

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 149 350

21 N° d'enregistrement national : 23 05462

51 Int Cl⁸ : F 02 C 9/28 (2023.01), F 02 C 7/32, 7/36, F 02 K 3/06

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 31.05.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 06.12.24 Bulletin 24/49.

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) : SAFRAN AIRCRAFT ENGINES
Société par actions simplifiée — FR.

72 Inventeur(s) : BENATTIA Seif Eddine et AULNETTE
Rudy Charles André.

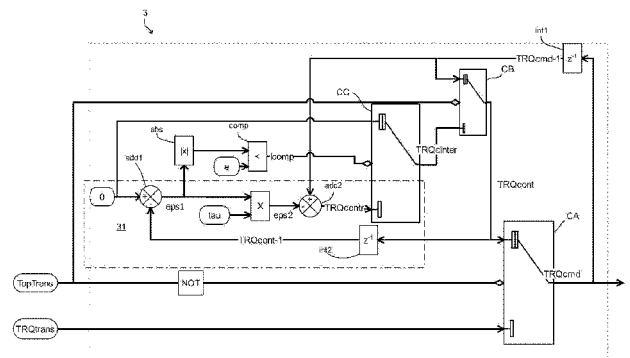
73 Titulaire(s) : SAFRAN AIRCRAFT ENGINES Société
par actions simplifiée.

74 Mandataire(s) : ARGYMA.

54 Procédé de commande d'une turbomachine comprenant une machine électrique.

57 Un procédé de commande d'une turbomachine (T) comprenant une machine électrique, le procédé de commande comportant une première boucle de régulation de carburant (B1) déterminant une consigne de débit de carburant (WFcmd) et une deuxième boucle de régulation de couple (B2) déterminant une consigne de couple électrique (TRQcmd), la boucle de régulation de couple (B2) étant configurée pour déterminer la consigne de couple électrique (TRQcmd) à partir d'une consigne de couple transitoire déterminée (TRQtrans), d'une consigne de couple électrique antérieure (TRQcmd-1), d'un indicateur de phase transitoire (TopTrans), la consigne de contrôle (TRQcont) étant déterminée à partir d'une consigne de contrôle antérieure (TRQcont-1), d'une constante de temps (τ) et de la consigne de couple électrique antérieure (TRQcmd-1) selon une loi mathématique décroissante du premier ordre.

Figure de l'abrégé : Figure 7



FR 3 149 350 - A1



Description

Titre de l'invention : Procédé de commande d'une turbomachine comprenant une machine électrique

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne une turbomachine pour aéronef, en particulier, la commande d'une turbomachine afin de fournir la poussée désirée en fonction de la position de la manette de commande du pilote de l'aéronef.
- [0002] Le changement climatique est une préoccupation majeure pour de nombreux organes législatifs et de régulation à travers le monde. En effet, diverses restrictions sur les émissions de carbone ont été, sont ou seront adoptées par divers Etats. En particulier, une norme ambitieuse s'applique à la fois aux nouveaux types d'avions mais aussi ceux en circulation nécessitant de devoir mettre en œuvre des solutions technologiques afin de les rendre conformes aux réglementations en vigueur. L'aviation civile se mobilise depuis maintenant plusieurs années pour apporter une contribution à la lutte contre le changement climatique.
- [0003] Les efforts de recherche technologique ont déjà permis d'améliorer de manière très significative les performances environnementales des avions. La Déposante prend en considération les facteurs impactant dans toutes les phases de conception et de développement pour obtenir des composants et des produits aéronautiques moins énergivores, plus respectueux de l'environnement et dont l'intégration et l'utilisation dans l'aviation civile ont des conséquences environnementales modérées dans un but d'amélioration de l'efficacité énergétique des avions.
- [0004] Par voie de conséquence, la Déposante travaille en permanence à la réduction de son incidence climatique négative par l'emploi de méthodes et l'exploitation de procédés de développement et de fabrication vertueux et minimisant les émissions de gaz à effet de serre au minimum possible pour réduire l'empreinte environnementale de son activité.
- [0005] Ces travaux de recherche et de développement soutenus portent à la fois sur les nouvelles générations de moteurs d'aéronefs, l'allègement des appareils, notamment par les matériaux employés et les équipements embarqués allégés, le développement de l'emploi des technologies électriques pour assurer la propulsion, et, indispensables compléments aux progrès technologiques, les biocarburants aéronautiques.
- [0006] En référence à la [Fig.1], il est représenté de manière schématique une turbomachine 100 du type turboréacteur à double flux et double corps pour aéronef. De manière connue, la turbomachine 100 comprend, d'amont en aval dans le sens de l'écoulement des gaz, une soufflante 110, un compresseur basse pression 111, un compresseur haute

pression 112, une chambre de combustion 113 qui reçoit une consigne de débit de carburant WF_{cmd} , une turbine haute pression 114, une turbine basse pression 115 et une tuyère primaire d'échappement 116. Le compresseur basse pression (ou BP) 111 et la turbine basse pression 115 sont reliés par un arbre basse pression 121 et forment ensemble un corps basse pression. Le compresseur haute pression (ou HP) 112 et la turbine haute pression 114 sont reliés par un arbre haute pression 122 et forment ensemble un corps haute pression. La soufflante 110, qui est entraînée par l'arbre basse pression 121, comprime l'air ingéré. Cet air se divise en aval de la soufflante 110 entre un flux d'air secondaire qui est dirigé directement vers une tuyère secondaire (non représentée) par laquelle il est éjecté, et un flux dit primaire qui pénètre dans le générateur de gaz, constitué par le corps basse pression et le corps haute pression, puis qui est éjecté dans la tuyère primaire 116. De manière connue, pour modifier le régime de la turbomachine 100, le pilote de l'aéronef modifie la position d'une manette de commande qui permet de modifier la consigne de débit de carburant WF_{cmd} dans la chambre de combustion 113.

[0007] La conception d'une turbomachine 100 nécessite de prendre en compte une marge suffisante contre le phénomène dit de pompage. Ce phénomène qui résulte d'une incidence excessive du flux d'air sur les aubes d'un des compresseurs aboutit à des fluctuations importantes et rapides de la pression en aval du compresseur concerné et peut conduire à une extinction de la chambre de combustion 113. Il génère en outre des à-coups importants sur les aubes du compresseur et peut ainsi conduire à des dégradations mécaniques. Il convient donc tout particulièrement d'éviter son apparition. Le fonctionnement d'un compresseur en utilisation est généralement représenté par un diagramme qui exprime le rapport de pression obtenu entre la sortie et l'entrée, en fonction du débit d'air qui le traverse ; ce diagramme est en outre paramétré en fonction de la vitesse de rotation du compresseur. Dans ce diagramme figure une ligne de pompage qui constitue la limite maximale en taux de compression à ne pas dépasser, pour ne pas risquer l'apparition d'un phénomène de pompage. De manière connue, on définit une ligne, dite de fonctionnement, associant les taux de compression obtenus en fonction du débit, lorsque la turbomachine 100 est en fonctionnement stabilisé. Le positionnement de cette ligne de fonctionnement est laissé à l'appréciation du concepteur de la turbomachine 100 et la distance de cette ligne de fonctionnement à la ligne de pompage représente la marge au pompage. Il convient de remarquer que le rendement du compresseur (travail de compression fourni à l'air, rapporté au travail fourni pour l'entraîner en rotation) est, en première approximation, meilleur au fur et à mesure que l'on se rapproche de la ligne de pompage. A contrario, les accélérations demandées par le pilote à partir d'un fonctionnement stabilisé (phase transitoire) pour obtenir une augmentation de la poussée, se traduisent au niveau du compresseur par

une excursion du point de fonctionnement qui s'effectue en direction de la ligne de pompage.

- [0008] En effet, une injection supplémentaire de carburant dans la chambre de combustion 113 provoque une élévation quasi instantanée du taux de compression, alors même que le régime de rotation n'a pas le temps d'augmenter du fait de l'inertie. La variation d'enthalpie apportée au fluide par la combustion du carburant ajouté génère alors une augmentation du travail fourni par chaque turbine et, par conséquent une augmentation de la vitesse de rotation du corps correspondant. Ceci se traduit au niveau du diagramme du compresseur par un retour du point de fonctionnement sur la ligne de fonctionnement lorsque le régime se stabilise à nouveau, à un point de fonctionnement qui correspond à un débit plus élevé que celui du point de fonctionnement précédent.
- [0009] Le concepteur d'une turbomachine 100 doit donc essayer d'optimiser le placement de la ligne de fonctionnement en la plaçant le plus haut possible, de façon à bénéficier de meilleurs rendements pour ses compresseurs, tout en gardant une distance suffisante vis à vis de la ligne de pompage pour permettre des accélérations sûres.
- [0010] Afin d'éviter tout phénomène de pompage, une turbomachine 100 comporte un système de régulation mis en œuvre par une unité électronique. En référence à la [Fig.2], le système de régulation comprend un module de gestion stabilisée 31, un module de détection d'intention de transitoire 32, un module de génération d'une trajectoire de régime 33, un module de gestion du transitoire 33', un module de sélection 34, un module d'intégration 35 ainsi qu'un module de gestion de butée 36.
- [0011] Le module de gestion du transitoire 33' fournit une grandeur de correction au module de sélection 34 en fonction de la différence entre le régime NL de la turbomachine 100 et la trajectoire issue du module de génération d'une trajectoire de régime 33. Le module de gestion stabilisée 31 fournit une grandeur de correction au module de sélection 34 en fonction de la différence entre le régime NL de la turbomachine 100 et le régime de consigne NL_{CONS} . Le régime NL peut correspondre à différents types de régime, notamment, un régime de soufflante, une consigne de pression connue sous son acronyme anglais EPR (Engine Pressure Ratio), une consigne haute pression ou autre.
- [0012] Le régime de consigne NL_{CONS} est proportionnel à la position de la manette de commande manipulable par le pilote de l'aéronef. Un tel module de gestion stabilisée 31 est connu de l'homme du métier et ne sera pas présenté plus en détails.
- [0013] Le module de détection d'intention de transitoire 32 a pour but de détecter une intention de transitoire souhaitée par le pilote. Le module de détection d'intention de transitoire 32 détermine une différence entre le régime NL de la turbomachine 100 et le régime de consigne NL_{CONS} . Lorsque la manette de commande reste dans une position constante et que le module de gestion stabilisée 31 est mise en œuvre, le régime réel

NL de la turbomachine 100 est stationnaire et égal au régime de consigne NL_{CONS} . Si le pilote déplace la manette de commande, le régime de consigne NL_{CONS} varie instantanément. Au contraire, le régime NL ne varie pas instantanément en raison de l'inertie de la turbomachine 100 et du module de gestion stabilisée 31. Ainsi, le module de détection d'intention de transitoire 32 détecte une intention de transitoire lorsque la différence entre le régime de consigne NL_{CONS} et le régime réel NL est supérieure à un seuil prédéterminé S2.

- [0014] Dans le cas d'une demande accélération, si l'écart de régime est supérieur au seuil prédéterminé S2 ($NL_{CONS} - NL > S2$), une demande d'accélération est détectée. De manière analogue, dans le cas d'une décélération, si l'écart de régime est supérieur au seuil prédéterminé S2 ($NL - NL_{CONS} > S2$), une demande de décélération est détectée. Lorsque qu'une phase transitoire est détectée, le module de détection d'intention de transitoire 32 génère un signal d'activation, qui est transmis au module de génération d'une trajectoire de régime 33 et au module de sélection 34 comme illustré à la [Fig.2].
- [0015] Dans le cas d'une demande accélération, le module de génération d'une trajectoire de régime 33 détermine une consigne de régime pour l'accélération (trajectoire d'accélération). De manière analogue, dans le cas d'une décélération, le module de génération d'une trajectoire de régime 33 détermine une consigne de régime pour la décélération (trajectoire de décélération). En fonction de la trajectoire générée, le module de génération d'une trajectoire de régime 33 fournit une grandeur de correction au module de sélection 34.
- [0016] Un tel module de génération d'une trajectoire de régime 33 est connu de l'homme du métier, en particulier par la demande de brevet US2013/0008171 et la demande de brevet FR2977638A1, et ne sera pas présenté plus en détails.
- [0017] Dans cet exemple, le module de sélection 34 est configuré pour recevoir un signal d'activation du module de détection d'intention de transitoire 32. Le module de sélection 34 sélectionne la grandeur de correction issue du module de gestion stabilisée 31 en l'absence de réception d'un signal d'activation et sélectionne la grandeur de correction issue du module de gestion du transitoire 33' en cas de réception d'un signal d'activation. Un tel module de sélection 34 est connu de l'homme du métier et ne sera pas présenté plus en détails. La grandeur de correction sélectionnée est fournie au module d'intégration 35. Le module d'intégration 35 détermine la consigne de débit de carburant WF_{cmd} par intégration de la grandeur de correction sélectionnée.
- [0018] Le module de gestion de butée 36 limite la valeur de la consigne de débit de carburant WF_{cmd} déterminée par le module d'intégration 35. De manière connue, le module de gestion de butée 36 met en œuvre une butée, dite butée C/P connue de l'homme du métier afin de protéger la turbomachine à l'encontre du pompage. Dans cet exemple le module de gestion de butée 36 permet de définir des consignes de butée en

accélération et en décélération. De telles butées sont connues de l'homme du métier et ne seront pas présentées plus en détails.

- [0019] Le module de génération d'une trajectoire de régime 33 et le module de gestion de butée 36 permettent de définir une trajectoire d'accélération qui a pour conséquence de brider la consigne de débit de carburant Wfcmd afin d'éviter un pompage. Un tel système de régulation est connu par la demande de brevet FR2977638A1 et ne sera pas présenté plus en détails. De manière incidente, il est connu de protéger un moteur contre le phénomène de pompage lors des transitoires en prenant en compte une consigne d'accélération lors de la régulation (voir par exemple US4543782 et US 2003/0094000).
- [0020] Afin d'améliorer le temps de réponse d'une turbomachine lors d'une phase transitoire (accélération, décélération, etc.), il a été proposé d'équiper la turbomachine avec une machine électrique afin de fournir un couple électrique supplémentaire pour augmenter le régime de la turbomachine sans conduire à un phénomène de pompage. A cet effet, on connaît par le demande de brevet WO2016/020618 une turbomachine pour aéronef comprenant une machine électrique pour prélever de la puissance sur l'arbre basse pression et injecter de la puissance sur l'arbre haute pression.
- [0021] Pour réduire les dépenses énergétiques liées à la machine électrique, il est connu de n'utiliser la machine électrique que lors d'une phase transitoire. En pratique, la machine électrique est stoppée à la fin de la phase transitoire et il en résulte une perte de couple soudaine (modification du type échelon) qui est compensée automatiquement par une modification de la consigne de débit de carburant Wfcmd.
- [0022] Cela peut engendrer des variations importantes de régime et des activations/désactivations à répétition de la machine électrique, ce qui peut pénaliser la poussée ainsi que la durée de vie de la machine électrique.
- [0023] L'invention vise ainsi à éliminer au moins certains de ces inconvénients en proposant un procédé de commande d'une turbomachine permettant d'améliorer la gestion de la machine électrique après une phase transitoire.

PRESENTATION DE L'INVENTION

- [0024] A cet effet, l'invention est le résultat des recherches technologiques visant à améliorer de manière très significative les performances des aéronefs et, en ce sens, contribue à la réduction de l'impact environnemental des aéronefs. Pour cela, l'invention concerne un procédé de commande d'une turbomachine comprenant une soufflante positionnée en amont d'un générateur de gaz et délimitant un flux primaire et un flux secondaire, ledit générateur de gaz étant traversé par le flux primaire et comprenant un compresseur basse pression, un compresseur haute pression, une chambre de combustion, une turbine haute pression et une turbine basse pression,

ladite turbine basse pression étant reliée audit compresseur basse pression par un arbre de rotation basse pression et ladite turbine haute pression étant reliée audit compresseur haute pression par un arbre de rotation haute pression, la turbomachine étant configurée pour être dans une phase transitoire ou dans une phase stabilisée, la turbomachine comprenant une machine électrique configurée pour appliquer un couple sur l'arbre de rotation basse pression ou sur l'arbre de rotation haute pression au cours de la phase transitoire, procédé dans lequel une consigne de débit de carburant dans la chambre de combustion et une consigne de couple électrique fournie à la machine électrique sont déterminées, le procédé de commande comportant une première boucle de régulation de carburant déterminant la consigne de débit de carburant et une deuxième boucle de régulation de couple déterminant la consigne de couple électrique.

[0025] L'invention est remarquable en ce que :

- La deuxième boucle de régulation de couple est configurée pour déterminer la consigne de couple électrique à partir d'une consigne de couple transitoire déterminée, d'une consigne de couple électrique antérieure et d'un indicateur de phase transitoire,
- La deuxième boucle de régulation de couple est configurée, lorsque l'indicateur de phase transitoire est inactif, pour déterminer que la consigne de couple électrique est égale à une consigne de contrôle, la consigne de contrôle étant déterminée à partir d'une consigne de contrôle antérieure, d'une constante de temps et de la consigne de couple électrique antérieure selon une loi mathématique décroissante du premier ordre.

[0026] Grâce à l'invention, la consigne de couple électrique est réduite de manière rapide et contrôlée tout en limitant l'erreur statique. Cela permet de réduire la consommation électrique après une phase de transitoire tout en évitant une remise à zéro brusque qui pourrait entraîner des compensations par la première boucle de régulation de carburant. La remise à zéro de la consigne de couple électrique est ainsi optimale.

[0027] De manière préférée, la loi mathématique est égale à

$$TRQ_{cont} = TRQ_{cmd-1} - (TRQ_{cont-1}) * e^{-t/\tau}$$

- Dans laquelle
- TRQ_{cont} est la consigne de contrôle
- TRQ_{cont-1} est la consigne de contrôle antérieure
- τ est la constante de temps
- TRQ_{cmd-1} est la consigne de couple électrique antérieure
- t est le temps.

[0028] De manière avantageuse, la constante de temps τ est une image de la vitesse d'annulation du couple électrique et peut avantageusement être paramétrée.

- [0029] De préférence, la boucle de régulation de couple est configurée pour remettre à zéro la consigne de contrôle lorsque la valeur absolue de la consigne de couple de contrôle antérieure est inférieure à une constante d'extinction prédéterminée. Ainsi, on évite un arrêt très lent de l'apport électrique lorsque l'apport électrique est faible. Toute utilisation intempestive de la machine électrique est ainsi évitée.
- [0030] Selon un aspect, la constante de temps régissant la remise à zéro de la consigne de contrôle est paramétrable. Cela permet de régler de manière pratique la dynamique de remise à zéro du couple en adéquation avec la dynamique de la première boucle de régulation carburant.
- [0031] Selon un aspect, la boucle de régulation de couple est configurée pour recevoir des indicateurs transitoires émis par la boucle de régulation de carburant et pour déterminer l'indicateur de phase transitoire à partir des indicateurs transitoires.
- [0032] Selon un aspect, la boucle de régulation de couple est configurée pour ajouter une consigne de prélèvement de puissance aéronef à la consigne de couple électrique. Ainsi, la consigne de couple électrique peut prendre en compte les régimes transitoires mais également les besoins de l'aéronef en énergie électrique.
- [0033] L'invention concerne également un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de commande tel que présentée précédemment lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur.
- [0034] L'invention concerne également une unité électronique de commande pour turbomachine comprenant une mémoire incluant des instructions d'un programme d'ordinateur tel que présentée précédemment.
- [0035] L'invention concerne également une turbomachine comprenant une unité électronique telle que présentée précédemment.

PRESENTATION DES FIGURES

- [0036] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée à titre d'exemple, et se référant aux figures suivantes, données à titre d'exemples non limitatifs, dans lesquelles des références identiques sont données à des objets semblables.
- [0037] La [Fig.1] est une représentation schématique d'une turbomachine selon l'art antérieur.
- [0038] la [Fig.2] est une représentation schématique d'un système de régulation d'une consigne de débit de carburant selon l'art antérieur.
- [0039] La [Fig.3] est une représentation schématique d'une turbomachine selon une forme de réalisation de l'invention.
- [0040] La [Fig.4] est une représentation schématique d'un système de régulation d'une consigne de débit de carburant et d'une consigne de couple électrique.

- [0041] La [Fig.5] est une représentation schématique d'une boucle de régulation de la consigne de couple électrique.
- [0042] La [Fig.6] est une représentation schématique d'un bloc de détermination de transitoire.
- [0043] La [Fig.7] est une représentation schématique d'un module de contrôle.
- [0044] La [Fig.8] est une représentation schématique de plusieurs lois mathématiques de réduction de couple à zéro.
- [0045] La [Fig.9] est une représentation schématique de réductions de couple à zéro selon un premier ordre décroissant pour différentes constantes de temps.
- [0046] La [Fig.10] est une représentation schématique de l'évolution de plusieurs grandeurs physiques au cours du temps lors de changements de régime de la turbomachine.
- [0047] La [Fig.11] est une représentation schématique d'un système de régulation d'une consigne de débit de carburant et d'une consigne de couple, prenant en compte un prélèvement électrique issu de l'aéronef dans la régulation de la consigne de couple électrique.
- [0048] La [Fig.12] est une représentation schématique d'une boucle de régulation de la consigne de couple électrique prenant en compte le prélèvement électrique issu de l'aéronef.
- [0049] Il faut noter que les figures exposent l'invention de manière détaillée pour mettre en œuvre l'invention, lesdites figures pouvant bien entendu servir à mieux définir l'invention le cas échéant.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

- [0050] En référence à la [Fig.3], il est représenté de manière schématique une turbomachine T du type turboréacteur à double flux et double corps pour aéronef. De manière connue, la turbomachine T comprend, d'amont en aval dans le sens de l'écoulement des gaz, une soufflante 10, un compresseur basse pression 11, un compresseur haute pression 12, une chambre de combustion 13 qui reçoit une consigne de débit de carburant WF_{cmd} , une turbine haute pression 14, une turbine basse pression 15 et une tuyère primaire d'échappement 16. Le compresseur basse pression (ou BP) 11 et la turbine basse pression 15 sont reliés par un arbre basse pression 21 et forment ensemble un corps basse pression. Le compresseur haute pression (ou HP) 12 et la turbine haute pression 14 sont reliés par un arbre haute pression 22 et forment ensemble, avec la chambre de combustion 13, un corps haute pression. La soufflante 10, qui est entraînée par l'arbre basse pression 21, comprime l'air ingéré. Cet air se divise en aval de la soufflante 10 entre un flux d'air secondaire qui est dirigé directement vers une tuyère secondaire (non représentée) par laquelle il est éjecté pour participer à la poussée fournie par la turbomachine T, et un flux dit primaire qui

pénètre dans le générateur de gaz, constitué par le corps basse pression et le corps haute pression, puis qui est éjecté dans la tuyère primaire 16. De manière connue, pour modifier le régime d'une turbomachine T, le pilote de l'aéronef modifie la position d'une manette de commande qui permet de modifier la consigne de débit de carburant WFcnd dans la chambre de combustion 13.

[0051] En référence à la [Fig.3], la turbomachine T comporte en outre un moteur électrique ME configuré pour fournir un couple supplémentaire à l'arbre basse pression 21 ou l'arbre haute pression 22. Le fonctionnement de la turbomachine T est commandé par une unité électronique 20 qui obtient des signaux représentant des paramètres de fonctionnement de la turbomachine T, notamment un régime NL de la turbomachine T, pour fournir la consigne de débit de carburant WFcnd et une consigne de couple TRQcmd au moteur électrique ME. Le régime NL peut correspondre à différents types de régime, notamment, un régime de soufflante, une consigne de pression connue sous son acronyme anglais EPR (Engine Pressure Ratio), une consigne de régime haute pression ou autre.

[0052] Comme illustré à la [Fig.4], l'unité électronique 20 comporte un système de régulation comportant une première boucle B1 de régulation de la consigne de débit de carburant WFcnd, désignée par la suite « première boucle de carburant B1 », et une deuxième boucle B2 de régulation de la consigne de couple électrique TRQcmd, désignée par la suite « deuxième boucle de couple B2 ».

[0053] Comme illustré à la [Fig.4], la première boucle de carburant B1 comporte :

- Une entrée de température T2
- une entrée de régime NL de la turbomachine T
- une entrée de régime de consigne NL_{CONS} définie par la position de la manette de commande manipulable par le pilote de l'aéronef,
- une sortie de consigne de débit de carburant WFcndtransmise à la turbomachine T et
- une pluralité d'indicateurs de sortie :
 - un indicateur d'une demande de transitoire d'accélération TopAccel
 - un indicateur d'une demande de transitoire de décélération TopDecel
 - un indicateur d'une butée d'accélération TopButeeAccel définie par la saturation de la commande des correcteurs par la butée C/P d'accélération
 - un indicateur d'une butée de décélération TopButeeDecel définie par la saturation de la commande des correcteurs par la butée C/P d'extinction
 - une consigne de trajectoire de régime pour l'accélération NLTrajAccCons

- une consigne de trajectoire de régime pour la décélération NLTraj-DecelCons

[0054] Toujours en référence à la [Fig.4], la deuxième boucle de couple B2 reçoit en entrée tous les indicateurs de sortie générés par la première boucle de carburant B1, c'est-à-dire TopAccel, TopDecel, TopButeeAccel, TopButeeDecel, NLTrajAccCons, NLTrajDecelCons, ainsi que l'entrée de régime NL de la turbomachine T.

[0055] Grâce à ce système de régulation, la deuxième boucle de couple B2 permet de fournir une consigne de couple TRQcmd adaptive en fonction du comportement de la première boucle de carburant B1 qui demeure prioritaire. Dans cet exemple, la première boucle de carburant B1 comporte également une entrée de pression statique dans la chambre de combustion PS3.

[0056] De manière détaillée, en référence à la [Fig.5], la deuxième boucle de couple B2 comporte un bloc de traitement B21 configuré pour déterminer une consigne de couple transitoire TRQtrans à partir des entrées NLTrajAccCons, NLTrajDecelCons, ainsi que l'entrée de régime NL de la turbomachine T. Un tel bloc de traitement B21 est connu de l'art antérieur, en particulier, par la demande de brevet WO2016/020618. La consigne de couple transitoire TRQtrans permet de répondre de manière électrique aux besoins de la turbomachine T lors d'un régime de transitoire.

[0057] La deuxième boucle de couple B2 comporte en outre un module de contrôle 3, représenté de manière schématique en [Fig.7], configuré pour déterminer la consigne de couple électrique TRQcmd à partir de la consigne de couple transitoire TRQtrans, d'une consigne de couple électrique antérieure TRQcmd-1 et d'un indicateur de phase transitoire TopTrans.

[0058] Dans cet exemple, l'indicateur de phase transitoire TopTrans est actif lorsque la turbomachine T est en régime transitoire. A cet effet, comme illustré à la [Fig.5], la deuxième boucle de couple B2 comporte un bloc de détermination de transitoire B22 pour déterminer l'indicateur de phase transitoire TopTrans. En référence à la [Fig.6], l'indicateur de phase transitoire TopTrans est déterminé à partir des entrées TopAccel, TopDecel, TopButeeAccel, TopButeeDecel. En particulier, l'indicateur de phase transitoire TopTrans est actif :

- lorsqu'une accélération est demandée et lorsque la butée d'accélération est déjà atteinte (TopAccel et TopButeeAccel activés)
- lorsqu'une décélération est demandée et lorsque la butée de décélération est déjà atteinte (TopDecel et TopButeeDecel activés).

[0059] En référence à la [Fig.7], le module de contrôle 3 comporte un premier commutateur CA configuré pour déterminer la consigne de couple électrique TRQcmd à partir de la consigne de couple transitoire TRQtrans et d'une consigne de contrôle TRQcont en fonction de l'indicateur de phase transitoire TopTrans.

- [0060] Toujours en référence à la [Fig.7], tant que l'indicateur transitoire TopTrans est actif, le premier commutateur CA détermine que la consigne de couple électrique TRQcmd est égale à la consigne de couple transitoire TRQtrans. En effet, lorsque la turbomachine T est en régime transitoire, le moteur électrique ME fournit un couple répondant aux besoins en transitoire de la turbomachine T.
- [0061] Lorsque l'indicateur transitoire TopTrans est inactif, le premier commutateur CA détermine que la consigne de couple électrique TRQcmd est égale à la consigne de contrôle TRQcont qui vise à réduire le couple électrique. La consigne de contrôle TRQcont va être dorénavant présentée.
- [0062] Le module de contrôle 3 comporte en outre un deuxième commutateur CB configuré pour déterminer la consigne de contrôle TRQcont à partir d'une consigne de couple électrique antérieure TRQcmd-1 et d'une consigne de contrôle intermédiaire TRQcinter en fonction de l'indicateur de phase transitoire TopTrans.
- [0063] Le module de contrôle 3 comporte en outre un troisième commutateur CC configuré pour déterminer la consigne de contrôle intermédiaire TRQcinter à partir d'une consigne de remise à zéro et d'une consigne de contrôle réduite TRQcontr en fonction d'un indicateur de comparaison Icomp. La consigne de contrôle réduite TRQcontr est déterminée à partir d'une consigne de couple électrique antérieure TRQcmd-1 et d'une consigne de contrôle antérieure TRQcont-1.
- [0064] Dans cet exemple, la consigne de couple électrique antérieure TRQcmd-1 et la consigne de contrôle antérieure TRQcont-1 sont respectivement déterminées par des intégrateurs int1, int2.
- [0065] Les différents paramètres vont être dorénavant présentés.
- [0066] Dans cet exemple, la consigne de contrôle réduite TRQcontr est déterminée dans une boucle de réduction 31 à partir de la consigne de contrôle antérieure TRQcont-1, d'une constante de temps tau et de la consigne de couple électrique antérieure TRQcmd-1.
- [0067] Tant que la turbomachine T est en régime transitoire, le deuxième commutateur CB détermine que la consigne de contrôle TRQcont est égale à la consigne de couple électrique antérieure TRQcmd-1. Cette consigne de contrôle TRQcont est utilisée par la boucle de réduction 31 pour déterminer la consigne de contrôle réduite TRQcontr. Cela permet avantageusement de synchroniser la boucle de réduction 31 avec la consigne de couple électrique TRQcmd pour que la valeur de la consigne de contrôle antérieure TRQcont-1 soit dans la continuité des valeurs de la consigne de couple électrique TRQcmd. Lorsque la turbomachine T retourne en régime stabilisé, le deuxième commutateur CB détermine la consigne de contrôle TRQcont comme la consigne de couple intermédiaire, le couple électrique au point de départ de la remise à zéro est ainsi le couple électrique au point d'arrivée du régime transitoire. La transition se fait avantageusement sans à-coup.

[0068] Comme illustré à la [Fig.7], la consigne de contrôle antérieure TRQcont-1 et une valeur cible 0 (consigne de de remise à zéro) sont comparées par un additionneur add1 pour déterminer un écart primaire eps1. L'écart primaire eps1 est ensuite multiplié par la constante de temps tau dans un bloc multiplicateur pour obtenir un écart secondaire eps2. L'écart secondaire eps2 est ensuite additionné à la consigne de couple électrique antérieure TRQcmd-1 par l'intermédiaire d'un additionneur add2 pour déterminer la consigne de contrôle réduite TRQcontr.

[0069] Autrement dit, la boucle de réduction 31 permet de déterminer la consigne de contrôle TRQcont selon la loi mathématique décroissante du premier ordre suivante.

[0070] [Math.1]

$$TRQcont = TRQcmd_{-1} - (TRQcont_{-1}) * e^{-t*tau}$$

[0071] La valeur absolue de l'écart primaire eps1 est déterminée par un bloc de valeur absolue abs, et est comparée avec une constante d'extinction prédéterminée e par un bloc de comparaison comp pour déterminer un indicateur de comparaison Icomp. En pratique, l'indicateur de comparaison Icomp est actif si la valeur absolue de l'écart primaire eps1 est inférieure à la constante d'extinction prédéterminée e. La constante d'extinction prédéterminée e est configurée pour être proche de 0 (consigne de de remise à zéro) afin de forcer une remise à zéro du couple électrique lorsque les besoins électriques sont faibles. Cela permet d'éviter une utilisation intempestive de la machine électrique ME. Cela permet également d'éviter une convergence lente vers zéro avec une loi mathématique du premier ordre.

[0072] Dans cet exemple, toujours en référence à la [Fig.7], lorsque l'indicateur de contrôle Icomp est inactif, le troisième commutateur CC détermine que la consigne de contrôle intermédiaire TRQcinter est égale à la consigne de contrôle réduite TRQcontr. Cette mise en œuvre permet, de manière avantageuse, de réduire la valeur en sortie du commutateur CB selon la loi mathématique du premier ordre décroissant tant que l'indicateur de contrôle Icomp est inactif. La turbomachine T peut ainsi passer d'un régime stabilisé à un autre tout en préservant les ressources électriques.

[0073] Grâce à l'invention, en référence à la [Fig.8], lors d'un passage d'une phase de régime transitoire Rtrans à une phase de régime stabilisé Rstab, la consigne de contrôle TRQcont est remise à zéro de manière progressive selon une loi mathématique du premier ordre RAZ2 ce qui permet :

- De limiter les à-coups sur la machine électrique ME par comparaison à une remise à zéro brutale selon une loi mathématique définissant un échelon RAZ0 et
- De préserver les ressources électriques par comparaison à une remise à zéro très progressive selon une loi mathématique définissant une rampe dé-

croissante RAZ1.

- [0074] Une remise à zéro brutale par échelon RAZ0 présente en outre l'inconvénient d'entraîner des problèmes de transitions entre la phase de régime transitoire R_{trans} et la phase de régime stabilisé R_{stab} et des basculements intempestifs dans ces deux régimes. Une remise à zéro très progressive selon une rampe décroissante RAZ1 présente en outre l'inconvénient d'entraîner une erreur continue sur le couple électrique.
- [0075] De manière préférée, la constante de temps τ de la loi mathématique du premier ordre de la boucle de réduction 31 est paramétrable. En référence à la [Fig.9] représentant plusieurs valeurs de constante de temps τ_1 , τ_2 , τ_3 , on peut ainsi régler la vitesse de la réponse.
- [0076] Un exemple de mise en œuvre va être présenté en référence à la [Fig.10] lors d'une augmentation de régime décidée par le pilote de l'aéronef.
- [0077] Comme illustré sur la courbe C1, lors d'une demande d'augmentation de régime, la consigne de régime basse pression NL_{cons} augmente fortement à un premier instant t_1 qui démarre une phase de régime transitoire R_{trans} . Le régime basse pression NL suit progressivement la consigne de régime basse pression NL_{cons} afin d'éviter tout phénomène de pompage de la turbomachine T. A un deuxième instant t_2 , le régime basse pression NL est proche de la consigne de régime basse pression NL_{cons} , ce qui met fin à la phase de régime transitoire R_{trans} . La phase de régime transitoire R_{trans} est précédée d'une première phase de régime stabilisé R_{stab1} et suivie d'une deuxième phase de régime stabilisé R_{stab2} .
- [0078] Comme illustré sur la courbe C2, la consigne de couple haute pression NH_{cons} est suivie de manière réactive par la coopération synergique entre la consigne de carburant WF_{cmd} (Courbe C3) et la consigne de couple électrique TRQ_{cmd} (Courbe C4).
- [0079] Comme illustré sur la courbe C3, la consigne de carburant WF_{cmd} augmente progressivement durant une phase de régime transitoire R_{trans} .
- [0080] Durant la phase de régime transitoire R_{trans} , comme illustré sur la courbe C4, l'indicateur transitoire $TopTrans$ est actif et la consigne de couple électrique TRQ_{cmd} correspond à la consigne de couple transitoire TRQ_{trans} . La boucle de réduction 31 est déconnectée de la sortie de la deuxième boucle de couple B2. Dans cet exemple, la deuxième boucle de régulation B2 augmente progressivement le couple de la machine électrique sur l'arbre haute pression 22. Il en résulte une augmentation graduelle de la vitesse de rotation de l'arbre haute pression 22.
- [0081] Après la fin de la phase de régime transitoire R_{trans} , l'indicateur transitoire $TopTrans$ est inactif (l'indicateur de transitoire d'accélération $TopAccel$ est baissé) et la consigne de couple TRQ_{cmd} est remise à zéro progressivement selon la loi mathématique du premier ordre. Cela permet à la première boucle de carburant B1, qui a

récupéré la main sur la consigne de carburant WF_{cmd} , de réguler la vitesse de rotation de l'arbre basse pression 21 sans perturbation. Lorsque l'écart primaire ϵ_{ps1} est faible au regard de la constante d'extinction prédéterminée e , la consigne de couple électrique TRQ_{cmd} est remise directement à zéro pour préserver les ressources électriques

- [0082] Selon un aspect de l'invention, en référence à la [Fig.11], la deuxième boucle de couple B2 reçoit également en entrée une consigne de prélèvement aéronef TRQ_{aero} pour répondre aux besoins électrique de l'aéronef, en particulier, pour permettre une génération électrique.
- [0083] A cet effet, comme illustré à la [Fig.12], la deuxième boucle de couple B2 comporte en outre un additionneur 4 qui vient ajouter une consigne de prélèvement aéronef TRQ_{aero} à la consigne de couple électrique TRQ_{cmd} déterminée par le module de contrôle 3. Ainsi, de manière avantageuse, seule la partie de la consigne de couple électrique TRQ_{cmd} liée au régime transitoire est remise à zéro. La machine électrique ME peut continuer à fournir de l'énergie électrique à l'aéronef.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de commande d'une turbomachine (T) comprenant une soufflante (10) positionnée en amont d'un générateur de gaz et délimitant un flux primaire et un flux secondaire, ledit générateur de gaz étant traversé par le flux primaire et comprenant un compresseur basse pression (11), un compresseur haute pression (12), une chambre de combustion (13), une turbine haute pression (14) et une turbine basse pression (15), ladite turbine basse pression (15) étant reliée audit compresseur basse pression (11) par un arbre de rotation basse pression (21) et ladite turbine haute pression (14) étant reliée audit compresseur haute pression (12) par un arbre de rotation haute pression (22), la turbomachine (T) étant configurée pour être dans une phase transitoire ou dans une phase stabilisée, la turbomachine comprenant une machine électrique (ME) configurée pour appliquer un couple sur l'arbre de rotation basse pression (21) ou sur l'arbre de rotation haute pression (22) au cours de la phase transitoire, procédé dans lequel une consigne de débit de carburant (WFcmd) dans la chambre de combustion (13) et une consigne de couple électrique (TRQcmd) fournies à la machine électrique (ME) sont déterminées, le procédé de commande comportant une première boucle de régulation de carburant (B1) déterminant la consigne de débit de carburant (WFcmd) et une deuxième boucle de régulation de couple (B2) déterminant la consigne de couple électrique (TRQcmd),

- la deuxième boucle de régulation de couple (B2) étant configurée pour déterminer la consigne de couple électrique (TRQcmd) à partir d'une consigne de couple transitoire déterminée (TRQtrans), d'une consigne de couple électrique antérieure (TRQcmd-1) et d'un indicateur de phase transitoire (TopTrans),
- la deuxième boucle de régulation de couple (B2) étant configurée, lorsque l'indicateur de phase transitoire (TopTrans) est inactif, pour déterminer que la consigne de couple électrique (TRQcmd) est égale à une consigne de contrôle (TRQcont), la consigne de contrôle (TRQcont) étant déterminée à partir d'une consigne de contrôle antérieure (TRQcont-1), d'une constante de temps (τ) et de la consigne de couple électrique antérieure (TRQcmd-1) selon une loi ma-

thématique décroissante du premier ordre.

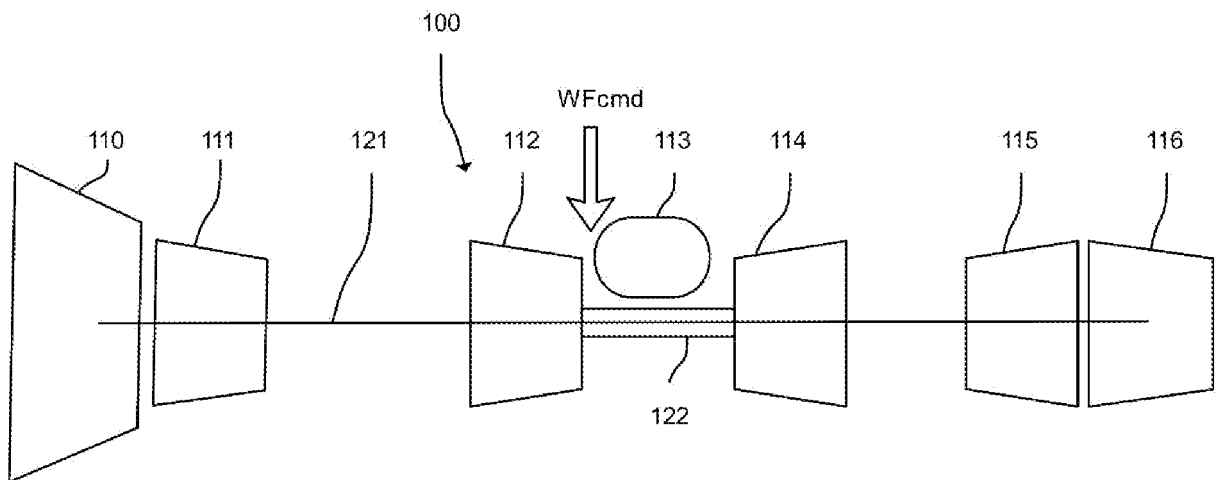
- [Revendication 2] Procédé de commande d'une turbomachine (T) selon la revendication 1, dans lequel la loi mathématique est égale à
- $$\text{TRQcont} = \text{TRQcmd}_{-1} - (\text{TRQcont}_{-1}) * e^{-t * \text{tau}}$$
- Dans laquelle
 - TRQcont est la consigne de contrôle
 - TRQcont-1 est la consigne de contrôle antérieure
 - tau est la constante de temps
 - TRQcmd-1 est la consigne de couple électrique antérieure
 - t est le temps.
- [Revendication 3] Procédé de commande d'une turbomachine (T) selon l'une des revendications 1 à 2, dans lequel la boucle de régulation de couple (B2) est configurée pour remettre à zéro la consigne de contrôle (TRQcont) lorsque la valeur absolue de la consigne de couple de contrôle antérieure (TRQcont-1) est inférieure à une constante d'extinction prédéterminée (e).
- [Revendication 4] Procédé de commande d'une turbomachine (T) selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel la constante de temps (tau) régissant la remise à zéro de la consigne de contrôle (TRQcont) est paramétrable.
- [Revendication 5] Procédé de commande d'une turbomachine (T) selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la boucle de régulation de couple (B2) est configurée pour recevoir des indicateurs transitoires (TopAccel, TopButteeAccel, TopDecel, TopButteeDecel) émis par la boucle de régulation de carburant (B1) et pour déterminer l'indicateur de phase transitoire (TopTrans) à partir des indicateurs transitoires (TopAccel, TopButteeAccel, TopDecel, TopButteeDecel).
- [Revendication 6] Procédé de commande d'une turbomachine (T) selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel la boucle de régulation de couple (B2) est configurée pour ajouter une consigne de prélèvement de puissance aéronef (TRQaéro) à la consigne de couple électrique (TRQcmd).
- [Revendication 7] Programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de commande selon l'une des revendications 1 à 6 lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur.
- [Revendication 8] Unité électronique (20) de commande pour turbomachine (T)

comprenant une mémoire incluant des instructions d'un programme d'ordinateur selon la revendication 7.

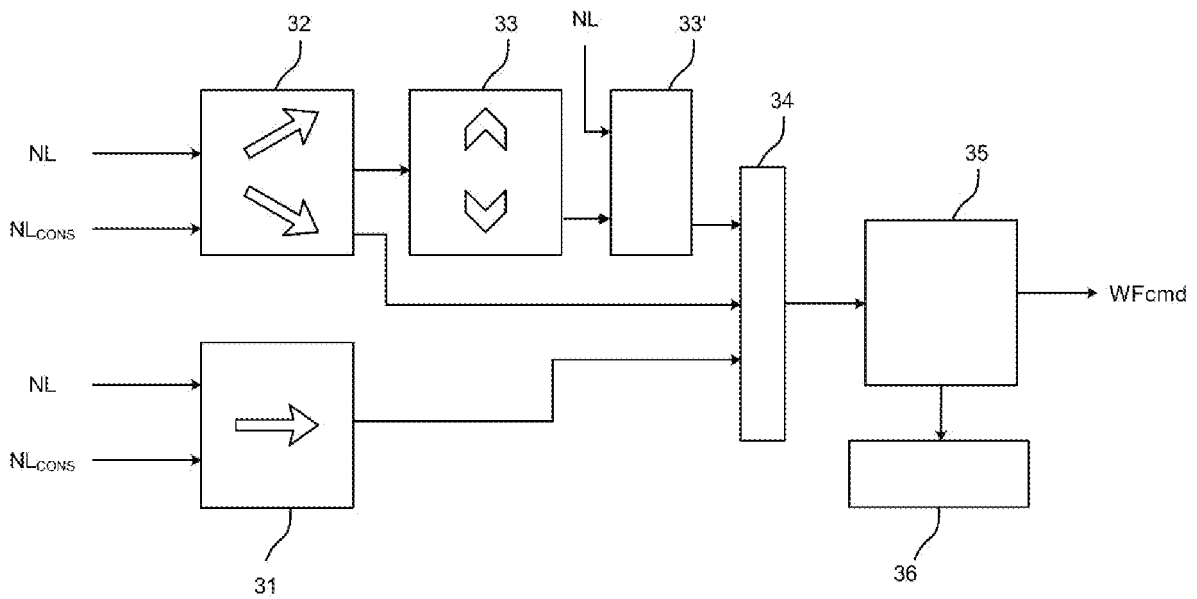
[Revendication 9]

Turbomachine (T) comprenant une unité électronique (20) selon la revendication 8.

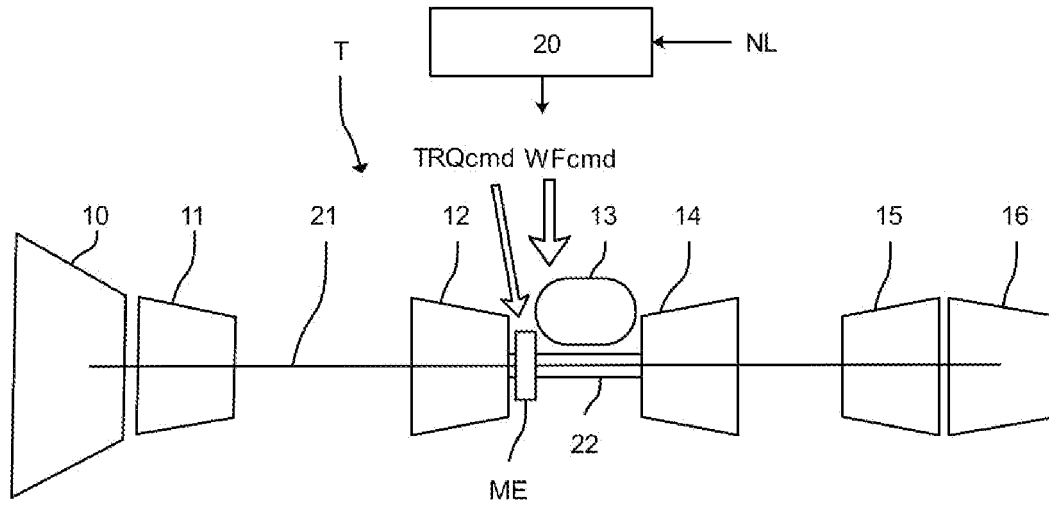
[Fig. 1]

**FIGURE 1**

[Fig. 2]

**FIGURE 2**

[Fig. 3]

**FIGURE 3**

[Fig. 4]

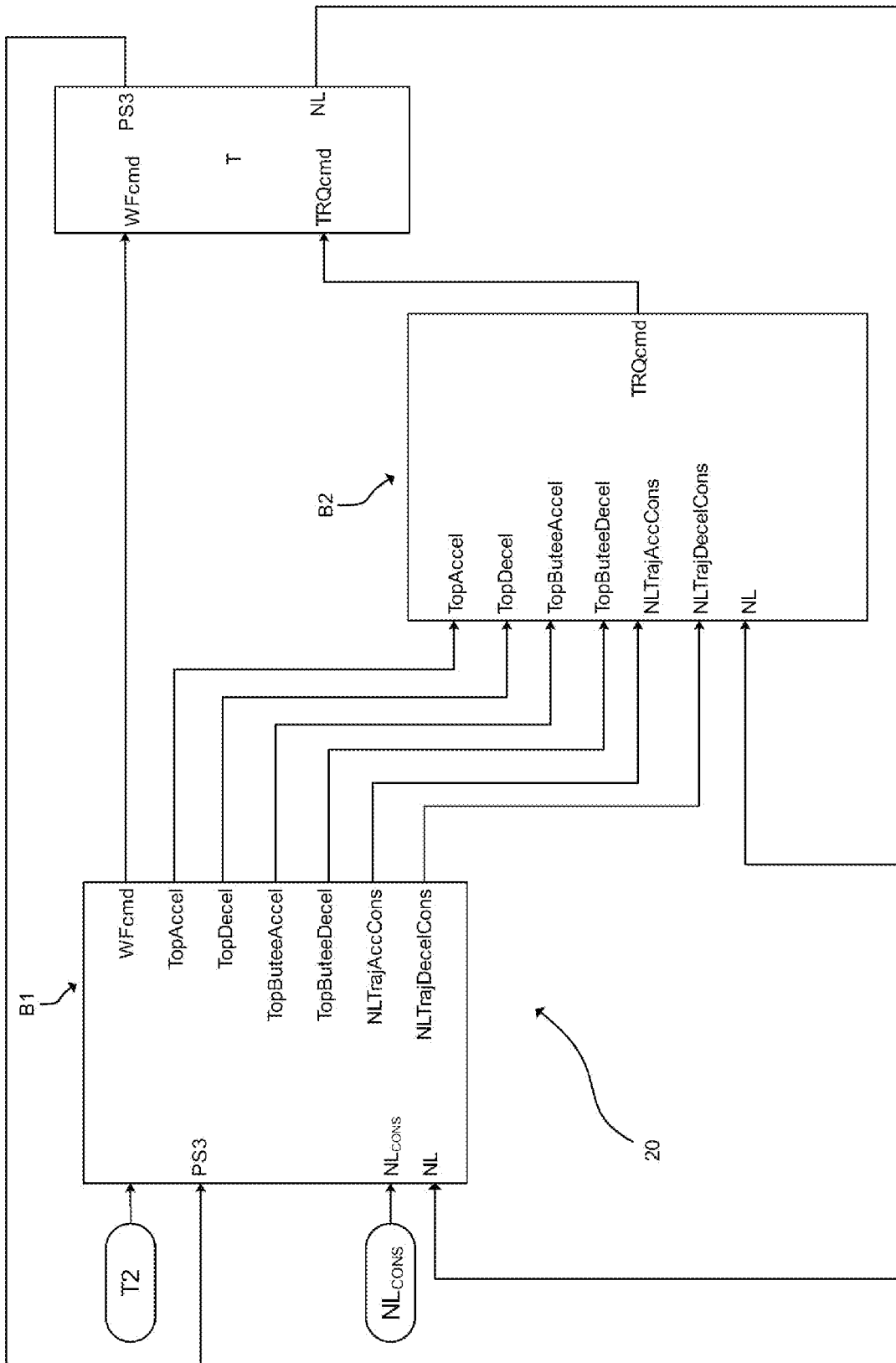
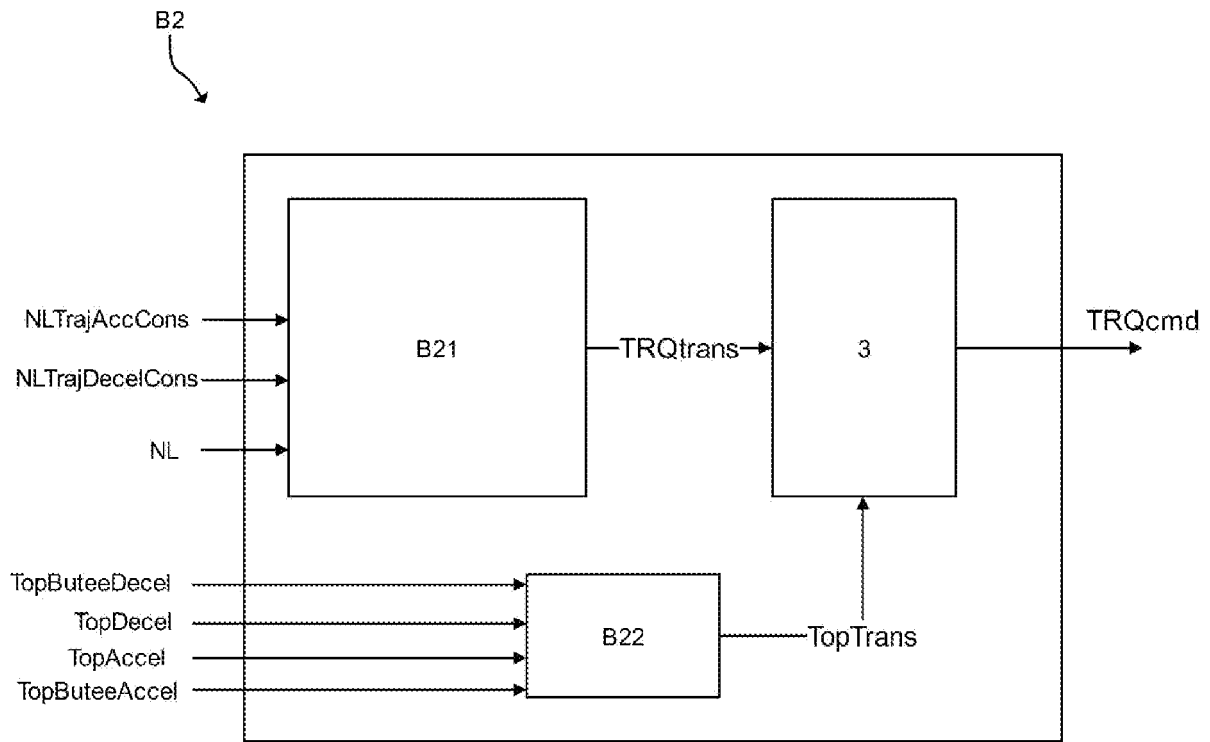
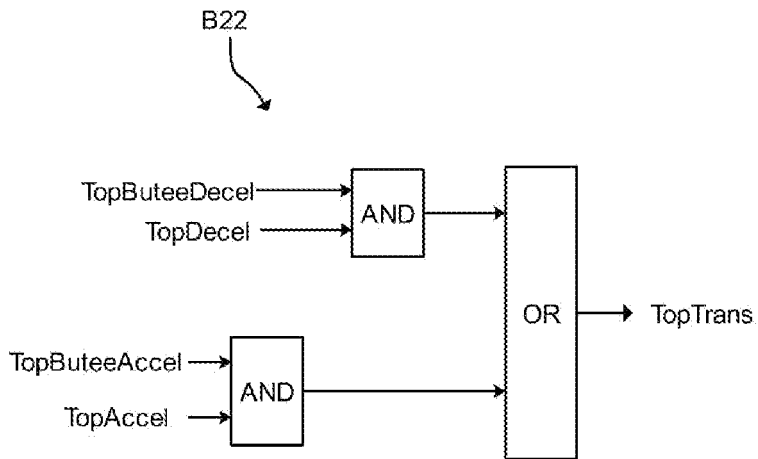


FIGURE 4

[Fig. 5]

**FIGURE 5**

[Fig. 6]

**FIGURE 6**

[Fig. 7]

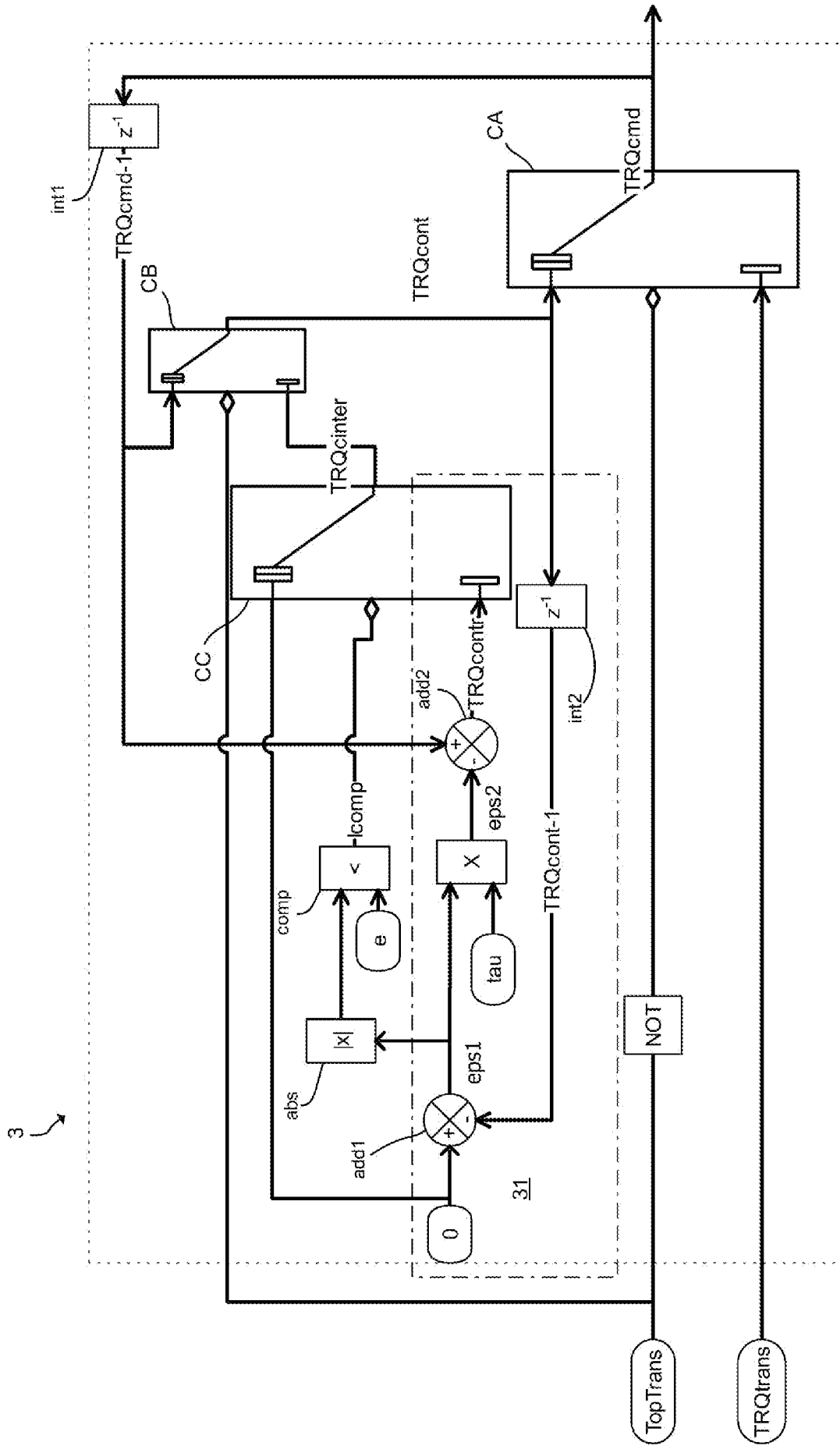
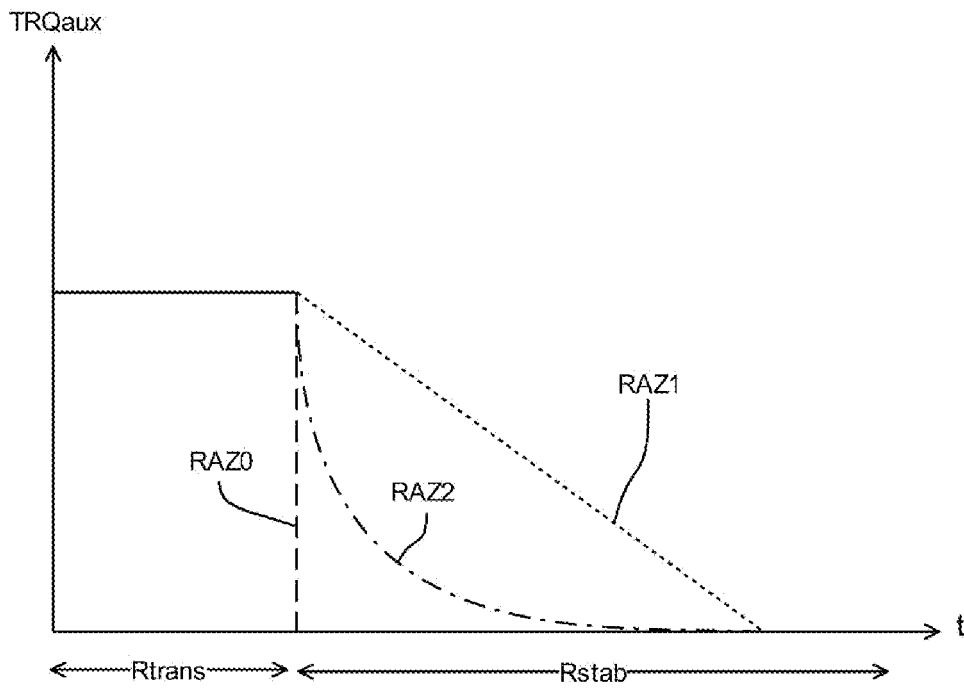
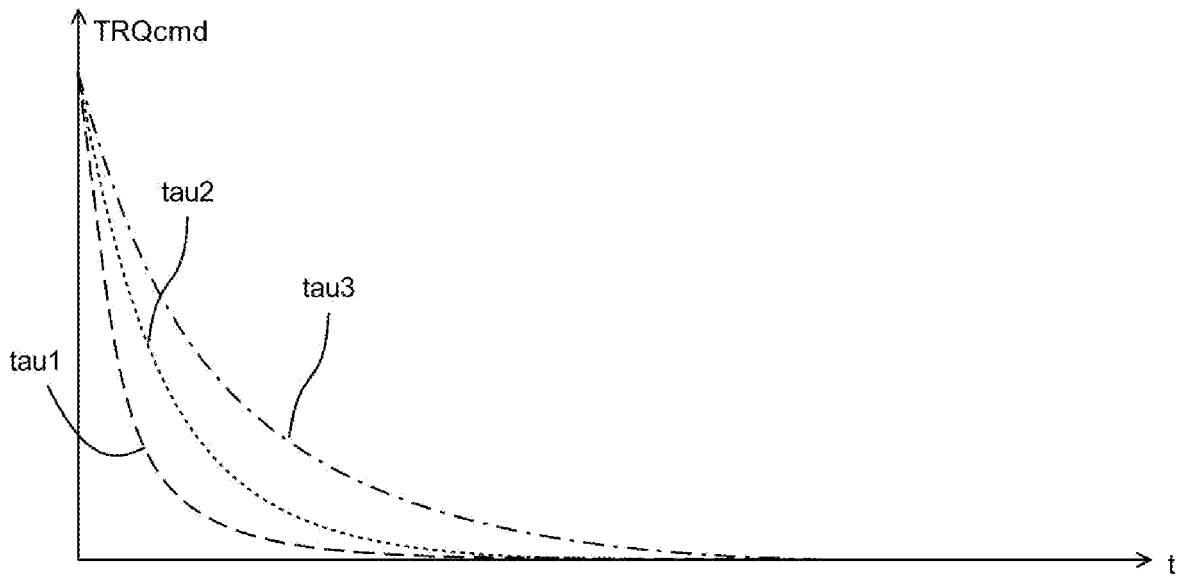


FIGURE 7

[Fig. 8]

**FIGURE 8**

[Fig. 9]

**FIGURE 9**

[Fig. 10]

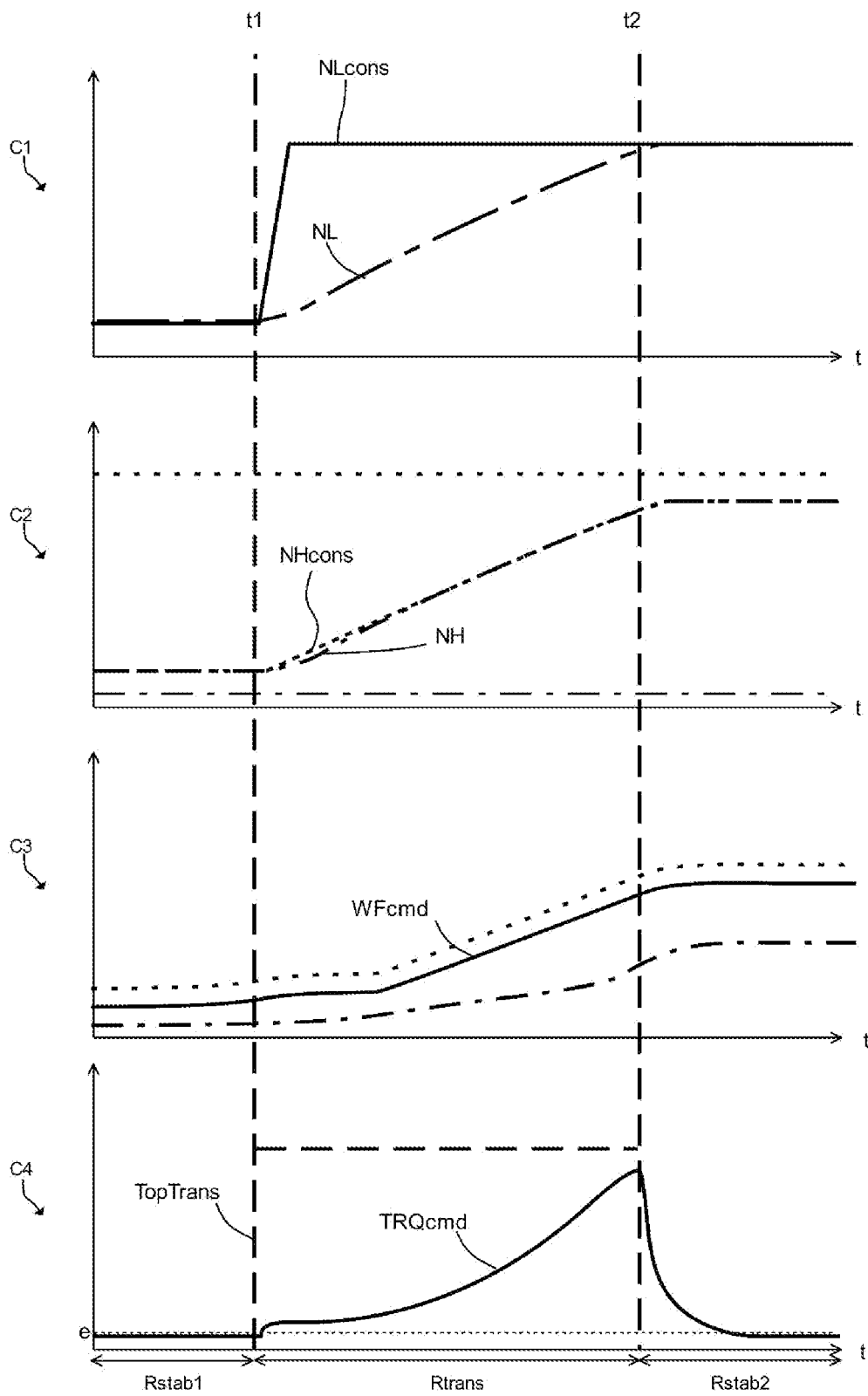
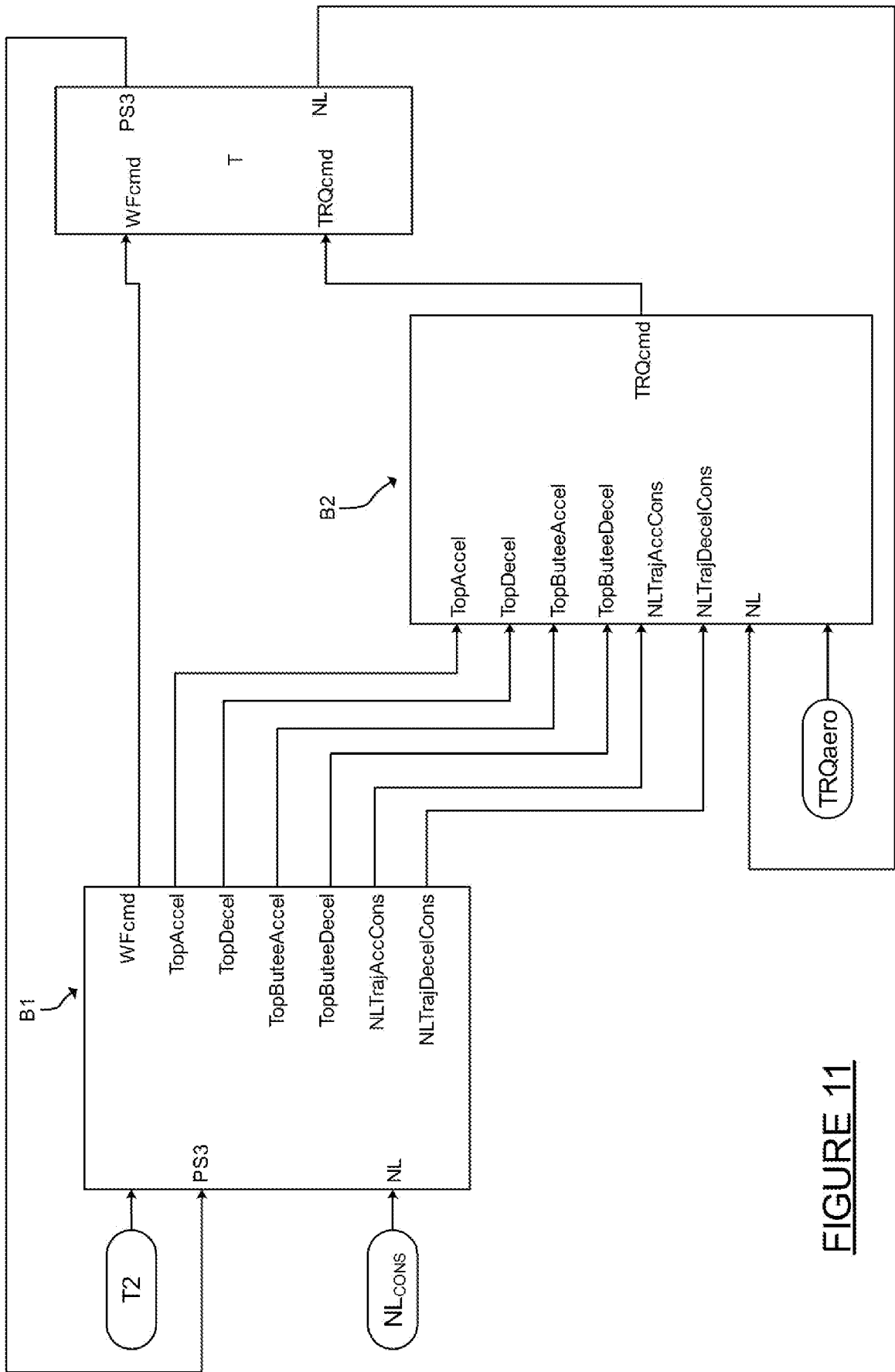


FIGURE 10

[Fig. 11]

**FIGURE 11**

[Fig. 12]

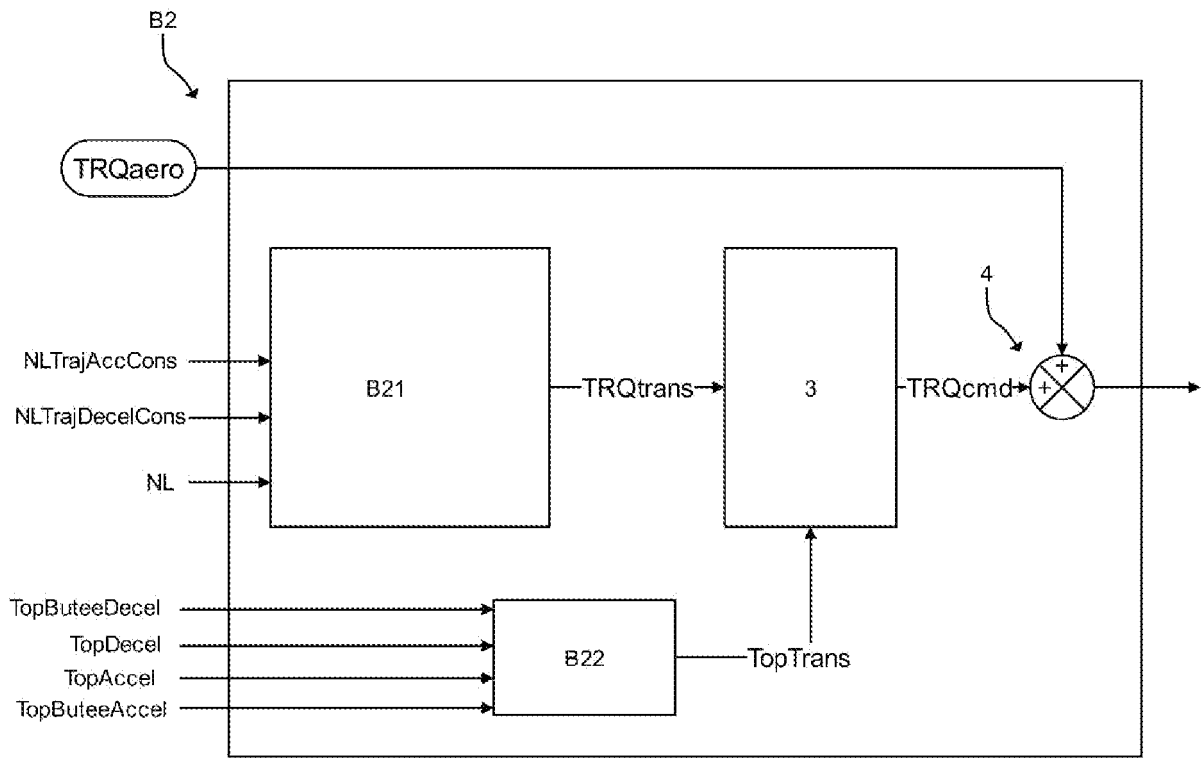


FIGURE 12

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 919902
FR 2305462

| 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 3 116 865 A1 (SAFRAN AIRCRAFT ENGINES [FR]) 3 juin 2022 (2022-06-03) * alinéas [0043] - [0052], [0056] - [0058]; revendications 1,5; figures 3,5 * ----- | 1-9 | F02C 7/32 F02C 7/36 F02C 9/28 F02K 3/06 |
| A | FR 3 087 491 A1 (SAFRAN AIRCRAFT ENGINES [FR]) 24 avril 2020 (2020-04-24) * page 5, ligne 25 - page 6, ligne 19; figures 4,5 * * page 16, ligne 25 - page 16, ligne 4 * ----- | 1-9 | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) F01D F02C |
| Date d'achèvement de la recherche | | Examineur | |
| 11 décembre 2023 | | Steinhauser, Udo | |
| 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 2305462 FA 919902**

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 **11-12-2023**
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 3116865 | A1 | 03-06-2022 | CN 116670380 A | 29-08-2023 |
| | | | EP 4251866 A1 | 04-10-2023 |
| | | | FR 3116865 A1 | 03-06-2022 |
| | | | WO 2022112028 A1 | 02-06-2022 |
| ----- | | | | |
| FR 3087491 | A1 | 24-04-2020 | BR 112021007033 A2 | 20-07-2021 |
| | | | CA 3115868 A1 | 23-04-2020 |
| | | | CN 112955639 A | 11-06-2021 |
| | | | EP 3850202 A1 | 21-07-2021 |
| | | | FR 3087491 A1 | 24-04-2020 |
| | | | JP 2022504879 A | 13-01-2022 |
| | | | US 2021348569 A1 | 11-11-2021 |
| | | | WO 2020078720 A1 | 23-04-2020 |
| ----- | | | | |