}{\left(\frac{1}{\mu_0 S_1(e)} + \frac{1}{\mu_0 S_3(e)} \right) e}$$

[0095] Dans laquelle N est un nombre de spire du bobinage 16.

[0096] Encore plus particulièrement, selon un troisième exemple, la première loi de commande est basée sur un modèle saturé de calcul de la force magnétique, le modèle saturé prend en compte la saturation magnétique de l'armature ferromagnétique 15, et un épanouissement des lignes de champ dans un espace compris entre l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17. Dans ce cas, l'expression de la force magnétique utilise un modèle de connaissance issu de la théorie si le courant électrique est inférieur au courant de saturation et un modèle de comportement si le courant est supérieur au courant de saturation, modélisé selon la formule :

[0097] [Math.17]

$$F_{mag}(e, i) \begin{cases} F_{mag}^{lin} & \text{si } i \leq i_s(e), \\ F_{mag}^{sat} & \text{si } i > i_s(e). \end{cases}$$

[0098] dans laquelle i_s représente un courant de saturation, dépendant de l'entrefer e, i.e. de l'espace compris entre l'armature ferromagnétique 15 et l'équipage mobile 17.

[0099] Un exemple de modèle saturé prenant en compte une saturation magnétique de l'armature ferromagnétique 15, et un effet d'épanouissement des lignes de champ sera basé sur une inductance L modélisée selon la formule :

[0100] [Math.18]

$$L = \frac{N^2}{\frac{e}{\mu_0 S_3(e)} + \frac{l_{CM_1}}{\mu_0 \mu_r S_{CM_1}} + \frac{e}{\mu_0 S_1(e)} + \frac{l_{PM}}{\mu_0 \mu_r S_{PM}} + \frac{l_{CM_2}}{\mu_0 \mu_r S_{CM_2}} + \frac{l_{CM_3}}{\mu_0 \mu_r S_{CM_3}}}$$

[0101] Dans laquelle :

[0102] $-\mu_0$ = perméabilité magnétique du vide ;

[0103] $-\mu_r$ = perméabilité magnétique relative du matériau de l'armature ferromagnétique et

de l'équipage mobile ;

[0104] $-l_{PM}$ = épaisseur de la partie mobile en mm ;

[0105] $-S_{PM}$ = Section de la partie mobile en mm² ;

[0106] $-l_{CM1}$ = épaisseur de la partie fixe 1 en mm ;

[0107] $-S_{CM1}$ = Section de la partie fixe 1 en mm² ;

[0108] $-l_{CM2}$ = épaisseur de la partie fixe 2 en mm ;

[0109] $-S_{CM2}$ = Section de la partie fixe 2 en mm² ;

[0110] $-l_{CM3}$ = épaisseur de la partie fixe 3 en mm ;

[0111] $-S_{CM3}$ = Section de la partie fixe 3 en mm² ;

[0112] Pour être encore plus représentatif de la réalité, le modèle saturé de calcul de la force magnétique désirée (F_d) comprend une première partie du modèle applicable lorsque que le courant i qui circule dans le bobinage 16 d'aimantation est inférieur au courant de saturation i_s , et une deuxième partie du modèle applicable lorsque le courant i est supérieur au courant de saturation i_s .

[0113] Selon la première partie du modèle saturé, la force magnétique désirée (F_d) est décrite, de préférence, par l'expression :

[0114] [Math. 19]

[0115] $F_d =$

[0116] Selon la deuxième partie du modèle saturé, la force magnétique désirée F_d est décrite, de préférence, par une expression identifiée sur la base de mesures réalisées au cours d'une phase d'identification, pour des valeurs du courant i supérieures au courant de saturation i_s . Plus particulièrement, l'expression identifiée sur la base des mesures consiste en une interpolation entre des valeurs mesurées la force magnétique désirée F_d , enregistrées dans une table de valeurs mesurées correspondant à différentes valeurs du courant i , ou bien l'expression identifiée est une formule paramétrique dont les paramètres sont déterminés à partir des valeurs mesurées la force magnétique désirée F_d .

[0117] Plus particulièrement encore, le courant de saturation i_s est déterminé fonction de l'entrefer e selon une autre formule paramétrique identifiée sur la base de mesures.

[0118] Toutes les lois de commandes décrites ci-avant utilisent une valeur de la vitesse de l'équipage mobile 17, c'est-à-dire de l'organe obturateur 13. En l'absence de capteur de vitesse, une valeur de la vitesse est estimée par une méthode numérique à partir du signal de capteur de position. Cela introduit un bruit de reconstruction de la vitesse de l'organe obturateur. Pour limiter ledit bruit de reconstruction la première loi de commande comprend en outre une limitation du bruit par l'ajout d'un effet intégral à la première loi de commande.

[0119] Selon un exemple de réalisation, le détendeur selon l'invention comporte en outre un dispositif élastique 18 adapté pour rappeler l'organe obturateur 13 dans une position telle que l'équipage mobile 17 est distant de l'armature 15 ferromagnétique fixe.

[0120] Selon un exemple de réalisation, le détendeur selon l'invention comporte un dispositif de compensation 20, 21, 22 au moins partielle des efforts exercés par la pression du fluide sur l'organe obturateur 13.

Revendications

[Revendication 1]

Détendeur (1) à commande électronique, du type comportant une vanne (10) commandée insérée entre une source (2) de fluide à une première pression (P1) et une sortie (3) de fluide à une seconde pression (P2), la seconde pression étant inférieure à la première pression, un capteur de pression (9) adapté pour mesurer la seconde pression et un calculateur (7) de commande adapté pour commander la vanne (10) de telle sorte que la vanne génère une perte de charge entre la source de fluide et la sortie permettant d'asservir la seconde pression (P2) à une pression de consigne (P_{ref}) ;

- la vanne (10) commandée comprenant un actionneur (14) adapté pour restreindre une section de passage du fluide (11), entre la source (2) et la sortie (3) de fluide, de manière à faire varier ladite section de passage,
- la restriction se faisant au moyen d'un orifice (12) de passage du fluide et d'un organe obturateur (13) placé dans l'axe de l'orifice et agencé pour qu'un déplacement axial de l'organe obturateur (13) entraîne une variation de la section de passage du fluide,
- l'organe obturateur (13) étant entraîné par l'actionneur (14),
- le détendeur (1) comportant un capteur de position (19) de l'organe obturateur (13),

caractérisé en ce que le calculateur (7) de commande est adapté pour faire converger, selon une première loi de commande (LC1), la position (X_1) de l'organe obturateur (13) vers une position de consigne (Y_r), la position de consigne (Y_r) étant déterminée par une deuxième loi de commande (LC2) pour faire converger la seconde pression (P2) vers la pression de consigne (P_{ref}), sur la base d'un modèle (MD) d'un débit (D_{col}) du détendeur (1), le débit du détendeur (D_{col}) étant le débit du fluide s'écoulant à travers la section de passage entre le détendeur (1) et la sortie (3) de fluide, ledit modèle (MD) du débit du détendeur (D_{col}) étant défini en fonction de la position (X_1) de l'organe obturateur (13), ladite deuxième loi de commande (LC2) étant déterminée en outre sur la base d'un modèle (MP) de la seconde pression (P2) fonction du débit du détendeur (D_{col}) et d'un débit de consommation (D_s) en aval de la sortie (3) de fluide.

[Revendication 2]

Détendeur (1) selon la revendication 1, dans lequel la dynamique de l'organe obturateur n'est pas prise en compte, autrement dit dans lequel la première loi de commande (LC1) est telle que la position (X_1) de

l'organe obturateur (13) est égale à la position de consigne (Y_r), et dans lequel le modèle (MP) de la seconde pression (P2) est un modèle linéaire, sans saturation du débit.

[Revendication 3] Détendeur (1) selon la revendication 1, dans lequel la dynamique de l'organe obturateur n'est pas prise en compte, autrement dit dans lequel la première loi de commande (LC1) est telle que la position (X_1) de l'organe obturateur (13) est égale à la position de consigne (Y_r), et dans lequel le modèle (MP) de la seconde pression (P2) est un modèle linéaire, avec saturation du débit.

[Revendication 4] Détendeur (1) selon la revendication 1, dans lequel la deuxième loi de commande est une loi de type proportionnelle intégrale saturée, et dans lequel le modèle (MP) de la seconde pression (P2) est un modèle linéaire avec saturation du débit.

[Revendication 5] Détendeur (1) selon la revendication 1, dans lequel la deuxième loi de commande est une loi de type proportionnelle intégrale saturée, et dans lequel le modèle (MP) de la seconde pression (P2) est un modèle non linéaire avec saturation du débit.

[Revendication 6] Détendeur (1) selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel l'actionneur (14) est un actionneur électromagnétique à réluctance variable comprenant une armature (15) ferromagnétique fixe, un bobinage (16) d'aimantation solidaire de cette armature et un équipage mobile (17) en translations alternatives, solidaire de l'organe obturateur (13), l'actionneur étant agencé pour qu'un déplacement de l'équipage mobile entraîne un déplacement axial de l'organe obturateur par rapport à l'orifice (12) de passage du fluide, la première loi de commande (LC1) étant déterminée pour faire converger la position (X_1) vers la position de consigne (Y_r) en appliquant une tension (U) aux bornes du bobinage (16) pour produire une force magnétique désirée (F_d) s'appliquant à l'équipage mobile de manière à entraîner le déplacement axial de l'organe obturateur (13) vers la position de consigne (Y_r).

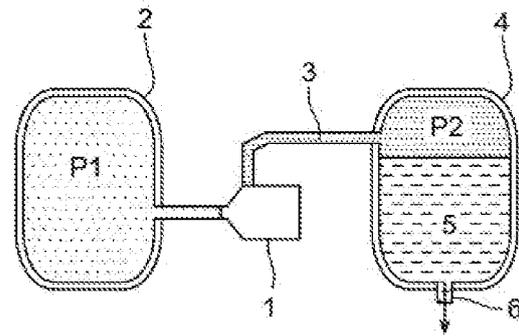
[Revendication 7] Détendeur (1) selon la revendication 4, dans lequel la première loi de commande (LC1) est basée sur un premier modèle non saturé de calcul de la force magnétique désirée (F_d), le premier modèle non saturé ne prenant pas en compte une saturation magnétique de l'armature ferromagnétique (15).

[Revendication 8] Détendeur (1) selon la revendication 4, dans lequel la première loi de commande est basée sur un deuxième modèle non saturé de calcul de la force magnétique désirée (F_d), le deuxième modèle non saturé prenant

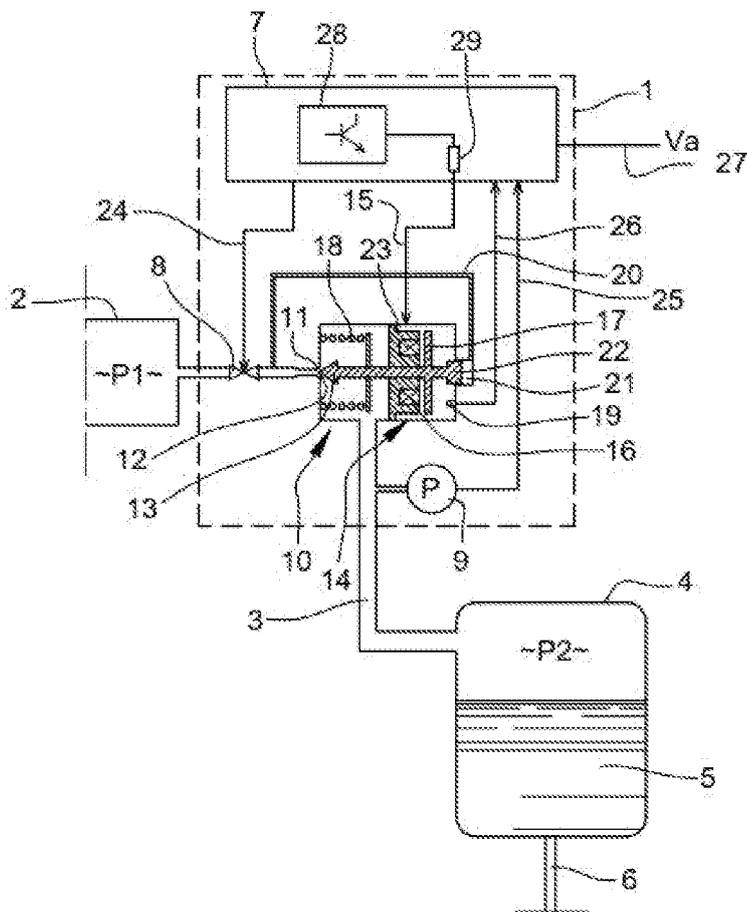
en compte un épanouissement des lignes de champ dans un espace compris entre l'armature ferromagnétique (15) et l'équipage mobile (17).

- [Revendication 9] Détendeur (1) selon la revendication 4, dans lequel la première loi de commande est basée sur un modèle saturé de calcul de la force magnétique désirée (F_d), le modèle saturé prenant en compte la saturation magnétique de l'armature ferromagnétique (15), et un épanouissement des lignes de champ dans un espace compris entre l'armature ferromagnétique (15) et l'équipage mobile (17).
- [Revendication 10] Détendeur (1) selon la revendication 9, dans lequel le modèle saturé de calcul de la force magnétique désirée (F_d) comprend une première partie du modèle applicable lorsque qu'un courant qui circule dans le bobinage 16 d'aimantation est inférieur à un courant de saturation, et une deuxième partie du modèle applicable lorsque le courant est supérieur au courant de saturation, la deuxième partie du modèle étant identifiée à partir de mesures de la force magnétique désirée (F_d) réalisées, pour différentes valeurs du courant supérieures au courant de saturation, au cours d'une phase d'identification de la deuxième partie du modèle.
- [Revendication 11] Détendeur (1) selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel la première loi de commande comprend en outre un effet intégral pour limiter un bruit dû à une reconstruction d'une vitesse de l'organe obturateur estimée à partir de la position mesurée de l'organe obturateur (13).
- [Revendication 12] Détendeur (1) selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel la première loi de commande comprend en outre un effet intégral pour compenser une erreur de modélisation.
- [Revendication 13] Détendeur selon l'une des revendications 6 à 11, caractérisé en ce qu'il comporte en outre un dispositif élastique (18) adapté pour rappeler l'organe obturateur (13) dans une position telle que l'équipage mobile (17) est distant de l'armature (15) ferromagnétique fixe.
- [Revendication 14] Détendeur selon l'une des revendications 1 à 12, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de compensation (20, 21, 22) au moins partielle des efforts exercés par la pression du fluide sur l'organe obturateur (13).

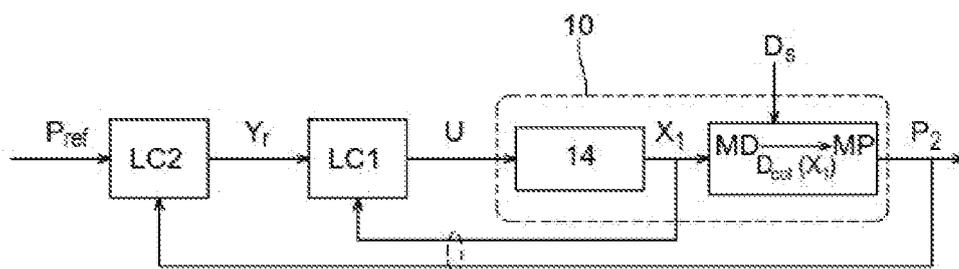
[Fig. 1]



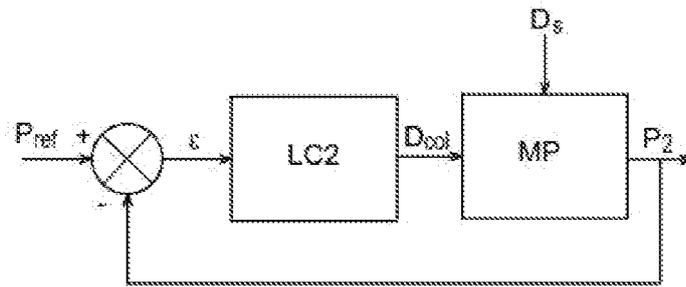
[Fig. 2]



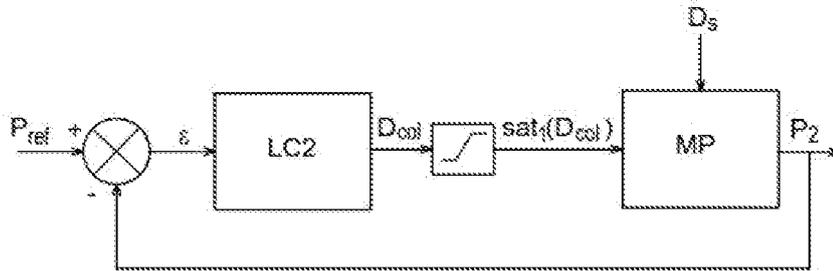
[Fig. 3]



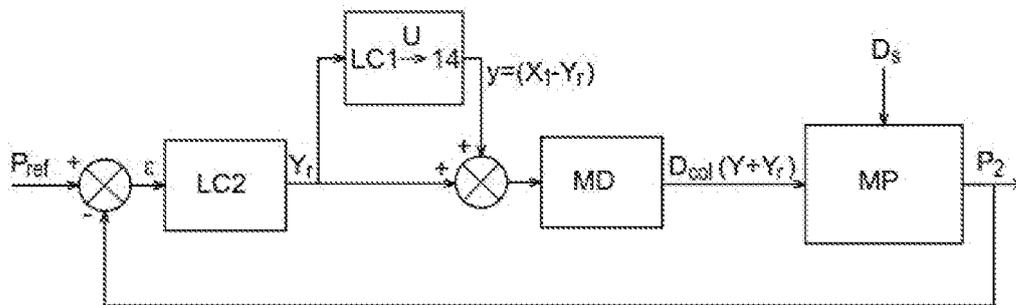
[Fig. 4]



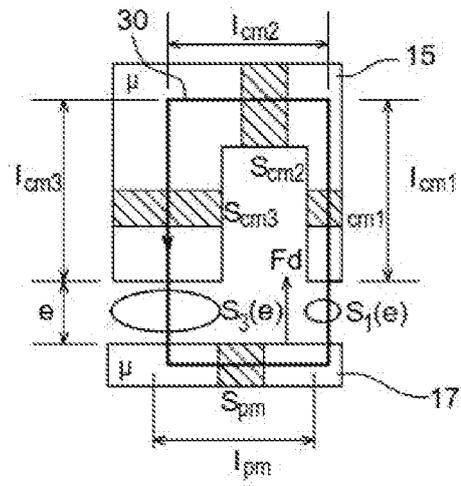
[Fig. 5]



[Fig. 6]



[Fig. 7]





**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 892060
FR 2102892

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	FR 3 007 855 A1 (CENTRE NAT ETD SPATIALES [FR]; ASS SUPELEC [FR] ET AL.) 2 janvier 2015 (2015-01-02) * page 10, ligne 3 - page 17, ligne 5 * -----	1-14	F16K17/20 F16K1/04 F16K31/02 G05B15/00 G05D7/06
A	US 2013/333671 A1 (WALSER MICHAEL W [US] ET AL) 19 décembre 2013 (2013-12-19) * alinéa [0043] - alinéa [0110] * -----	1-14	
A	US 2013/085618 A1 (DING JUNHUA [US]) 4 avril 2013 (2013-04-04) * alinéa [0020] - alinéa [0053] * -----	1-14	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G05D
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
12 novembre 2021		Coda, Ruggero	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2102892 FA 892060**

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 **12-11-2021**
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
FR 3007855	A1	02-01-2015	AUCUN	

US 2013333671	A1	19-12-2013	BR 112014031712 A2	27-06-2017
			CN 103958874 A	30-07-2014
			CN 107762677 A	06-03-2018
			EP 2861860 A1	22-04-2015
			JP 6232422 B2	15-11-2017
			JP 2015525322 A	03-09-2015
			KR 20150029648 A	18-03-2015
			KR 20200018731 A	19-02-2020
			RU 2014151408 A	10-08-2016
			US 2013333671 A1	19-12-2013
			US 2018223774 A1	09-08-2018
			US 2019293027 A1	26-09-2019
			WO 2013192331 A1	27-12-2013

US 2013085618	A1	04-04-2013	CN 103958733 A	30-07-2014
			EP 2764134 A1	13-08-2014
			EP 2845921 A2	11-03-2015
			JP 5886970 B2	16-03-2016
			JP 6031167 B2	24-11-2016
			JP 2015501465 A	15-01-2015
			JP 2016035755 A	17-03-2016
			KR 20140082766 A	02-07-2014
			SG 11201400941P A	28-04-2014
			TW 201333254 A	16-08-2013
			US 2013085618 A1	04-04-2013
			WO 2013052364 A1	11-04-2013
