

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① **N° de publication :** **3 053 121**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
②① **N° d'enregistrement national :** **16 55995**
⑤① Int Cl⁸ : **G 01 R 22/00** (2017.01), H 02 J 4/00

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ **PROCÉDE D'ESTIMATION DE L'ÉNERGIE ÉCRETEE PAR UNE SOURCE DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE INTERMITTENTE.**

②② **Date de dépôt :** 27.06.16.

③③ **Priorité :**

④③ **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 29.12.17 Bulletin 17/52.

④⑤ **Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention :** 27.07.18 Bulletin 18/30.

⑤⑥ **Liste des documents cités dans le rapport de recherche :**

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

○ **Demande(s) d'extension :**

⑦① **Demandeur(s) :** *ELECTRICITE DE FRANCE Société anonyme — FR.*

⑦② **Inventeur(s) :** PHULPIN YANNICK.

⑦③ **Titulaire(s) :** *ELECTRICITE DE FRANCE Société anonyme.*

⑦④ **Mandataire(s) :** REGIMBEAU.

FR 3 053 121 - B1



DOMAINE DE L'INVENTION

5 L'invention concerne le domaine des méthodes de comptage de la production d'électricité par des installations de production intermittente.

Plus précisément, la présente invention concerne un procédé d'estimation de l'énergie écrêtée par une source de production électrique intermittente.

10

ETAT DE LA TECHNIQUE

Dans certaines situations (par exemple, contraintes de transport ou de distribution, fréquence ou tension en dehors des plages de fonctionnement), les installations de production d'électricité intermittente doivent écrêter leur production, c'est-à-dire limiter la puissance injectée dans le réseau en produisant moins d'électricité que possible.

15

L'écrêtement est une solution déjà connue, notamment pour la production raccordée au réseau de transport lors de congestions, ou pour les nouvelles installations de production d'électricité d'une capacité supérieure à 800W lors d'événements de fréquences hautes (comme préconisé dans les codes de transmissions électriques européens).

20

Pour autant, la mise en œuvre d'un plan d'écrêtement optimal suppose de pouvoir solliciter les installations les mieux placées en priorité, quelle que soit leur date de mise en service et leurs conditions de raccordement. Pour encourager une telle pratique, il faudrait compenser l'énergie écrêtée afin que les producteurs touchés ne subissent pas de préjudice. Ceci requiert une mesure de l'énergie écrêtée.

25

30

Ainsi, plusieurs études (par exemple INPREV avec EDF R&D et ERDF, projet européen MetaPV) ont démontré que l'écrêtement

présente généralement plus de bénéfices que de coûts au périmètre du système électrique.

Le principe de la compensation de l'écrêtement est bien mis en valeur dans la publication (H.K. Jacobsen, T.S. Schröder, 5 « Curtailment of renewable generation economic optimality and incentives », Energy Policy, Vol. 49, 2012 »).

Néanmoins, l'écrêtement est rarement compensé par les gestionnaires de réseaux (ou de systèmes), si ce n'est sous forme de coûts de raccordement réduits, indépendamment des volumes 10 d'énergie qui seront finalement écrêtés lors de l'exploitation de l'installation.

Dans certains pays, un schéma de compensation peut être mis en œuvre pour les installations raccordées au réseau de transport. On estime alors l'énergie écrêtée par rapport au niveau de 15 production avant et après l'évènement ou par comparaison avec d'autres sources identiques dans les mêmes régions. Ces techniques sont toutefois assez aléatoires et peu fiables, notamment pour les très petites unités, dont on ne relève le niveau d'injection que sur des périodes assez longues.

Certains documents, par exemple US 2014/0316595 et US 20 2013/0173188 se préoccupent d'une estimation d'énergie écrêtée côté consommateur et non pas côté source de production. De plus, ces documents préconisent d'utiliser une méthode de comparaison de l'état de consommation avant et après l'écrêtage 25 et non pas d'estimer l'énergie écrêtée sur la base des variables pertinentes mesurées pendant l'écrêtage.

Il existe donc un besoin pour mesurer de manière fiable l'énergie qu'une installation électrique écrêtant son énergie aurait produite 30 si elle n'avait pas limité son injection, en particulier en prenant en compte des paramètres locaux et instantanés représentatifs de l'énergie écrêtée réelle de chaque installation.

PRESENTATION DE L'INVENTION

Dans ce contexte, la présente invention a pour but de présenter de nouvelles fonctionnalités permettant de perfectionner l'état de la technique.

5

En particulier, un but de l'invention est de proposer un procédé permettant d'estimer de manière fiable l'énergie écrêtée par une source de production électrique intermittente.

Un autre but de l'invention est de transmettre cette mesure d'énergie écrêtée vers un module adapté d'interface.

10

Ce but est atteint selon la présente invention grâce à un procédé d'estimation de l'énergie écrêtée par une source de production électrique du type éolien, solaire, hydraulique ou hydrolien, comprenant les étapes consistant à :

i) mesurer la puissance écrêtée par cette source, sur la base d'une simulation de la puissance potentielle fondée sur l'exploitation d'un modèle mettant en œuvre les paramètres locaux et instantanés au niveau du site de la source de production électrique, lesquels paramètres comprennent :

15

a) des consignes de sortie de la boucle de contrôle de la source de production électrique incluant un paramètre représentatif de la puissance effective instantanée et de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement, ainsi que

20

b) des consignes ou mesures caractérisant l'écrêtement, du type ordre d'écrêtement ou mesure locale qui suscite un écrêtement, corrigées par

25

c) les paramètres d'état de la source de production électrique concernée, et

ii) transmettre et mettre à disposition l'information obtenue sur un module adapté d'interface.

30

Avantageusement, mais facultativement, le procédé selon l'invention peut en outre comprendre au moins une des caractéristiques suivantes :

- 5 - le paramètre représentatif de la puissance effective est une consigne de sortie de la boucle de contrôle correspondant à la consigne effective appliquée,
- le paramètre représentatif de la puissance effective est un signal de sortie de la boucle de contrôle correspondant à la puissance réelle,
- 10 - le procédé comprend en outre une étape consistant à calculer l'énergie sur la base de la simulation de puissance,
- l'énergie est calculée avant transmission au module adapté d'interface,
- la puissance est transmise au module adapté d'interface et l'énergie est calculée au niveau de ce module,
- 15 - que le module adapté d'interface est un module compteur commun avec le compteur d'énergie injectée,
- le procédé comprend une étape d'étalonnage sur des périodes hors écrêtement
- 20 - le procédé exploite une fonction de la forme

$$y_i = f(x, u_i, u_2) , \text{ avec } i=1,2$$

dans laquelle y_i représente la puissance théoriquement productible sans écrêtement, y_2 représente la puissance productible en tenant compte du signal d'écrêtement, et u_1 représente le vecteur contenant des informations correspondant aux réglages issus d'une boucle de régulation en fonctionnement normal sans écrêtement à l'instant t , u_2 représente les mêmes données issues de la boucle de régulation lors d'un contrôle avec écrêtement,

- 30 - le procédé exploite une fonction de la forme

$$y_i = Ax + B u_i + C u_2 + D$$

dans laquelle x représente l'état de l'installation à l'instant t et A , B , C et D représentent des matrices de calage du modèle appliqué,

5 - dans le cas où la source de production électrique est du type photovoltaïque, ladite source comprenant un module photovoltaïque et d'un convertisseur de puissance associé,

le paramètre représentatif de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement est la tension du bus continu raccordé au module photovoltaïque et les paramètres d'état de la source de production électrique de type photovoltaïque comportent la puissance électrique,

10 - dans le cas où la source de production électrique est du type éolien, ladite source comprenant une turbine à pales orientables et un convertisseur de puissance associé,

15 le paramètre représentatif de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement est β_{turb} correspondant à l'angle des pales de la turbine ; et les paramètres d'état de la source de production électrique de type éolien comportent la puissance électrique P_{gen} soutirée à la turbine,

20 La présente invention concerne également un système comprenant des moyens adaptés pour mesurer la puissance écrêtée par une source de production électrique sur la base d'une simulation de la puissance potentielle fondée sur l'exploitation d'un modèle mettant en œuvre les paramètres locaux et instantanés au niveau du site de la source de production électrique, lesquels paramètres comprennent :

25 a) des consignes de sortie de la boucle de contrôle de la source de production électrique incluant un paramètre représentatif de la puissance effective instantanée et de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement ainsi que

30

b) des consignes ou mesures caractérisant l'écrêtement, du type ordre d'écrêtement ou mesure locale qui suscite un écrêtement, corrigées par

5 c) les paramètres d'état de la source de production électrique concernée,
et transmettre l'information obtenue sur un module adapté d'interface.

DESCRIPTION DES FIGURES

10

D'autres caractéristiques, buts et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui va suivre et en regard des dessins annexés, donnés à titre d'exemples et non limitatifs et sur lesquels :

- 15 - la figure 1 représente un dispositif de contrôle de production décentralisée sans écrêtement,
- la figure 2 représente un dispositif de contrôle de production décentralisée avec écrêtement,
- la figure 3 représente un dispositif de contrôle de production décentralisée comportant une mesure de l'écrêtement,
20 - la figure 4 représente en détail un estimateur d'énergie écrêtée d'un dispositif de contrôle de production décentralisée,
- la figure 5 représente une variante de réalisation de la figure 4, et
25 - la figure 6 représente schématiquement un procédé d'estimation de l'énergie écrêtée par un dispositif de contrôle de production décentralisée.

DESCRIPTION DETAILLEE D'AU MOINS UN MODE DE REALISATION DE L'INVENTION

30

Les figures 1 et 2 représentent un procédé de contrôle de production décentralisée sans mesure de l'énergie écrêtée.

Une installation de production décentralisée, ou dite intermittente, comporte les sources de production d'électricité de type éolien, solaire, hydraulique ou hydrolien.

5

En référence à la figure 1, on a schématisé un système pour la mise en œuvre d'un procédé de contrôle de production sans écrêtement. Le système comporte une installation de production intermittente 10, une boucle 21 de commande de l'installation, un module adapté d'interface 30.

10

Dans une telle installation 10, la production d'énergie est régulée au niveau d'une génératrice ou d'un régulateur de puissance en réaction à des conditions extérieures 51.

15

La boucle de contrôle 21 définit le point de fonctionnement souhaité pour l'installation sans consigne d'écrêtement. Ainsi, de préférence, la boucle 21 vise à extraire un maximum d'énergie de l'installation 10.

La boucle 21 utilise deux valeurs de consignes :

20

- le niveau de production d'électricité de l'installation, y , mesuré au niveau de l'installation 10, capté par capteur en temps réel et
- une valeur significative de l'état de l'installation x . Ladite consigne x correspond à l'état actuel de l'installation 10, défini à l'aide de capteurs installés dans l'installation 10 (vitesse de rotation de la turbine, température de l'installation,...).

25

L'état souhaité de l'installation 10 est représenté par la consigne u_1 en sortie de la boucle 21 à destination de l'installation 10.

30

La consigne u_1 correspond à l'état souhaité de l'installation 10 pour une production maximale. Ladite consigne u_1 est destinée aux éléments contrôlables de l'installation 10 (mécanismes régulant l'orientation des pales, réglages du convertisseur de puissance, signal de tension ou de courant,...) ;

En référence à la figure 2, on a représenté un système pour la mise en œuvre d'un procédé de contrôle de production avec écrêtement comportant la même configuration qu'en figure 1.

5 Le système illustré en figure 2 comporte une boucle 22 définissant le point de fonctionnement souhaité de l'installation 10.

La boucle 22 comporte deux modes de régulation : un mode normal et un mode écrêtement activé lorsqu'elle en reçoit la consigne ou détecte une situation nécessitant de limiter la production d'énergie.

10 Ainsi, par exemple, Le mode écrêtement est activé à la réception par l'installation de production 10 d'un signal d'écrêtement z .

L'état souhaité de l'installation 10 est représenté par la consigne u_2 en sortie de la boucle 22 à destination de l'installation 10.

15 Dans toutes les situations ne nécessitant pas d'écrêtement, la boucle 22 donne les mêmes consignes que la boucle 21 de la figure 1, ainsi $u_1 = u_2$ dans ce mode.

En référence à la figure 3, on a représenté un système permettant le contrôle de production avec une mesure de l'écrêtement.

20 Le système intègre un module de contrôle 20 comprenant les boucles 21 et 22, décrites précédemment.

Le dispositif intègre également un module d'estimation d'énergie 40.

25 La Boucle 21 n'est pas branchée sur l'installation de production intermittente 10 (qui reçoit ses consignes de la boucle 22), mais ses sorties sont transmises à un estimateur 40 qui pourra les comparer à celles de la boucle 22 dans tous les cas ne justifiant pas d'écrêtement.

30 Le principe du module d'estimation 40 est d'estimer, à tout instant, de manière fiable, la puissance qu'aurait pu produire l'installation 10 s'il n'y avait pas eu d'écrêtement.

L'estimateur 40, détaillé dans la figure 4, prend en données d'entrée :

- 5 - l'état souhaité de l'installation 10 représenté par les consignes u_1 et u_2 sorties des boucles 21 et 22 respectivement ; les consignes u_i correspondent à l'état souhaité de l'installation 10 pour une production maximale (u_1) ou écrêtée (u_2). Lesdites consignes sont ainsi respectivement représentatives de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement et de la puissance effective instantanée. Elles sont généralement destinées aux éléments contrôlables de l'installation 10 (mécanismes régulant l'orientation des pales, réglages du convertisseur de puissance, signal de tension ou de courant,...) ;
- 10 - l'état actuel de l'installation, x , défini à l'aide de capteurs installés dans l'installation 10, utilisé aussi en entrée des boucles 21 et 22 : vitesse de rotation de la turbine, température de l'installation,...
- 15 - le niveau de production d'électricité de l'installation, y , mesuré au niveau de l'installation 10, mesuré par capteur en temps réel.
- 20 - facultativement : le signal d'écrêtement, z , qui peut être une mesure de tension ou de fréquence au niveau du réseau de transport ou de distribution ou une requête directement envoyée par le gestionnaire de réseau compétent à destination de l'installation 10. Cette information est facultative car le signal d'écrêtement z est actif si et seulement si les résultats u_1 et u_2 sont différents. Néanmoins, nous considérons cette information utile pour une mesure de contrôle, de vérification que les sorties des boucles 21 et 22 sont identiques ou pas en fonction du signal d'écrêtement z .

30 Le mode de réalisation est décrit ci-après en référence aux figures 4, 5 et 6.

Le procédé d'estimation de l'énergie écrêtée comprend une étape 100 de configuration d'un modèle d'estimation de l'énergie

écrêtée, mettant en œuvre les paramètres locaux et instantanés définis précédemment au niveau du site de la source de production électrique 10.

5 Ainsi, l'estimateur 40 comporte un module de simulation 41, qui met en place un modèle permettant de déterminer le niveau de production de l'installation 10 en fonction de son état et des variables de contrôle.

10 Ledit modèle est représentatif de la puissance qu'aurait pu produire l'installation 10 dans son état actuel s'il n'y avait pas eu d'écèlement.

Ce modèle est pré-paramétré ou mis à jour par apprentissage pour rééquilibrer le modèle au cours de la vie de l'installation 10.

15 Dans ce but, l'estimateur 40 comporte un module 42 permettant le calage du modèle. Lors d'un fonctionnement sans écèlement, le module 42 fonctionne et réactualise les paramètres du modèle d'estimation dans une étape 110 du procédé d'estimation décrite ci-après.

20 Le modèle du module de simulation 41 détermine ce qui aurait été produit par l'installation 10 sans écèlement : il prend en compte l'état de l'installation x , les réglages issus de la boucle 21 (u_1) et éventuellement ceux de la boucle 22 (u_2) pour tenir compte du fait que l'installation 10 peut fonctionner durablement dans un régime sous-optimal lorsque la production est écètement.

25 Deux types de modèles peuvent être considérés pour le dispositif :

- Un modèle physique, qui pourrait être calé initialement en fonction des caractéristiques physiques de l'installation 10;
 - Un modèle mathématique permettant d'approcher au mieux le
- 30 comportement de l'installation 10 sans tenir compte des lois physiques régissant son fonctionnement.

Ce modèle peut être défini comme une fonction $f(x, u_1, u_2)$ dont les paramètres sont définis par la fonction de « calage du modèle » mise en œuvre par le module 42.

5 Le module 42 comporte une mémoire et une base de données 45 permettant le stockage de valeurs d'état de l'installation 10.

Par exemple, pour une fonction f correspondant à un système linéaire $y_i = Ax + B u_i + C u_2 + D$, la fonction « calage du modèle » définira les éléments des matrices A , B , C et D .

10 En figure 4, il est représenté les différentes variables de l'estimateur 40 : u_1 le vecteur contenant les informations correspondantes aux réglages issus de la boucle 21 à l'instant t , u_2 ceux issus de la boucle 22, x l'état de l'installation 10 au même instant t , z les informations signalant la nécessité d'écarter ou non, y_1 la puissance théoriquement productible sans

15 écartement, y_2 la puissance productible en tenant compte du signal d'écarter z , et y la puissance effectivement produite.

Le modèle permettant l'estimation du réalisable consiste en une fonction f telle que :

20 $y_i = f(x, u_i, u_2)$ pour $i = 1$ ou $i = 2$.

Considérer que f dépend de u_2 est facultatif. Cela permet le cas échéant de tenir compte du fait que l'état de l'installation x peut correspondre à un état sous-optimal en période d'écarter.

25

En appliquant le modèle d'« estimation du réalisable » du module 41 aux consignes u_1 et u_2 , on détermine :

- y_1 : la puissance électrique qu'on aurait du théoriquement produire s'il n'y avait pas eu d'écarter
- 30 - y_2 : la puissance électrique qu'on aurait du théoriquement produire dans la situation actuelle (écarter ou pas).

Que l'estimateur soit précis ou pas (f plus ou moins fiable), il applique ainsi la même déformation aux deux estimations.

La différence entre les valeurs y_1 et y_2 correspond à la puissance effectivement écrêtée y^{ecr} .

5 En l'absence d'écrêtement, y^{ecr} doit être nul puisque les consignes u_1 et u_2 doivent être égales. En cas d'écrêtement, y^{ecr} sera différent de 0, généralement positif.

Selon le procédé de la figure 6, s'il n'y pas d'écrêtement, on se trouve dans une étape 110 de calage du modèle.

10 En effet, lorsqu'il n'y a pas d'écrêtement la sortie du modèle devrait correspondre au niveau constaté ($y_2 = y$). Dans la mesure où l'absence d'écrêtement est le mode de fonctionnement le plus fréquent, cette correspondance permet de recalibrer/vérifier régulièrement le modèle par le biais du module 42 transmettant les paramètres du modèle au module de simulation 41. Une

15 approche d'apprentissage par renforcement semble particulièrement adaptée à cette fin.

Dans le cas, où l'écrêtement est activé, le procédé est dans une

20 étape 120 mesurant la puissance écrêtée.

Ainsi, le même modèle est appliqué pour déterminer le niveau de production théorique avec (y_2) et sans écrêtement (y_1) selon l'état de l'installation 10, la différence entre ces deux résultats représente l'estimation de puissance écrêtée.

25 En variante, on peut également comparer la puissance productible à la puissance réellement injectée dans le réseau, selon le dispositif illustré en figure 5.

Ainsi, la valeur y_2 n'est pas une valeur estimée, mais une mesure

30 de la puissance réellement produite à l'instant t . Ladite mesure étant captée au niveau de l'installation 10 dans les contrôleurs des boucles 21 et 22.

Ensuite, dans une étape 130, la mesure de la puissance peut être intégrée dans le temps dans un module d'intégration 43, afin de déterminer l'énergie échantillonnée sur une plage de temps donnée. L'intégration dans le temps peut nécessiter la synchronisation de l'horloge du dispositif de mesure de l'énergie échantillonnée avec le module adapté d'interface 30.

Dans une étape 150, l'estimateur transfère cette donnée 44 (intégrée sur un pas de temps prédéfini) vers le module adapté d'interface 30 en vue de son utilisation dans le cadre de la facturation, ou dans le cadre de pratiques opérationnelles des gestionnaires de réseaux compétents. Le module 30 peut être un module compteur commun avec le compteur d'énergie injecté de l'installation 10.

La fréquence de la transmission peut être adaptée à l'installation 10. Pour une installation 10 de petite dimension (quelques centaines de Watts), on peut imaginer la transmission d'un index d'énergie échantillonnée à pas horaire. Pour une installation 10 de plus grande dimension, une relève toutes les 10 secondes environ pourrait être plus adaptée.

L'estimateur 40 fonctionne en continu, mais les résultats ne seront d'intérêt qu'en cas d'échantillonnage.

En variante, les données 44, ne sont calculées à l'étape 120, mais peuvent être directement transmises au compteur dans une étape 140.

L'étape de calcul 130 de détermination de l'énergie est alors effectuée au niveau du module adapté d'interface 30.

Un dispositif de transmission de la mesure au module adapté d'interface 30 est basé sur trois composantes :

- une mesure certifiée (ou respectant des standards validés par l'ensemble des parties prenantes) au niveau du régulateur de puissance ;

- une transmission sécurisée au module adapté d'interface 30 ;
et
- un stockage d'index(es) d'énergie écrêtée dans le module adapté d'interface 30 de l'installation 10.

5 La transmission des mesures d'écrêtement requiert l'équipement du régulateur et du module adapté d'interface 30 de l'installation 10 en dispositifs de communication ad-hoc. Ces dispositifs pourraient par exemple être similaires à ceux qui sont prévus dans le cadre des communications avec le port TIC (Télé
10 Information Client) des compteurs dits de nouvelle génération, tel que le compteur communiquant Linky.

Description d'un mode de réalisation appliquée à une unité de production photovoltaïque

15 L'invention est décrite ci-après dans un cas où l'installation de production décentralisée 10 est constituée par une unité de production photovoltaïque.

Une unité de production photovoltaïque est constituée d'un module photovoltaïque et d'un convertisseur de puissance associé.
20

A titre d'exemple, en régime de fonctionnement normal (sans écrêtement), le convertisseur de puissance régule la tension V_{pv} du bus continu raccordé au module photovoltaïque, afin que celui-ci convertisse le rayonnement perçu p en un maximum de puissance électrique P_{pv} .
25

La boucle de contrôle de l'unité de production 10 prend en consignes d'entrée, les mesures de puissance produite P_{pv} et V_{pv} .

En absence d'un signal d'écrêtement z , l'installation 10 est exploitée de sorte à obtenir la puissance électrique maximale en fonction des conditions dans lesquelles elle est exploitée.
30

Dans ce but, l'estimateur 40 effectue les opérations suivantes :

- 1) collecte des valeurs P_{pv} et V_{pv} mesurées à chaque pas de temps où le niveau de production est stable et où la production n'est pas écrêtée ;
- 2) stockage de ces valeurs, dans une mémoire comportant une base de données 45 dans le module de calage 42, en remplacement des mesures les plus anciennes correspondant au même niveau de production P_{pv} ;
- 3) Détermination d'une caractéristique $P_{pv} = g_t(V_{pv})$ décrivant l'ensemble des couples (P_{pv}, V_{pv}) optimaux dans un contexte récent pour chaque niveau de rayonnement. Ladite caractéristique est dérivée de l'ensemble des valeurs stockées, par exemple par régression quadratique de type $P_{pv} = a V_{pv}^2 + b V_{pv} + c$.

En régime normal, la mesure d'état correspondant au couple (P_{pv}, V_{pv}) permettant d'estimer le niveau de rayonnement correspondant et de déterminer *in fine* la tension du bus continu optimale (typiquement la tension $V_{opt}(P_{pv})$ telle que $P_{pv} = a V_{opt}^2 + b V_{opt} + c$) permettant de maximiser l'injection de puissance.

Ainsi, la mesure $V_{opt}(P_{pv})$ constitue l'une des variables de contrôle transmise à l'estimateur 40.

Le signal d'écrêtement z reçu par l'installation 10 correspond à une valeur maximale de production instantanée P_{lim} , qui n'est pas nécessairement connue par l'estimateur.

Lorsque l'installation 10 reçoit un signal d'écrêtement z , elle doit limiter la puissance électrique produite P_{pv} . A cette fin, on tend généralement à augmenter le niveau de tension du bus continu V_{pv} au-delà du niveau optimal.

Pour un état de l'installation (P_{pv}, V_{pv}) donné à un instant t , en consigne d'entrée de l'estimateur 40. Ledit module estime P_{ecr} correspondant à la différence entre la puissance maximale qu'on aurait pu injecter avec l'installation 10 s'il n'y avait pas eu d'écrêtement et la puissance réellement injectée. Pour y parvenir,

l'estimateur 40 se base sur l'écart entre V_{pv} et $V_{opt}(P_{pv})$. Plus cet écart est important, plus la puissance écrêtée est importante.

5 Pour estimer précisément l'énergie écrêtée, le module de simulation 41 utilise un modèle permettant de déterminer le niveau de production de l'installation 10 en fonction de son état.

Ce modèle permettant de déterminer la puissance P_{pvth} qui aurait été théoriquement produite par l'installation 10 sans écrêtement. Elle peut consister en une fonction f , telle que $P_{pvth} = f(P_{pv}, V_{pv}, V_{opt}(P_{pv}))$.

10

La forme de cette fonction peut être déterminée au préalable et laissée inchangée durant la vie de l'appareil.

De préférence, le module d'estimation 40, utilise le module de recalage 42 pour recalibrer dynamiquement le modèle durant la vie de l'installation 10.

15

Dans ce but, on peut considérer que la puissance écrêtée vaut :

- 0 lorsque $V_{pv} = V_{opt}(P_{pv})$;
 - $P_{max} - P_{pv}$ lorsque V_{pv} correspond à la tension maximale vue par l'installation 10 dans des conditions d'écrêtement menant à la même production P_{pv} (NB P_{max} correspond ici à la valeur maximale de P_{pv} mesurée hors période d'écrêtement pendant les périodes de production stable) ;
 - $P_{max} - P_{pv}$ lorsque V_{pv} correspond à la tension minimale vue par l'installation 10 dans des conditions d'écrêtement menant à la même production P_{pv} .
- 20
- 25

Le module d'estimation 40 permet ainsi de déterminer la puissance écrêtée telle que $P_{ecr} = f(P_{pv}, V_{pv}, V_{opt}(P_{pv})) - P_{pv}$.

30 En référence à la figure 6, après cette étape 120 de mesure de la puissance écrêtée, le module d'estimation 40 procède ensuite dans une étape 130 à l'intégration dans le temps de cette mesure

afin de déterminer l'énergie écrêtée sur une plage de temps donnée.

Dans une étape 150, l'estimateur transfère cette donnée (intégrée sur un pas de temps prédéfini) vers le module adapté d'interface 30.

En variante, les données calculées à l'étape 120, peuvent être directement transmises au compteur dans une étape 140.

L'étape de calcul 130 de détermination de l'énergie est alors effectuée au niveau du module adapté d'interface 30.

Bien entendu la présente invention, appliquée dans le cas d'une unité de production photovoltaïque, n'est pas limitée au mode de réalisation particulier qui vient d'être décrit mais s'étend à toute variante d'unité de production photovoltaïque contrôlée selon un schéma différent.

Description d'un mode de réalisation appliquée à une unité de production éolienne

L'invention est décrite ci-après dans un cas où l'installation 10 de production décentralisée est constituée par une unité de production éolienne.

Ladite unité est de préférence constituée d'une turbine à pales orientables et d'un convertisseur de puissance associé.

L'installation 10 peut être ainsi constituée par une génératrice synchrone raccordée par un convertisseur AC/DC/AC (full-converter wind turbine).

A titre d'exemple, l'unité de production éolienne est soumise à deux boucles de contrôle principales:

- le convertisseur de puissance régule la puissance P_{gen} soutirée à la génératrice synchrone en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne Ω_{turb} afin que celle-ci s'adapte dynamiquement aux conditions externes pour approcher la vitesse de rotation optimale

Ω_{turb}^* où le rendement de la turbine est le plus important. Ω_{turb}^* n'est pas nécessairement connu au préalable.

- Le contrôleur d'orientation des pales régule leur angle β_{turb} en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, afin de tendre vers l'orientation des pales β_{turb}^* maximisant le rendement mécanique de la turbine. De nouveau, β_{turb}^* n'est pas nécessairement connu a priori.

Les deux boucles de contrôle s'appuient sur la grandeur mesurée Ω_{turb} (l'approche demeurant tout à fait valable dans l'hypothèse où l'on s'appuierait sur d'autres grandeurs mesurées telles que: l'accélération de la turbine, la vitesse du vent, ou son orientation relative par rapport à la turbine).

Le signal d'écrêtement z reçu par l'installation 10 correspond à une valeur maximale de production instantanée P_{lim} , qui engendre automatiquement une limitation stricte de P_{gen} .

L'approche d'estimation de l'énergie écrêtée consiste à déterminer, en fonction des grandeurs mesurées localement et en fonction du signal d'écrêtement z reçu, quelle aurait été la puissance $P_{\text{gen th}}$ théoriquement produite s'il n'y avait pas eu de requête d'écrêtement.

En absence d'un signal d'écrêtement z , l'installation 10 est exploitée de sorte à extraire un maximum d'énergie de l'éolienne en fonction des conditions dans lesquelles elle est exploitée.

L'estimateur effectue alors les opérations suivantes :

- 1) collecte des valeurs P_{gen} , β_{turb} , Ω_{turb} mesurées à chaque pas de temps où la production n'était pas écrêtée et où le niveau de production était stable ($\tau_{\text{turb}} = 0$);
- 2) stockage de ces valeurs dans une mémoire comportant une base de données 45 dans le module de calage 42, en

remplacement des mesures les plus anciennes correspondant à la même vitesse de rotation de la turbine Ω_{turb} .

3) Détermination d'une fonction $\Omega_{\text{turb}} = g_{\Omega t} (P_{\text{gen}})$ et une fonction $\beta_{\text{turb}} = g_{\beta t} (\Omega_{\text{turb}})$ décrivant l'ensemble des triplets $(P_{\text{gen}}, \beta_{\text{turb}}, \Omega_{\text{turb}})$ optimaux dans un contexte récent pour chaque vitesse de vent perçue en régime permanent (a priori non connue). Les fonctions étant dérivées de l'ensemble des valeurs stockées, par exemple par régression quadratique ou une fonction linéaire par morceaux. Cette opération peut être menée continûment. La taille de la base de données des mesures 45 est adaptée à l'installation 10.

En régime normal, la mesure d'état correspondant à la vitesse de rotation de la turbine (Ω_{turb}) permet d'estimer, grâce à $g_{\beta t}$, l'orientation des pales optimale β_{turb}^* permettant de maximiser l'énergie extraite par l'installation 10 en régime permanent.

Ainsi, la mesure $\beta_{\text{turb}}^*(\Omega_{\text{turb}})$ constitue l'une des variables de contrôle transmise à l'estimateur de puissance écrêtée. Notons par ailleurs qu'en général, $\beta_{\text{turb}}^* = 0$ quelle que soit Ω_{turb} .

Lorsque l'installation 10 reçoit un signal d'écrêtement z , elle doit limiter la puissance électrique produite P_{gen} . A cette fin, les contrôleurs de l'installation 10 tendent généralement à :

i) réduire le niveau de puissance soutirée par l'installation 10 (ce qui peut accélérer très légèrement la rotation de la turbine transitoirement, mais permet une réaction immédiate de l'installation 10 à la consigne d'écrêtement z) aussi longtemps que la vitesse de rotation excède Ω_{turb}^* correspondant aux conditions d'exploitation ;

ii) augmenter singulièrement l'angle β_{turb} au-delà du niveau optimal pour déventer les pales de l'éolienne et ainsi capter moins de puissance P_{eol} .

Pour un état de l'installation donné x à un instant t , il s'agit d'estimer P_{ecr} correspondant à la différence entre la puissance

moyenne qu'on aurait pu extraire avec l'installation 10 s'il n'y avait pas eu d'écrêtement et la puissance réellement produite. Pour y parvenir, on se base sur l'écart entre β_{turb} et $\beta_{\text{turb}}^*(\Omega_{\text{turb}})$. Plus cet écart est important, plus la puissance écrêtée est importante.

5

Pour estimer précisément l'énergie écrêtée, le module de simulation 41 utilise un modèle permettant de déterminer le niveau de production de l'installation 10 en fonction de son état.

10 Ce modèle permettant de déterminer la puissance $P_{\text{gen}th}$ qui aurait été théoriquement produite par l'installation 10 sans écrêtement. Elle peut consister en une fonction f , telle que $P_{\text{gen}th} = f(P_{\text{gen}}, \Omega_{\text{turb}}, \beta_{\text{turb}}$ et $\beta_{\text{turb}}^*(\Omega_{\text{turb}}))$.

15 La forme de cette fonction peut être déterminée au préalable et laissée inchangée durant la vie de l'appareil.

De préférence, le module d'estimation 40, utilise le module de recalage 42 pour recalculer dynamiquement le modèle durant la vie de l'installation 10.

Dans ce but, on peut considérer que la puissance écrêtée vaut :

- 20
- 0 lorsque $\beta_{\text{turb}} = \beta_{\text{turb}}^*(\Omega_{\text{turb}})$;
 - $P_{\text{max}} - P_{\text{gen}}$ lorsque β_{turb} correspond à l'angle maximal vu par l'installation 10 dans des conditions d'écrêtement menant à la même production P_{gen} (NB P_{max} correspond ici à la valeur maximale de P_{gen} mesurée hors période d'écrêtement en régime stabilisé. Elle peut être définie lors du calibrage initial de l'estimateur et remise à jour automatiquement au long de la vie de l'installation 10) ;
 - $P_{\text{max}} - P_{\text{gen}}$ lorsque β_{turb} correspond à l'angle minimal vu par l'installation 10 dans des conditions d'écrêtement menant à la
- 25
- 30 même production P_{gen}

Le module d'estimation 40 permet ainsi de déterminer la puissance écrêtée telle que $P_{\text{ecr}} = f(P_{\text{gen}}, \Omega_{\text{turb}}, \beta_{\text{turb}} \text{ et } \beta_{\text{turb}}^*(\Omega_{\text{turb}})) - P_{\text{gen}}$.

- 5 En référence à la figure 6, après cette étape 120 de mesure de la puissance écrêtée, le module d'estimation 40 procède ensuite dans une étape 130 à l'intégration dans le temps de cette mesure afin de déterminer l'énergie écrêtée sur une plage de temps donnée.
- 10 Dans une étape 150, l'estimateur transfère cette donnée (intégrée sur un pas de temps prédéfini) vers le module adapté d'interface 30.
- En variante, les données calculées à l'étape 120, peuvent être directement transmises au compteur dans une étape 140.
- 15 L'étape de calcul 130 de détermination de l'énergie est alors effectuée au niveau du module adapté d'interface 30.

20 Bien entendu, dans le cas d'une unité de production éolienne, la présente invention n'est pas limitée au mode de réalisation particulier qui vient d'être décrit mais s'étend à toute variante d'unité de production éolienne contrôlée selon un schéma différent.

25 Le procédé et le système selon l'invention peuvent être implémentés sur des dispositifs de contrôle/commande d'installation de production intermittente 10 de façon simplifiée et avec un coût de mise en œuvre très faible.

30 Ainsi, l'invention peut être mise en œuvre sous forme de programme d'asservissement de la production intermittente. On peut s'appuyer sur un dispositif préexistant, permettant l'écrêtement et de le compléter pour prévoir l'exploitation des consignes issues de la boucle 21 lors des situations d'écrêtement,

afin de calculer l'énergie qui aurait pu être produite sans écrêtement, et de mettre cette grandeur à disposition d'un organe de communication 30.

5 Le matériel nécessaire peut se limiter à un automate. Dans la mesure où les informations à traiter sont déjà disponibles au niveau du régulateur de l'installation 10 qui s'appuie également sur un automate. Ainsi, de façon simplifiée, on peut d'utiliser le même matériel, auquel on rajoute un module d'estimation 40 en charge de mesurer l'énergie écrêtée.

10 Un avantage principal du procédé selon l'invention est de permettre de compenser l'énergie écrêtée en s'appuyant sur une estimation fiable de son volume. Ceci évite de surcompenser les producteurs sollicités au bénéfice du doute et permet surtout
15 d'avoir une mesure exacte pour des installations de petite taille, qui pourraient être sollicitées sur des problématiques locales.

Cette compensation permet de solliciter systématiquement les installations localisées aux points critiques, ce qui minimise la quantité d'écrêtement nécessaire pour faire face aux contraintes.

20 L'invention présente également d'autres avantages.

Ainsi, dans les cas où les gestionnaires de réseaux disposent des volumes d'énergie écrêtée site par site, on peut plus facilement développer une stratégie adaptative de renforcement de réseaux. En conséquence, au lieu de renforcer le réseau en préventif pour
25 permettre d'évacuer toute la production quel que soit le niveau de consommation, on peut raccorder directement les nouvelles installations, indemniser les écrêtements, et attendre que les indemnisations atteignent des montants significatifs pour décider des renforcements ciblés. Le bénéfice de l'invention étant que les
30 montants d'indemnisation d'écrêtement impliqués sont ainsi bien inférieurs à ceux qui sont versés actuellement dans le cadre des procédures de raccordement.

L'extension de l'invention vers la production acheminable, le stockage, ou la consommation flexible présente également les mêmes avantages.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'estimation de l'énergie écrêtée par une source de
5 production électrique (10) du type éolien, solaire, hydraulique ou
hydrolien, comprenant les étapes consistant à :
- i) mesurer la puissance écrêtée par cette source (10), sur la base
d'une simulation de la puissance potentielle fondée sur
l'exploitation d'un modèle mettant en œuvre les paramètres
10 locaux et instantanés au niveau du site de la source de production
électrique, lesquels paramètres comprennent :
- a) des consignes de sortie de la boucle de contrôle (21,22) de la
source de production électrique (10) incluant un paramètre
représentatif de la puissance effective instantanée et de la
15 puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement, ainsi
que
- b) des consignes ou mesures caractérisant l'écrêtement, du type
ordre d'écrêtement (z) ou mesure locale qui suscite un
écrêtement, corrigées par
- 20 c) les paramètres d'état (x) de la source de production électrique
concernée (10), et
- ii) transmettre et mettre à disposition l'information obtenue sur
un module adapté d'interface (30).
- 25 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait que le
paramètre représentatif de la puissance effective est une consigne
de sortie de la boucle de contrôle (22) correspondant à la
consigne effective appliquée.
- 30 3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé par le fait que le
paramètre représentatif de la puissance effective est un signal de
sortie de la boucle de contrôle correspondant à la puissance
réelle.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé par le fait qu'il comprend en outre une étape consistant à calculer l'énergie sur la base de la simulation de puissance.
- 5
5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé par le fait que l'énergie est calculée avant transmission au module adapté d'interface (30).
- 10
6. Procédé selon la revendication 4, caractérisé par le fait que la puissance est transmise au module adapté d'interface (30) et l'énergie est calculée au niveau de ce module.
- 15
7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé par le fait que le module adapté d'interface (30) est un module compteur commun avec le compteur d'énergie injectée.
- 20
8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé par le fait qu'il comprend une étape d'étalonnage sur des périodes hors écrêtement.
9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé par le fait qu'il exploite une fonction de la forme
- $$y_i = f(x, u_i, u_2) \text{ avec } i=1,2$$
- 25
- dans laquelle y_i représente la puissance théoriquement productible sans écrêtement, y_2 représente la puissance productible en tenant compte du signal d'écrêtement, et u_1 représente le vecteur contenant des informations correspondant aux réglages issus d'une boucle de régulation en fonctionnement normal sans
- 30
- écrêtement à l'instant t , u_2 représente les mêmes données issues de la boucle de régulation lors d'un contrôle avec écrêtement.

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé par le fait qu'il exploite une fonction de la forme

$$y_i = Ax + B u_i + Cu_2 + D$$

5 dans laquelle x représente l'état de l'installation à l'instant t et A , B , C et D représentent des matrices de calage du modèle appliqué.

11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que dans le cas où la source de production électrique est du type photovoltaïque, ladite source comprenant un module photovoltaïque et d'un convertisseur de puissance associé, le paramètre représentatif de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement est la tension (V_{pv}) du bus continu raccordé au module photovoltaïque ; et

15 les paramètres d'état de la source de production électrique de type photovoltaïque comportent la puissance électrique (P_{pv}).

12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que dans le cas où la source de production électrique est du type éolien, ladite source comprenant une turbine à pales orientables et un convertisseur de puissance associé, le paramètre représentatif de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement est (β_{turb}) correspond à l'angle des pales de la turbine ; et

25 les paramètres d'état de la source de production électrique de type éolien comportent la puissance électrique (P_{gen}) soutirée à la turbine.

13. Système pour la mise en œuvre du procédé conforme à l'une des revendications 1 à 10, caractérisé par le fait qu'il comprend des moyens adaptés pour mesurer la puissance écrêtée par une source de production électrique (10) sur la base d'une simulation de la puissance potentielle fondée sur l'exploitation d'un modèle

mettant en œuvre les paramètres locaux et instantanés au niveau du site de la source de production électrique (10), lesquels paramètres comprennent :

- 5 a) des consignes de sortie de la boucle de contrôle (21,22) de la source de production électrique (10) incluant un paramètre représentatif de la puissance effective instantanée et de la puissance qui serait appliquée en cas de non écrêtement ainsi que
- 10 b) des consignes ou mesures caractérisant l'écrêtement, du type ordre d'écrêtement (z) ou mesure locale qui suscite un écrêtement, corrigées par
- c) les paramètres d'état (x) de la source de production électrique concernée (10), et
- transmettre l'information obtenue sur un module adapté d'interface (30).

15

1/3

FIG. 1

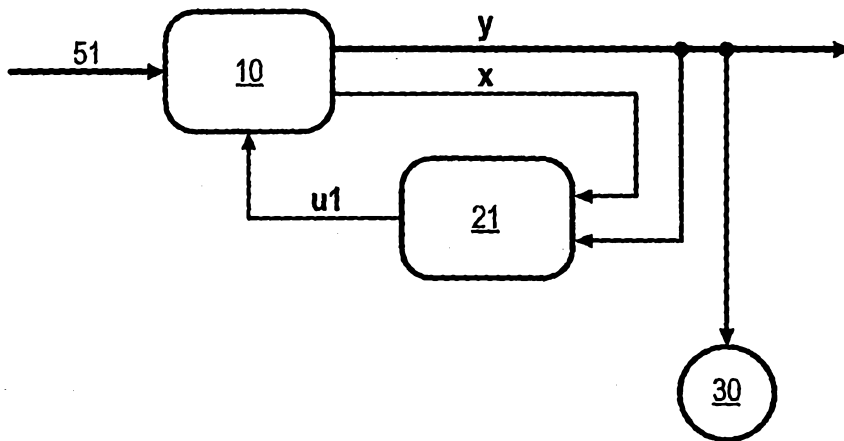
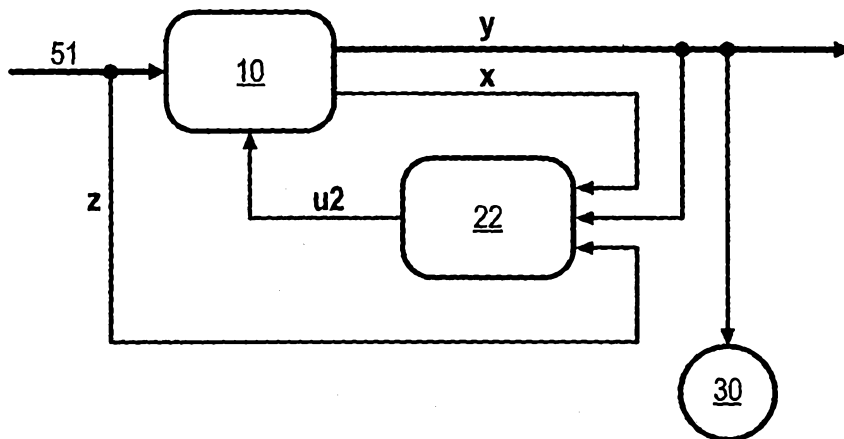


FIG. 2



2/3

FIG. 3

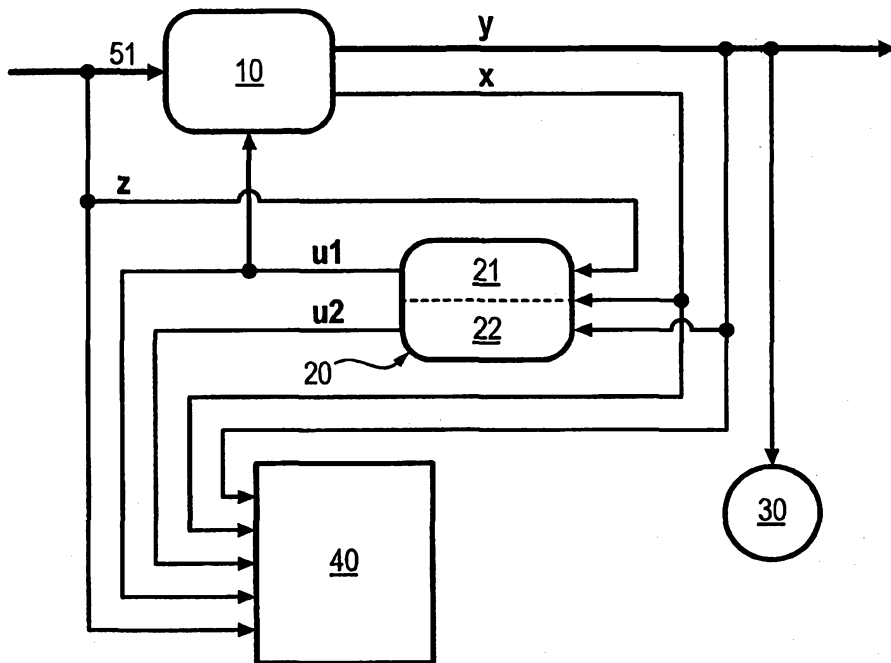
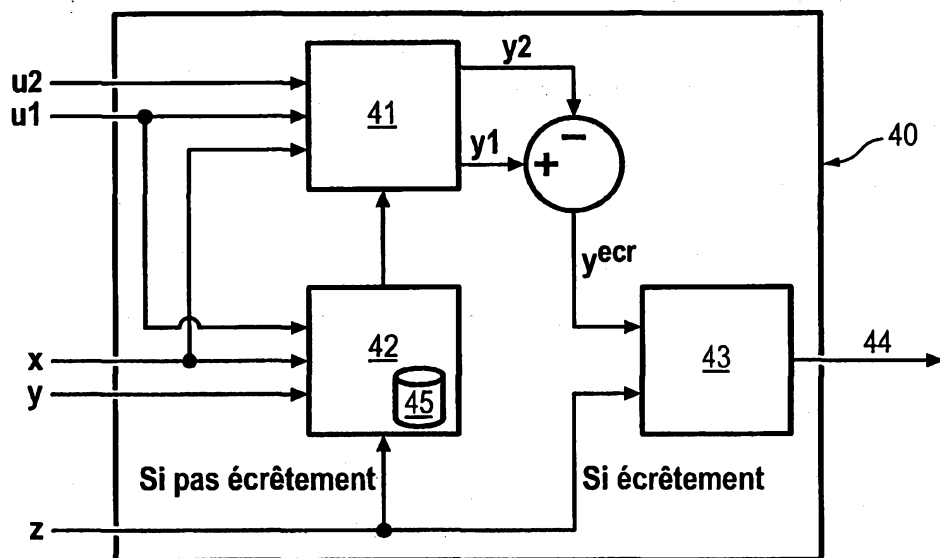


FIG. 4



3/3

FIG. 5

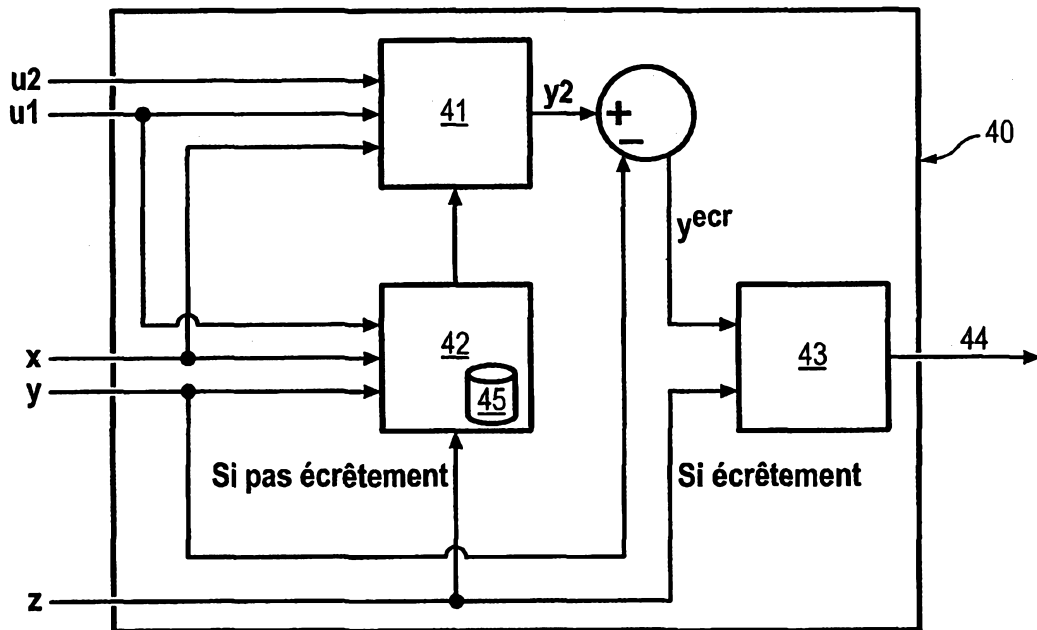
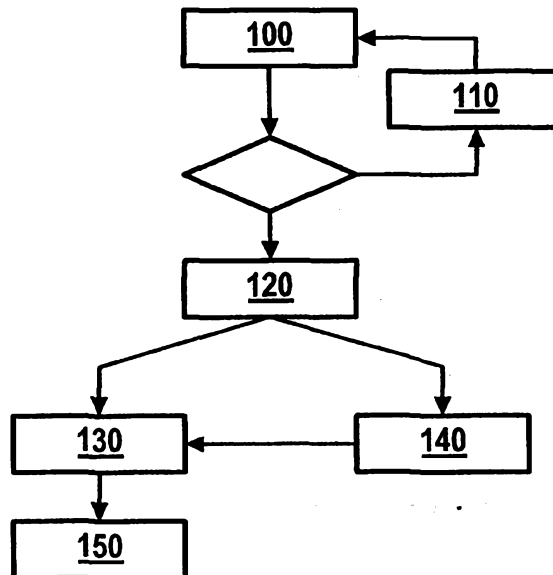


FIG. 6



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-17 et R.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DU PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

- Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.
- Le demandeur a maintenu les revendications.
- Le demandeur a modifié les revendications.
- Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.
- Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.
- Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITÉS DANS LE PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

- Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.
- Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.
- Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.
- Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

US 2011/224926 A1 (MORJARIA MAHESH A [US] ET AL)
15 septembre 2011 (2011-09-15)

US 2014/186177 A1 (BÖHME SEBASTIAN [DE] ET AL)
3 juillet 2014 (2014-07-03)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

NEANT

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT