



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2006/08/28

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2007/03/02

(30) Priorité/Priority: 2005/09/02 (FR05 08994)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *F16D 65/21* (2006.01),
B60T 13/74 (2006.01), *B64C 25/44* (2006.01)

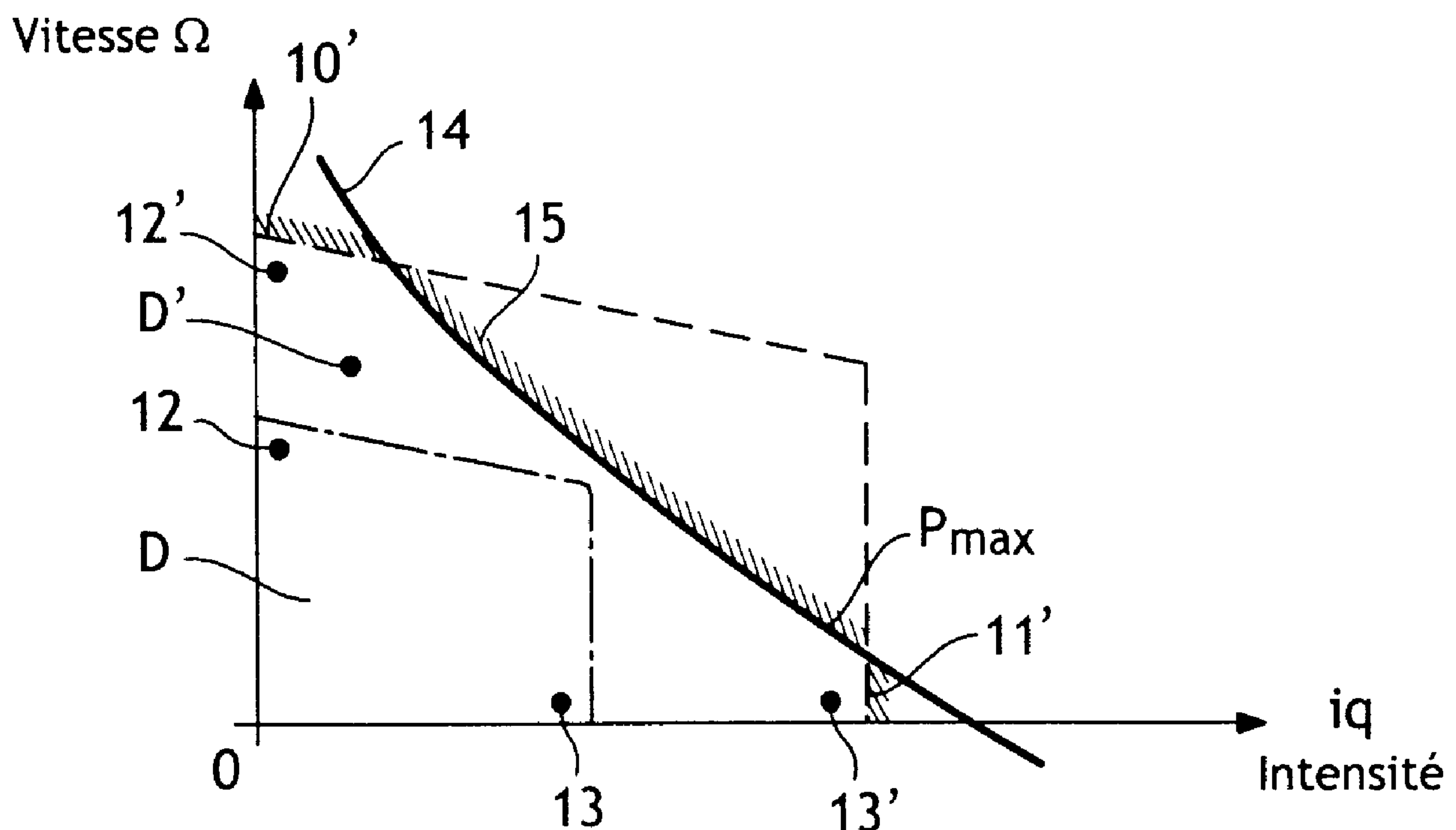
(71) Demandeur/Applicant:
MESSIER-BUGATTI, FR

(72) Inventeurs/Inventors:
THIBAUT, JULIEN, FR;
NIERLICH, FLORENT, FR

(74) Agent: GOUDREAU GAGE DUBUC

(54) Titre : PROCÉDE DE GESTION D'UN ACTIONNEUR DE FREIN ELECTROMECHANIQUE, NOTAMMENT POUR AERONEF

(54) Title: PROCESS FOR THE MANAGEMENT OF AN ELECTROMECHANICAL BRAKE ACTUATOR, INCLUDING FOR AIRCRAFT



(57) Abrégé/Abstract:

L'invention concerne un procédé de gestion d'un actionneur de frein électromécanique comportant un moteur électrique adapté à déplacer un poussoir en regard d'une pile de disques pour appliquer sélectivement un effort de freinage sur la pile de disques, le procédé comportant l'étape de faire fonctionner l'actionneur dans un domaine de fonctionnement donné du plan intensité/vitesse de sorte que le domaine de fonctionnement est choisi pour présenter une frontière ayant une portion qui s'étend sensiblement selon une courbe d'isopuissance tracée dans le plan intensité/vitesse.

PRECIS DE DIVULGATION

L'invention concerne un procédé de gestion d'un actionneur de frein électromécanique comportant un moteur électrique adapté à déplacer un poussoir en regard d'une pile de disques pour appliquer sélectivement un effort de freinage sur la pile de disques, le procédé comportant l'étape de faire fonctionner l'actionneur dans un domaine de fonctionnement donné du plan intensité/vitesse de sorte que le domaine de fonctionnement est choisi pour présenter une frontière ayant une portion qui s'étend sensiblement selon une courbe d'isopuissance tracée dans le plan intensité/vitesse.

Figure 3.

L'invention concerne un procédé de gestion d'un actionneur de frein électromécanique, notamment pour aéronef.

ARRIERE-PLAN DE L'INVENTION

5 On connaît des procédés de gestion d'un actionneur de frein électromécanique comportant un moteur électrique adapté à déplacer un poussoir en regard d'une pile de disques pour appliquer sélectivement un effort de freinage sur la pile de disques.

10 A titre d'illustration d'un tel frein, la figure 1 représente, en coupe, un frein électromécanique 3 d'aéronef monté sur un essieu 2 d'atterrisseur d'aéronef qui porte une jante 1 (destinée à recevoir un pneumatique non représenté). Un tel frein 3 comporte un tube de torsion 4
15 fixé à l'essieu 2 ainsi qu'une pile de disques 5 qui s'étend entre le tube de torsion 4 et la jante 1. La pile de disques 5 comporte des premiers disques (appelés rotors) solidaires en rotation de la jante 1 et des deuxièmes disques (appelés stators) disposés alternative-
20 ment avec les premiers disques en étant solidaires en rotation du tube de torsion 4 de sorte qu'ils ne tournent pas avec la jante. En regard de la pile de disques s'étend une couronne 6 solidaire du tube de torsion 4 qui porte des actionneurs électromécaniques 7 renfermant cha-
25 cun un moteur électrique (non visible) adapté à déplacer un poussoir 8 en regard de la pile de disques 5 pour appliquer sélectivement sur celle-ci un effort de freinage.

Comme illustré à la figure 2 qui représente le domaine de fonctionnement du moteur électrique de l'un
30 des actionneurs 7 dans le plan intensité/vitesse, ledit domaine de fonctionnement D comporte de façon connue en soi une frontière délimitée d'une part par une première droite 10 (inclinée vers le bas) dont la pente dépend des caractéristiques et dimensions du moteur et la hauteur
35 est fixée par le choix d'une tension d'alimentation du

moteur, et d'autre part par une seconde droite 11 (verticale) définie par une intensité maximale que l'on désire ne pas dépasser lors du fonctionnement du moteur, notamment pour protéger les composants de puissance associés au moteur.

Les points de fonctionnement typiques des actionneurs de frein se situent d'une part au voisinage de l'intersection de l'axe de vitesse et de la première droite 10, comme le point de fonctionnement 12, ce qui correspond à une phase d'approche du poussoir 8 vers les disques 5 à vitesse rapide, et, d'autre part, au voisinage de l'intersection de l'axe d'intensité avec la seconde droite 11, comme le point de fonctionnement 13, ce qui correspond à une phase d'application d'effort par le poussoir 8 sur les disques 5.

En général, sur les aéronefs, la puissance disponible est limitée et il importe que les actionneurs ne puissent appeler une puissance supérieure à la puissance maximale autorisée $P_{\max}$, afin d'éviter de déclencher des dispositifs de protection électrique de l'aéronef, de type disjoncteur.

Cette contrainte conduit donc à définir un domaine de fonctionnement D qui, dans le plan intensité/vitesse, s'étend entièrement sous la courbe d'isopuissance 14 correspondant à la puissance maximale autorisée $P_{\max}$.

Cette limitation conduit à une sous-utilisation des performances de l'actionneur.

OBJET DE L'INVENTION

L'invention a pour objet un procédé de gestion permettant d'augmenter les performance des actionneurs d'un frein électromécanique, tout en faisant en sorte que la puissance appelée n'excède pas la puissance maximale autorisée.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

En vue de la réalisation de ce but, on propose un procédé de gestion d'un actionneur de frein électromécanique comportant un moteur électrique adapté à déplacer un poussoir en regard d'une pile de disques pour appliquer sélectivement un effort de freinage sur la pile de disques, le procédé comportant l'étape de faire fonctionner le moteur électrique dans un domaine de fonctionnement donné du plan intensité/vitesse, le domaine de fonctionnement étant choisi selon l'invention pour présenter une frontière ayant une portion qui s'étend sensiblement selon une courbe d'isopuissance tracée dans le plan intensité/vitesse.

En choisissant comme courbe d'isopuissance une courbe correspondant à la puissance maximale autorisée $P_{\max}$ (ou une puissance légèrement inférieure), le domaine ainsi défini permet un fonctionnement du moteur selon des points de fonctionnement correspondant à des vitesses ou des intensités plus élevées que dans l'art antérieur, tout en évitant que le moteur n'appelle une puissance supérieure à la puissance maximale autorisée.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

L'invention sera mieux comprise à la lumière de la description qui suit en référence aux figures des dessins annexés parmi lesquelles outre les figure 1 et 2 déjà présentées :

- la figure 3 est une figure analogue à la figure 2 montrant la mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 4 est un schéma bloc illustrant l'asservissement du moteur électrique de l'un des actionneurs selon un mode particulier de mise en œuvre de l'invention comportant une saturation de position, une saturation de vitesse et une saturation de courant;
- la figure 5 est une vue de détail du schéma bloc de la figure 4 illustrant la saturation de vitesse;
- la figure 6 est une vue de détail du schéma

bloc de la figure 4 illustrant la saturation de courant;

- la figure 7 est un diagramme illustrant les évolutions d'un seuil intervenant dans les saturations illustrées aux figures 5 et 10;

5 - la figure 8 est un diagramme illustrant les évolutions d'un coefficient intervenant dans les saturations illustrées aux figures 5,6 et 10;

10 - la figure 9 est un diagramme illustrant les évolutions d'un coefficient intervenant dans la saturation illustrée à la figure 6;

- la figure 10 est une vue de détail du schéma bloc de la figure 4 illustrant la saturation de position.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

15 En référence à la figure 3, l'invention consiste à faire fonctionner l'actionneur électromécanique 7 dans un domaine de fonctionnement D' plus grand que le domaine D (illustré en traits mixtes). Le domaine D' est limité par une première droite 10', définie par une tension d'alimentation du moteur plus importante que celle qui définit la première droite 10 de la figure 2, et une se-

20 conde droite 11' correspondant à un courant maximal plus important que celui qui définit la seconde droite 11 de la figure 2. Par ailleurs, et selon l'invention, le domaine D' est délimité par une portion de frontière 15 qui s'étend selon la courbe d'isopuissance 14 correspondant à la puissance $P_{\max}$ (également visible à la figure 2).

25 Le nouveau domaine de fonctionnement D' permet le fonctionnement de l'actionneur 7 selon des points de fonctionnement permettant de plus grandes performances. Ainsi, l'actionneur 7 peut fonctionner au point de fonctionnement 12' donc à une vitesse plus importante que celle associée au point de fonctionnement 12, ou encore au point de fonctionnement 13', donc à un couple plus important que celui associé au point 13. Néanmoins, le do-

30 maine D' reste entièrement sous la courbe d'isopuissance

35

14 correspondant à $P_{\max}$ de sorte que le fonctionnement de l'actionneur dans le domaine de fonctionnement D' limite la puissance appelée par l'actionneur 7 à une puissance au plus égale à la puissance maximale $P_{\max}$.

5 Le principe de l'invention étant exposé, un mode particulier de mise en œuvre de l'invention est maintenant détaillé.

En référence à la figure 4, l'actionneur électromécanique 7 est de façon connue en soi alimenté par un
10 onduleur 20 qui, génère trois courants alternatifs à destination des trois phases du moteur électrique équipant l'actionneur 7. L'onduleur 20 est alimenté par une source électrique 21 adaptée à débiter un courant I sous une tension V sensiblement constante et commandé par un as-
15 servissement qui, à partir d'une consigne de position angulaire du moteur $\bar{\theta}$ (à laquelle correspond une position du poussoir en regard de la pile de disques), génère une commande $\underline{c}$ de l'onduleur telle que le moteur électrique de l'actionneur 7 soit commandé jusqu'à atteindre une po-
20 sition angulaire correspondant à la consigne de position angulaire $\bar{\theta}$.

L'asservissement décrit ici comporte une boucle en position, une boucle en vitesse et une boucle en courant imbriquées les uns dans les autres.

25 La consigne de position angulaire $\bar{\theta}$ générée par un calculateur de freinage (non illustré) est tout d'abord soumise à un saturateur de position 22 (qui sera détaillé plus loin en relation avec la figure 10) agencé pour limiter la pente maximale de la consigne de position
30 angulaire $\bar{\theta}$ (c'est-à-dire la variation de la consigne de position angulaire $\bar{\theta}$ en fonction du temps) à une valeur maximale déterminée. Cette saturation filtre des montées brusques de la consigne de position angulaire requérant des fonctionnements à des puissances importantes.

35 La sortie $\bar{\theta}_{sat}$ du saturateur de position 22 forme

l'entrée positive d'un sommateur 23 dont l'entrée négative est formée par une mesure θ de la position angulaire du moteur de l'actionneur 7, formant ainsi la boucle de position.

5 La sortie du sommateur 23, c'est-à-dire l'erreur $\varepsilon_\theta = \bar{\theta}_{sat} - \theta$, forme l'entrée d'un premier PID 24 dont la sortie est une consigne de vitesse $\bar{\Omega}$ de rotation du moteur (qui, à un coefficient près, est également une consigne de vitesse de déplacement du poussoir). La consigne de
10 vitesse $\bar{\Omega}$ est soumise à un saturateur de vitesse 25 (qui sera détaillé plus loin en relation avec la figure 5) agencé pour limiter la consigne de vitesse $\bar{\Omega}$ de sorte que le point de fonctionnement de l'actionneur ne sorte pas du domaine D'. La sortie $\bar{\Omega}_{sat}$ du saturateur de vitesse
15 25 forme l'entrée positive d'un sommateur 26 dont l'entrée négative est formée par une mesure Ω de la vitesse de rotation du moteur de l'actionneur 7, formant ainsi la boucle de vitesse.

La sortie du sommateur 26, c'est-à-dire l'erreur
20 $\varepsilon_\Omega = \bar{\Omega}_{sat} - \Omega$, forme l'entrée d'un deuxième PID 27 dont la sortie est une consigne de courant $\bar{i}$. La consigne de courant $\bar{i}$ est soumise à un saturateur de courant 28 (qui sera détaillé plus loin en relation avec la figure 6) agencé pour limiter la consigne de courant $\bar{i}$ de sorte
25 que le point de fonctionnement de l'actionneur ne sorte pas du domaine D'. La sortie $\bar{i}_{sat}$ du saturateur de courant 28 forme l'entrée positive d'un sommateur 29 dont l'entrée négative est formée par une mesure i_q du courant envoyé par l'onduleur 20 au moteur de l'actionneur 7 formant ainsi la boucle de courant. La valeur i_q est estimée
30 de façon connue en soi à partir des amplitudes instantanées des trois courants de phase générés par l'onduleur 20.

Enfin, la sortie du sommateur 29, c'est-à-dire
35 l'erreur $\varepsilon_i = \bar{i}_{sat} - i_q$, forme l'entrée d'un troisième PID 30

dont la sortie est la commande $\underline{c}$.

En référence à la figure 5, le saturateur de vitesse 25 comporte tout d'abord un premier limiteur 40 qui limite la consigne de vitesse $\bar{\Omega}$ de sorte que le point de fonctionnement correspond à la consigne de vitesse $(\bar{\Omega}, i_q)$ reste dans le domaine de fonctionnement D' . On définit un seuil F dépendant du courant i_q selon les modalités suivantes : la puissance consommée par le moteur de l'actionneur 7 soumis à un courant i_q et tournant à la vitesse Ω s'exprime comme $P = k_1 \cdot \Omega \cdot i_q + k_2 \cdot i_q^2$, où le premier terme représente la puissance mécanique développée par le moteur de l'actionneur et le deuxième terme représente les pertes par effet Joule. La courbe d'isopuissance 14 a donc pour équation $P_{\max} = k_1 \cdot \Omega \cdot i_q + k_2 \cdot i_q^2$ où $P_{\max}$ est un paramètre fixé à priori.

Pour un courant i_q donné, il suffit de limiter la consigne de vitesse $\bar{\Omega}$ au seuil F choisi comme suit :

$$F = \frac{P_{\max} - k_2 \cdot i_q^2}{k_1 \cdot i_q} \text{ pour } i_q \leq \sqrt{P_{\max}/k_2}, \text{ et } 0 \text{ sinon.}$$

Le seuil F est tracé à la figure 7. Le seuil F suit la courbe d'isopuissance $P_{\max}$ jusqu'au point où celle-ci croise l'axe des abscisses, puis garde la valeur nulle. On voit sur la figure 7 l'effet du premier limiteur 40 qui, pour un courant i_q donné, ramène la consigne de vitesse $\bar{\Omega}$ à la valeur $\bar{\Omega}'$ prise sur la courbe de seuil F , qui coïncide avec la frontière 15 du domaine D' (tracé en pointillés sur la figure 7), de sorte que le point de fonctionnement est ramené dans le domaine D' .

Cependant, en fonctionnement, il se peut que les paramètres ayant servi à déterminer le seuil F (essentiellement la constante de couple k_1 et la valeur de la résistance électrique k_2) varie pour diverses raisons (usure, échauffement...). Dès lors, bien que le limiteur 40 fonctionne correctement, la puissance peut, de façon accidentelle, dépasser la puissance $P_{\max}$.

Pour empêcher de tels dépassements, le saturateur de vitesse 25 comporte un limiteur de sécurité 41 qui affecte la sortie $\bar{\Omega}$ du premier limiteur 40 d'un coefficient G dépendant du courant I d'alimentation de l'onduleur 20 selon les modalités suivantes: la puissance consommée par l'onduleur 20 vaut $P=V \cdot I$. La tension d'alimentation V étant sensiblement constante, la puissance consommée par l'onduleur 20 varie donc sensiblement comme le courant d'alimentation I . La puissance $P_{\max}$ correspond ainsi à un courant $I_{\max}$ tel que $P_{\max} = V \cdot I_{\max}$. Le coefficient G est dès lors choisi, comme illustré à la figure 8, de façon qu'il soit égal à 1 tant que le courant d'alimentation I est inférieur à un courant de seuil I_s (par exemple 90% du courant $I_{\max}$), puis diminue linéairement vers 0 quand le courant d'alimentation I atteint le courant $I_{\max}$.

La sortie du saturateur de vitesse 25 est ainsi égale à $\bar{\Omega}_{\text{sat}} = G \cdot \bar{\Omega}$. Ainsi, si courant d'alimentation I de l'onduleur 20 s'approche du courant $I_{\max}$, le consigne de vitesse se voit affectée d'un coefficient diminuant vers 0, de sorte que le poussoir ralentit et la puissance appelée diminue, ce qui a pour effet d'éloigner le courant d'alimentation I du courant $I_{\max}$. Ainsi, la puissance consommée ne peut dépasser la puissance maximale $P_{\max}$.

En référence à la figure 6, le saturateur de courant 28 comporte un premier limiteur 42 qui limite la consigne de courant $\bar{i}$ à un seuil F^{-1} dépendant de la vitesse Ω et illustré à la figure 9, ce seuil étant ici choisi comme étant la fonction réciproque du seuil F utilisé pour le premier limiteur 40 du saturateur de vitesse 25 (graphiquement, le seuil F^{-1} se déduit du seuil F la figure 7 si on prend soin d'échanger mentalement l'axe de abscisses et l'axe des ordonnées).

On voit sur la figure 9 l'effet de la saturation qui, pour une vitesse Ω donnée, ramène la consigne de

courant $\bar{i}$ à la valeur $\bar{i}'$ prise sur la courbe de seuil F^{-1} , qui coïncide avec la frontière 15 du diagramme de fonctionnement D' (tracé en pointillés sur la figure 9), de sorte que le point de fonctionnement $(\Omega, \bar{i})$ est ramené dans le domaine D' .

Le saturateur 28 comporte également un limiteur 43 de sécurité, en tout point identique au limiteur de sécurité 41 du saturateur de vitesse 25.

Enfin, en référence à la figure 10, le saturateur de position 23 comporte tout d'abord un dérivateur 44 estimant une dérivée temporelle $\bar{\tau}$ de la consigne de position $\bar{\theta}$. Puis la dérivée temporelle $\bar{\tau}$ (qui a la dimension d'une vitesse angulaire) est soumise à un premier limiteur 45 en tout point identique au premier limiteur 40 du saturateur 25, qui fait donc appel au seuil F et qui fournit en sortie une valeur $\bar{\tau}'$. Cette valeur est soumise à un limiteur de sécurité 46 en tout point identique aux limiteurs de sécurité 41 et 43 pour fournir une dérivée temporelle saturée $\bar{\tau}_{sat}$, qui est traitée par un intégrateur temporel 47 pour fournir la consigne de position saturée $\bar{\theta}_{sat}$ le point de fonctionnement $(\bar{\tau}_{sat}, i_q)$ est alors dans le domaine de fonctionnement D' .

L'invention n'est pas limitée à ce qui vient d'être décrit, mais bien au contraire englobe toute variante entrant dans le cadre défini par les revendications.

En particulier, bien que l'on ait décrit le fonctionnement de l'actionneur et la mise en œuvre de l'invention dans le premier quadrant du plan intensité/vitesse, il est évident que l'invention peut être étendue aux trois autres quadrants dudit plan. Ainsi, chaque quadrant présentera une portion de frontière s'étendant sensiblement selon une courbe d'isopuissance.

Bien que l'asservissement illustré ici mette en œuvre une saturation de position, une saturation de vi-

tesse et une saturation de courant, on pourra se contenter de mettre en œuvre deux de ces saturations, voire une seule. Toutes ont en effet pour fonction de maintenir le point de fonctionnement de l'actionneur dans le domaine D'. Bien entendu, plus on prévoit de saturations, plus les risques de voir le point de fonctionnement franchir la frontière du domaine D' diminuent. Cependant, l'augmentation du nombre des saturations contribue à déstabiliser l'asservissement en introduisant à chaque fois des retards dans la boucle d'asservissement. Ainsi donc, le nombre de saturations utilisé résultera d'un compromis entre la diminution du risque pour le point de fonctionnement de sortir du domaine de fonctionnement D' et la stabilité de l'asservissement.

Bien que les saturateurs illustrés comprennent un premier limiteur dont le seuil est calculé au moyen de fonctions continues du courant ou de la vitesse mesurée qui donnent au domaine de fonctionnement une frontière épousant parfaitement la forme d'une courbe d'isopuissance dans le plan intensité/vitesse, on pourra construire une frontière qui n'épouse pas parfaitement la courbe d'isopuissance, par exemple au moyen d'une frontière en escaliers.

Les saturateurs pourront ne pas comporter de limiteur de sécurité, si l'on ne craint pas les dépassements accidentels et transitoires de puissance au delà de la puissance maximale autorisée. A cet égard, un moyen de diminuer le risque de tels dépassements consiste à prévoir une frontière du domaine de fonctionnement de l'actionneur qui s'étend non pas selon la courbe d'isopuissance qui correspond à la puissance maximale autorisée $P_{\max}$, mais selon une courbe d'isopuissance correspondant à une valeur de puissance légèrement inférieure $\alpha P_{\max}$, où α est inférieur à 1 (par exemple 90%).

Bien que l'on ait illustré un asservissement en

position de l'actionneur, l'invention s'applique également à un asservissement en effort.

REVENDICATIONS

1. Procédé de gestion d'un actionneur de frein électromécanique comportant un moteur électrique adapté à
5 déplacer un poussoir en regard d'une pile de disques pour appliquer sélectivement un effort de freinage sur la pile de disques, le moteur électrique tournant à une vitesse de rotation sous un courant donné,

le procédé comportant l'étape de faire fonction-
10 ner l'actionneur à un point de fonctionnement défini par la vitesse de rotation du moteur et le courant qui soit contenu dans un domaine de fonctionnement donné du plan intensité/vitesse;

caractérisé en ce que le domaine de fonctionne-
15 ment est choisi pour présenter une frontière ayant une portion qui s'étend sensiblement selon une courbe d'isopuissance tracée dans le plan intensité/vitesse.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel on met en œuvre un asservissement comportant une boucle
20 de courant recevant une consigne de courant, le procédé comportant l'étape de saturer la consigne de courant de sorte que le point de fonctionnement correspondent à la consigne de courant saturée et à la vitesse de rotation reste dans ledit domaine de fonctionnement.

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel on met en œuvre un asservissement comportant une boucle
25 de vitesse recevant une consigne de vitesse, le procédé comportant l'étape de saturer la consigne de vitesse de sorte que le point de fonctionnement correspondent à la consigne de vitesse saturée et au courant reste dans le-
30 dit domaine de fonctionnement.

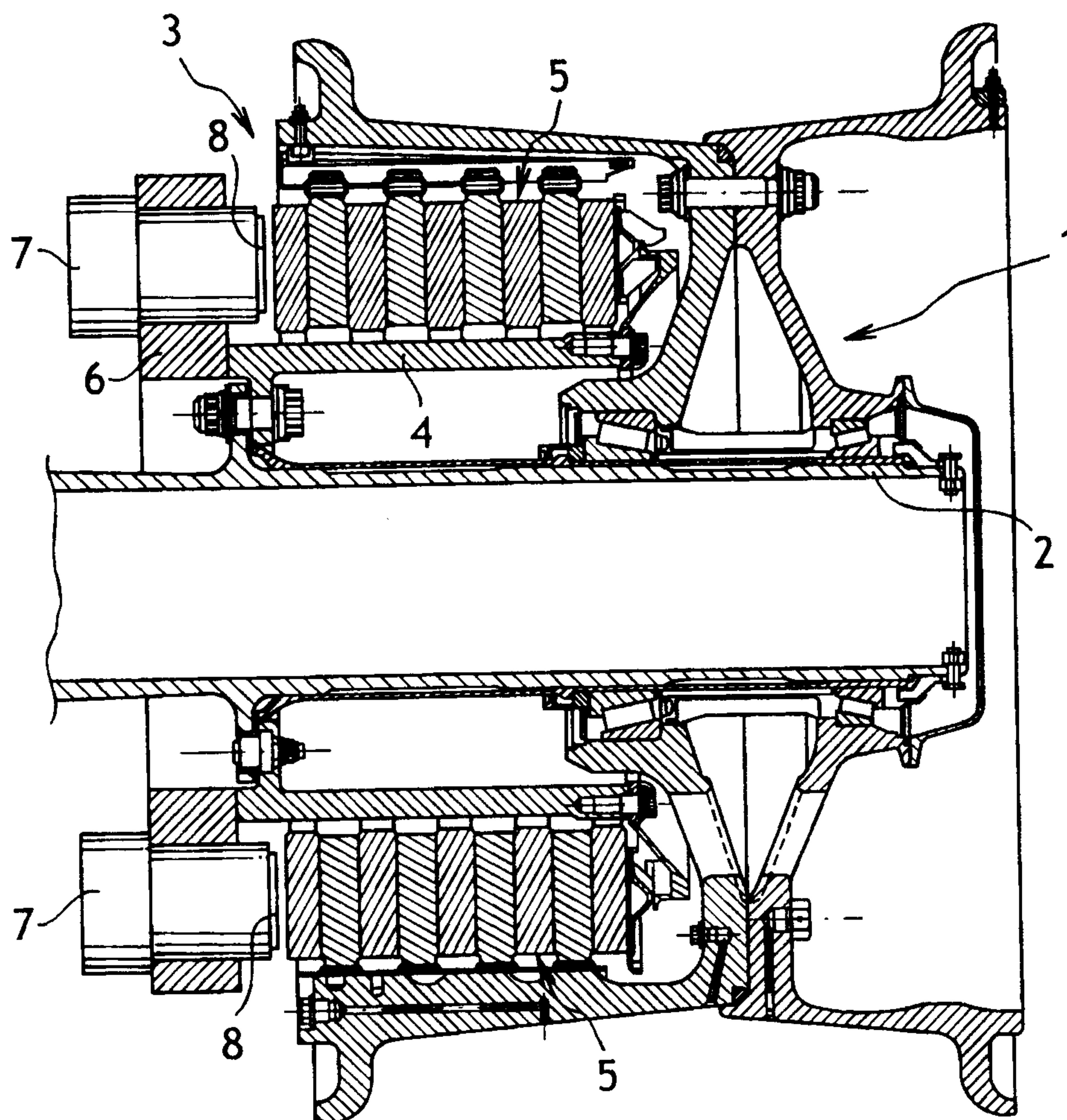
4. Procédé selon la revendication 1, dans lequel on met en œuvre un asservissement comportant une boucle
de position recevant une consigne de position, le procédé
35 comportant l'étape de saturer la consigne de position de

sorte que le point de fonctionnement correspondant à la dérivée de la consigne de position saturée et au courant reste dans ledit domaine de fonctionnement.

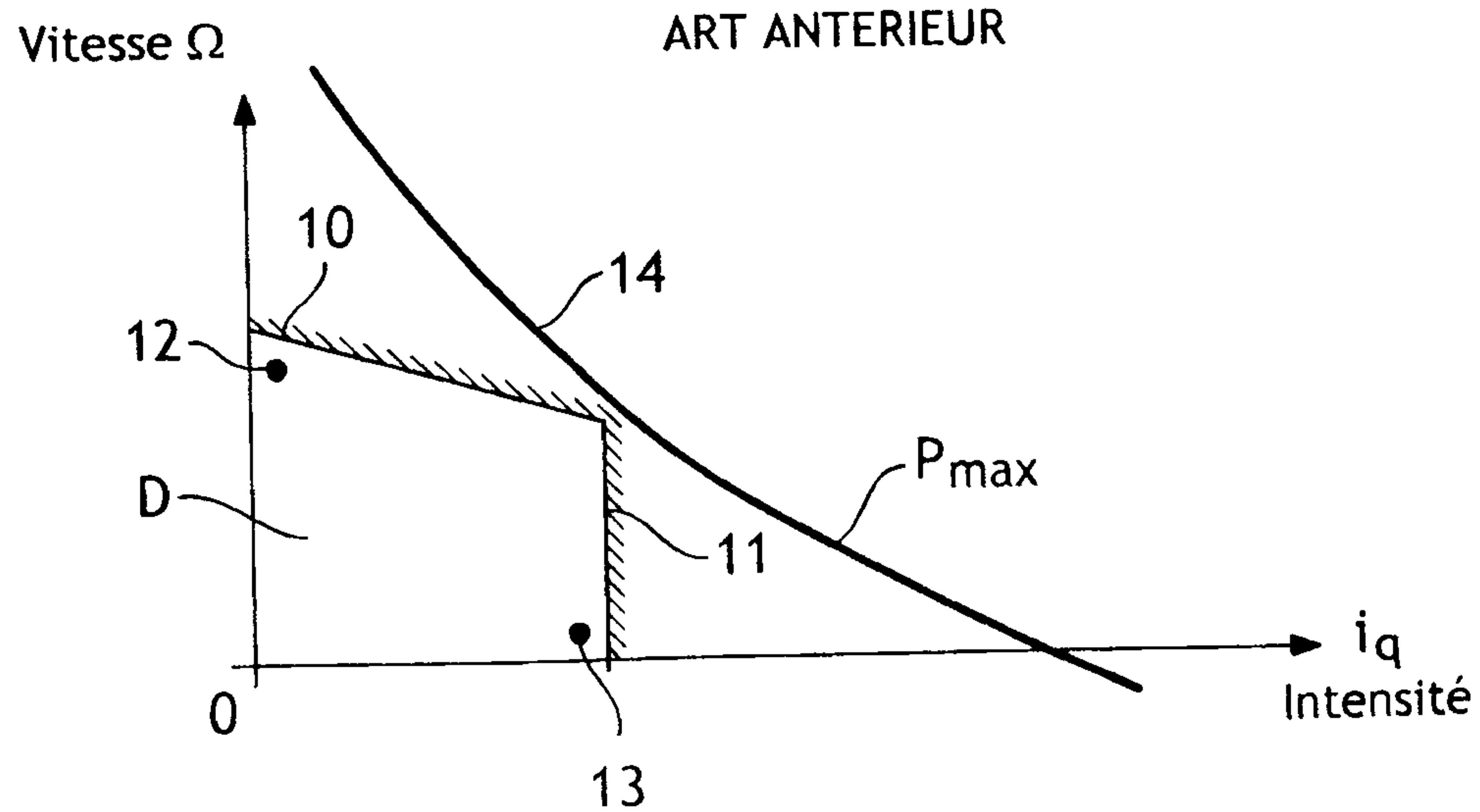
5 5. Procédé selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel l'actionneur est alimenté par une source électrique, la consigne est multipliée par un coefficient qui est nul si la puissance est égale ou supérieure à une puissance maximale autorisée.

10 6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel la source électrique est agencée pour débiter un courant d'alimentation sous une tension sensiblement constante, et dans lequel on mesure le courant d'alimentation et on le compare à un courant maximal correspondant à la puissance maximale autorisée.

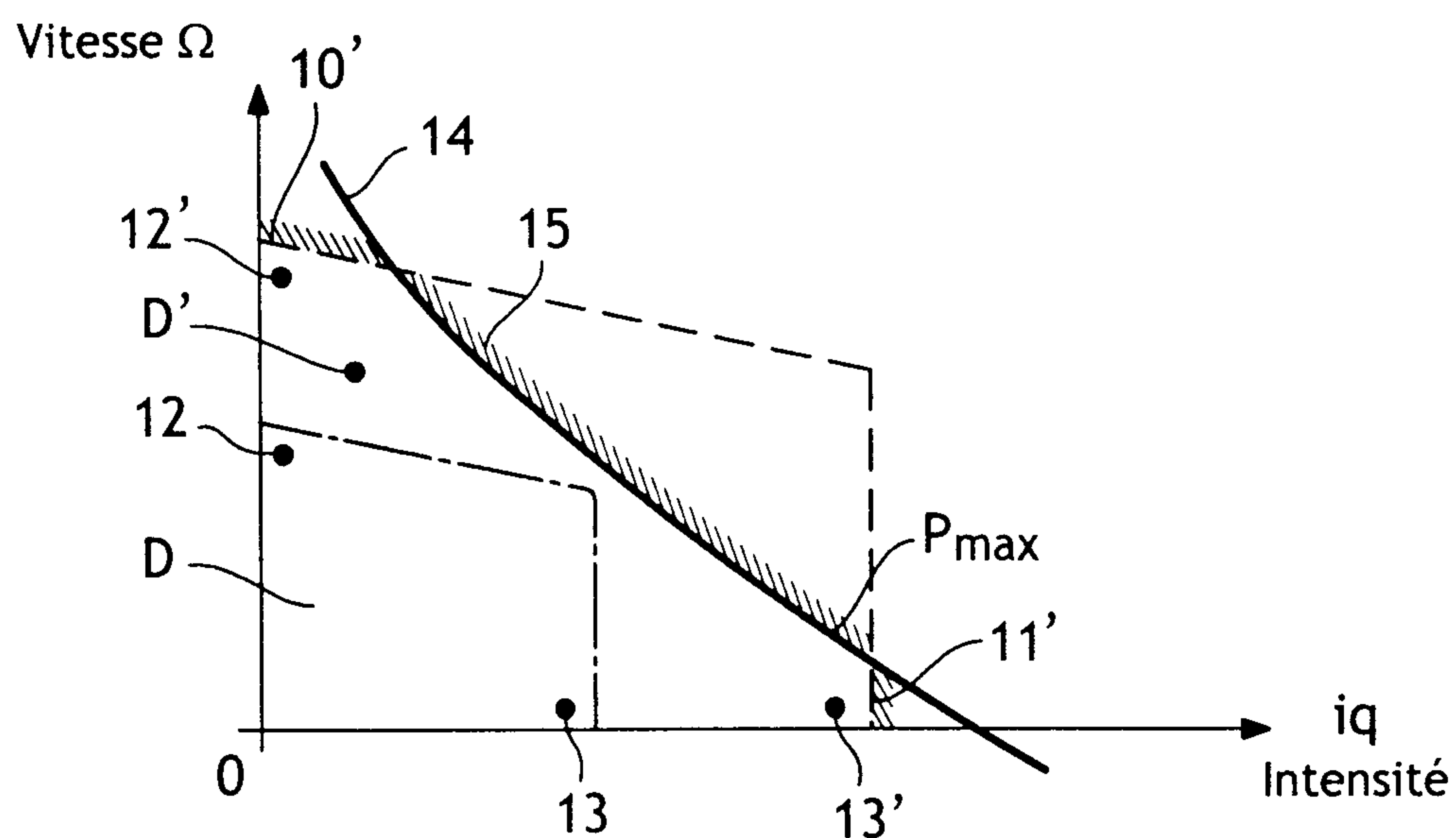
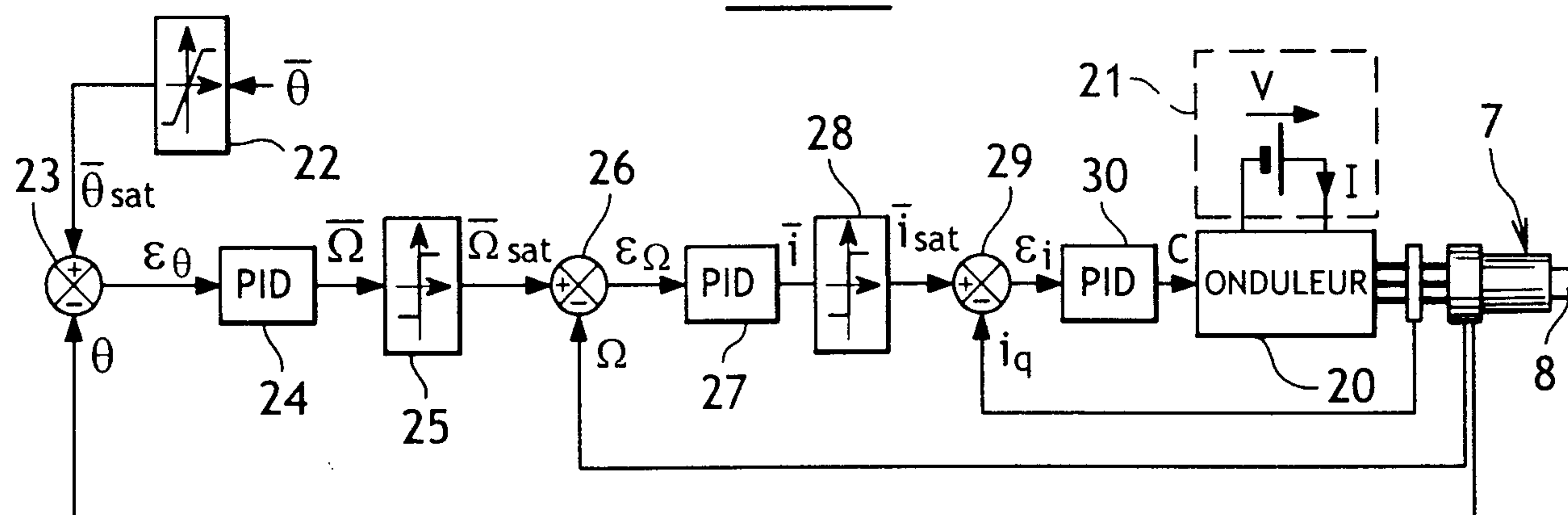
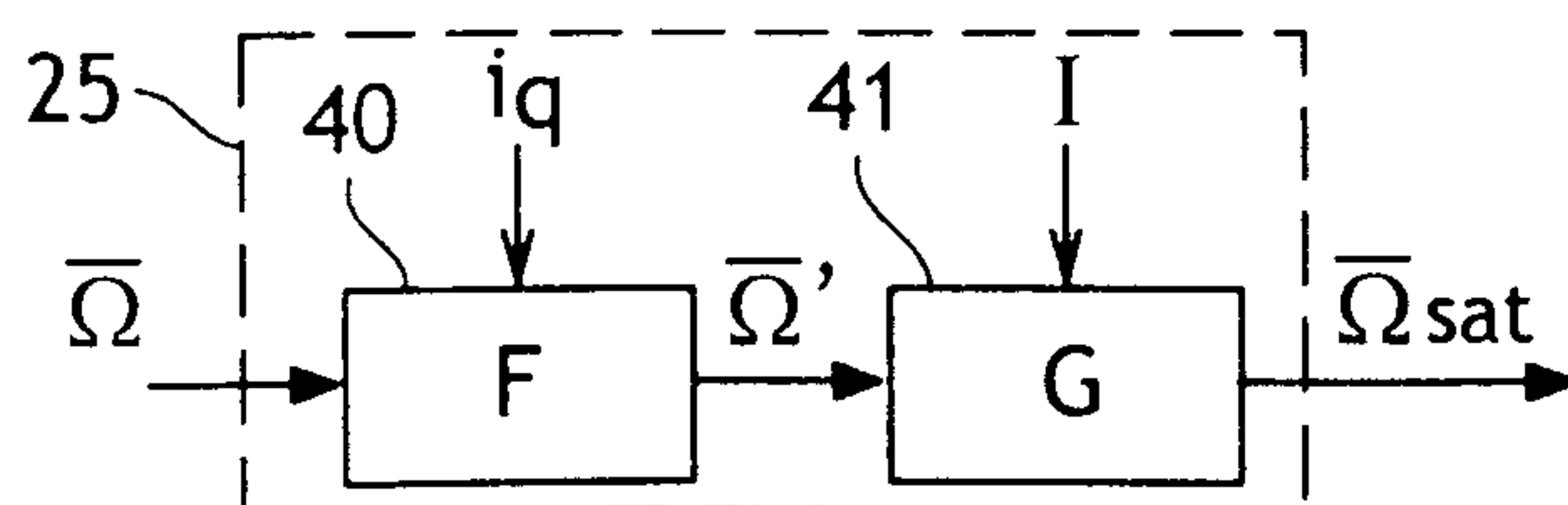
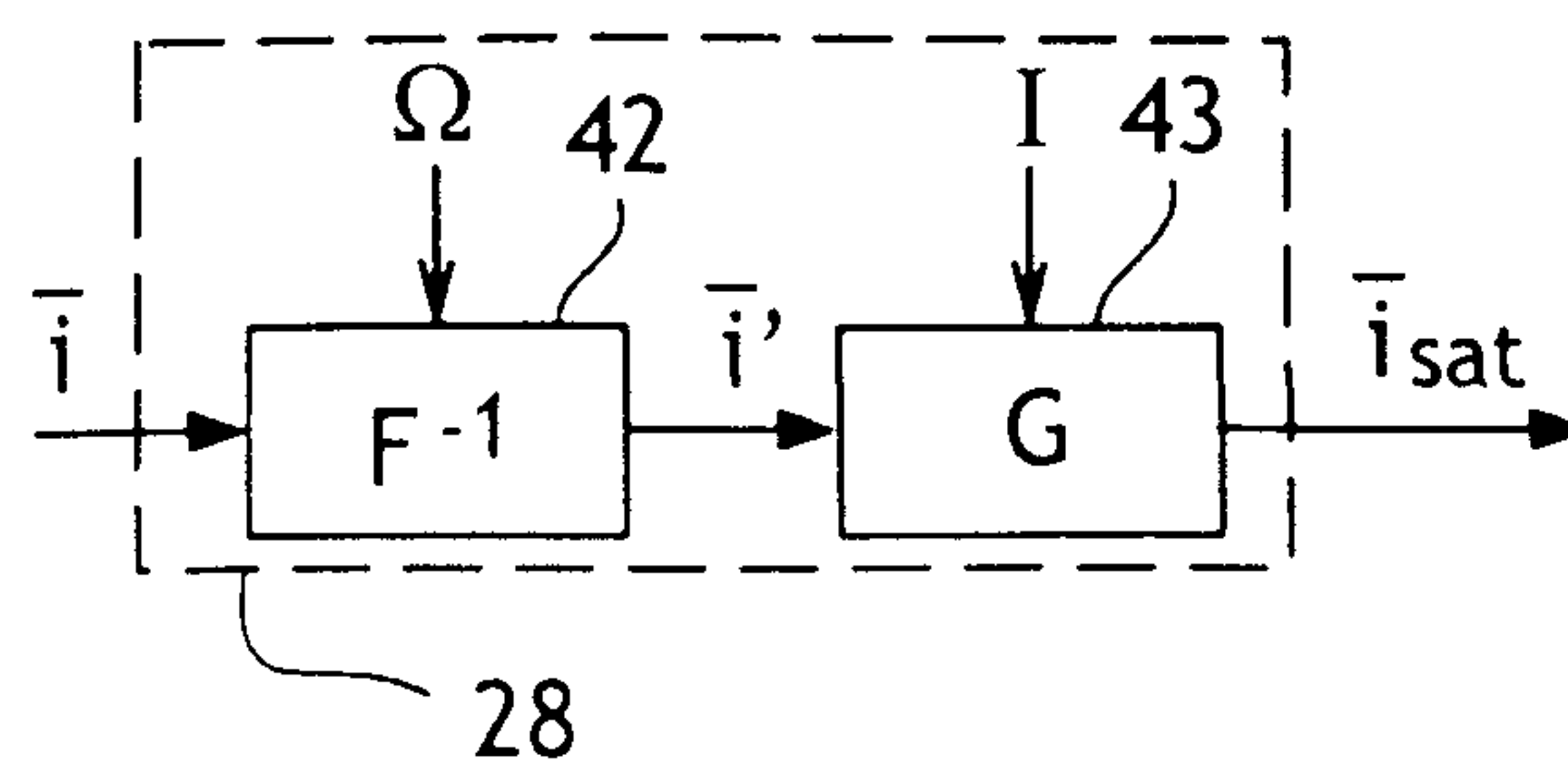
1 / 3

FIG.1FIG.2

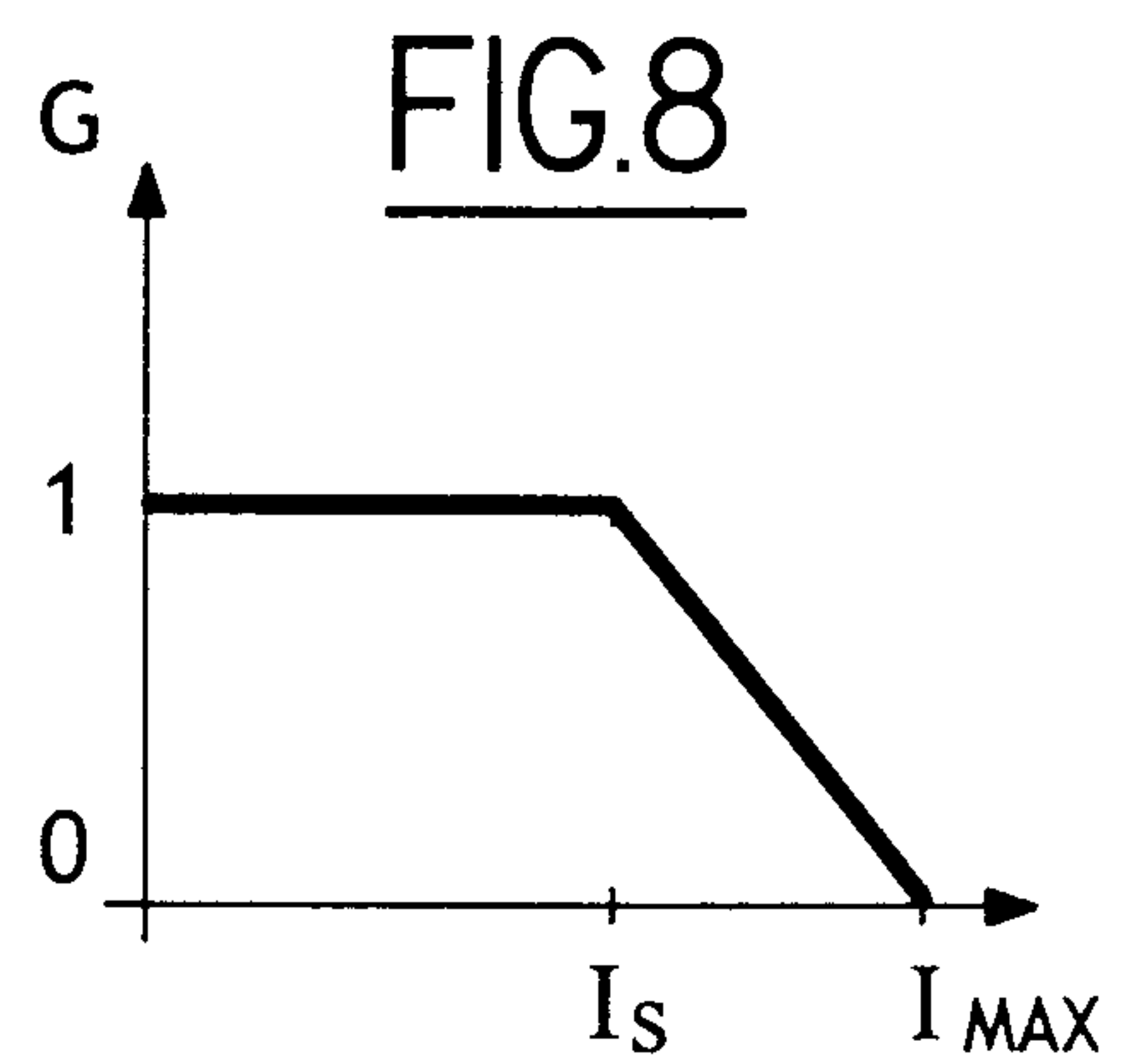
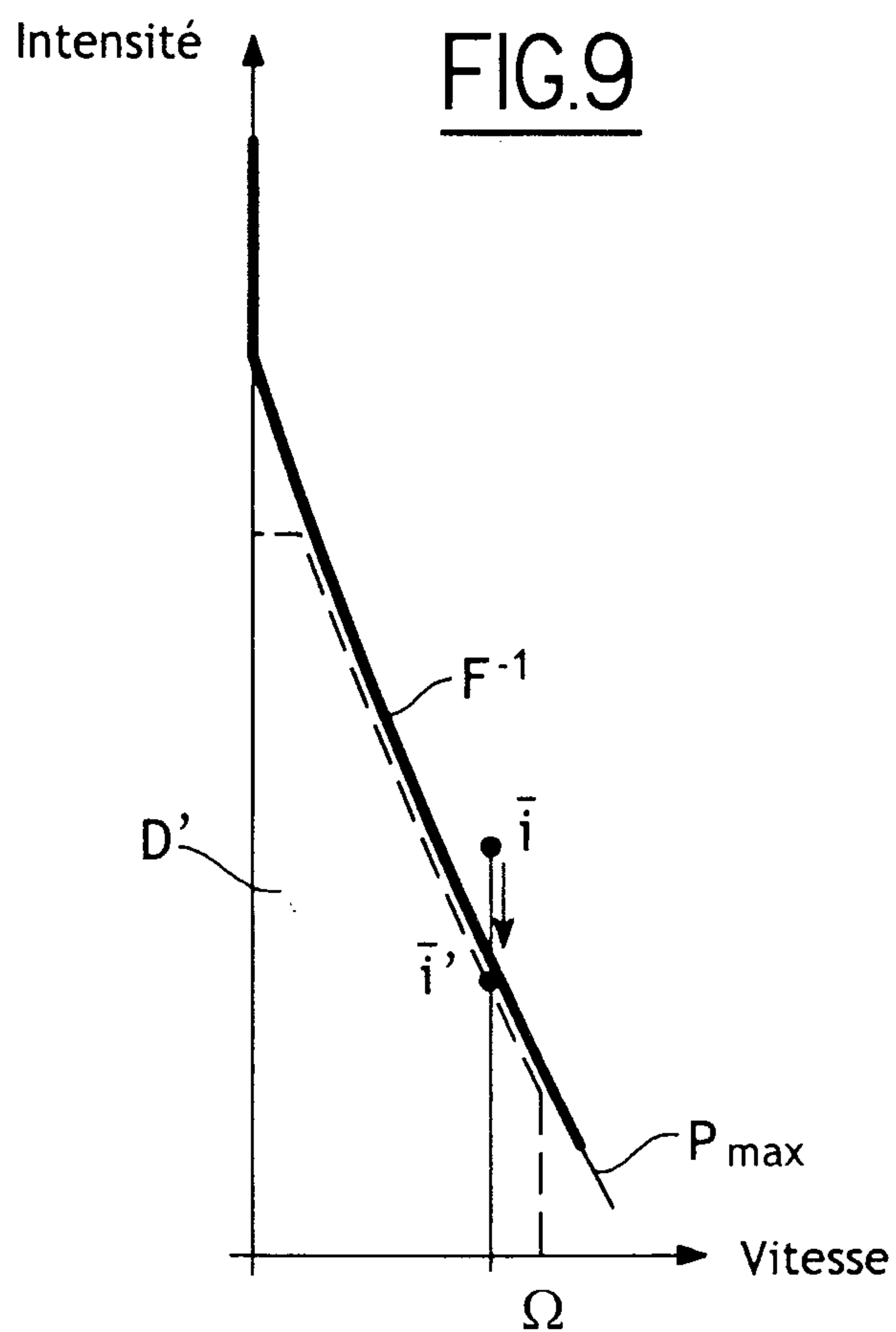
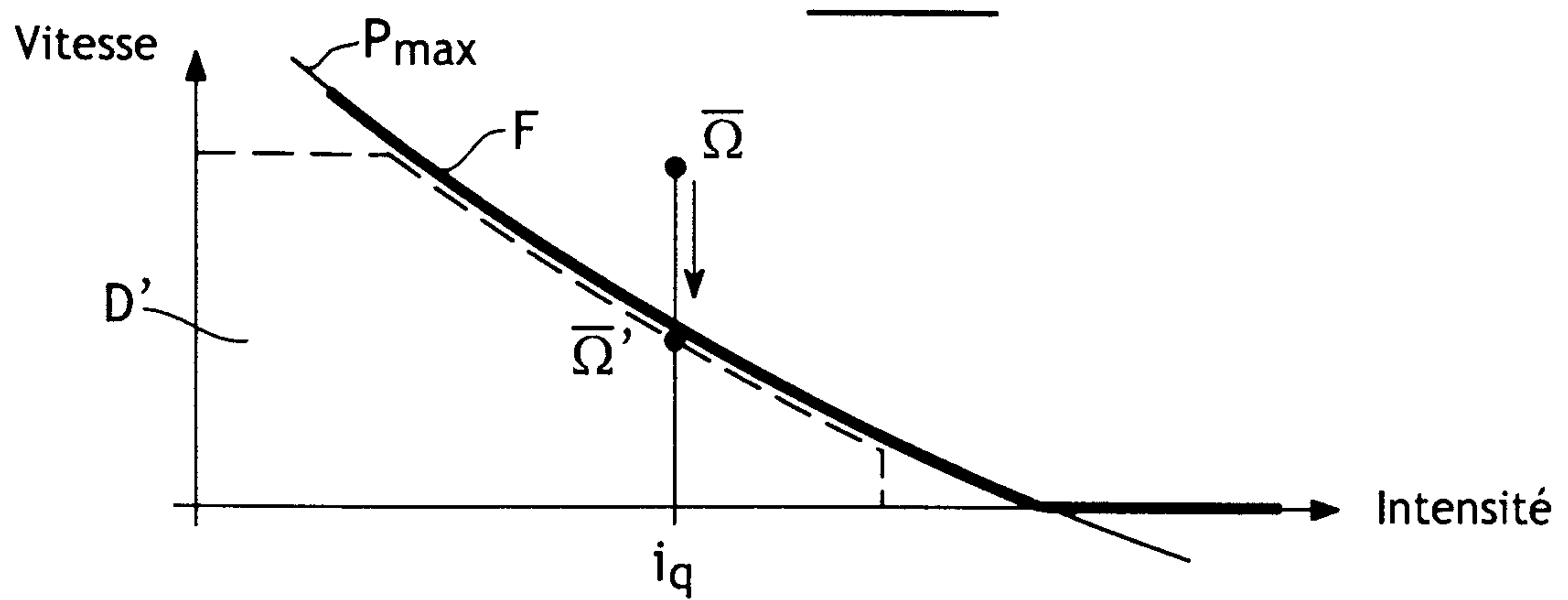
ART ANTERIEUR



2/3

FIG.3FIG.4FIG.5FIG.6

3 / 3

FIG.7FIG.10