(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) **N° de publication :** **2 983 613**

(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **11 61087**

(51) Int Cl[8] : ***G 06 Q 50/06*** *(2013.01), H 02 J 3/12*

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 02.12.11.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 07.06.13 Bulletin 13/23.

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

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

(71) **Demandeur(s) :** *SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS Société par actions simplifiée* — FR et *ASSOCIATION POUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT DE METHODES ET PROCESSUS INDUSTRIELS Association loi de 1901* — FR.

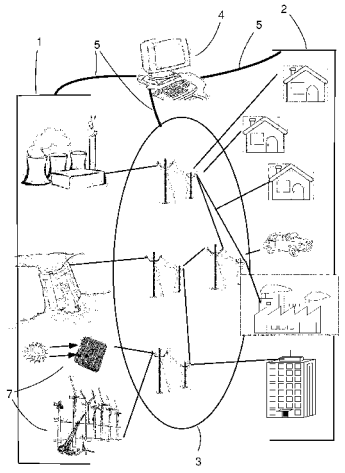
(72) **Inventeur(s) :** MAIZI NADIA, DROUINEAU MATHILDE et MAZAURIC VINCENT.

(73) **Titulaire(s) :** SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS Société par actions simplifiée, ASSOCIATION POUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT DE METHODES ET PROCESSUS INDUSTRIELS Association loi de 1901.

(74) **Mandataire(s) :** NOVAIMO.

(54) PROCEDE D'ESTIMATION DE LA STABILITE D'UN SYSTEME ELECTRIQUE.

(57) Procédé de gestion d'un système électrique comprenant des unités de production d'électricité (1), des unités de consommation d'électricité (2), et un réseau de distribution d'électricité (3) reliant les unités de production d'électricité (1) aux unités de consommation d'électricité (2), caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur les réserves d'énergie magnétique et/ou cinétique qu'il accumule.



FR 2 983 613 - A1

Procédé d'estimation de la stabilité d'un système électrique

La présente invention concerne un procédé de gestion d'un système électrique, un programme informatique et une unité de gestion mettant en œuvre un tel procédé. Elle concerne aussi un système électrique en tant que tel mettant en œuvre un tel procédé de gestion.

Un système électrique comprend des unités de production d'électricité, comme des centrales à charbon, au gaz, des centrales nucléaires, des barrages permettant d'exploiter l'énergie hydraulique, des sources d'énergie renouvelables complémentaires comme des sources solaires ou des éoliennes. Ces unités de production d'électricité peuvent être cumulées dans un même système. Ensuite, un système électrique comprend des unités de consommation d'électricité, qui peuvent être des habitations, des usines, des véhicules, etc. Enfin, un système électrique comprend un réseau de distribution d'électricité, qui relie les unités de production et les unités de consommation d'électricité afin de transporter l'électricité jusqu'à ces unités de consommation.

Une complexité de la gestion d'un système électrique provient du fait qu'il est soumis en permanence à des aléas de production et/ou de consommation, et que l'équilibre entre l'offre et la demande doit pourtant être garanti à chaque instant, ce qui n'est pas toujours vrai dans l'état de la technique.

Pour répondre à cette contrainte, le réseau de distribution électrique est régulé en tension et en fréquence dans l'état de la technique, de sorte que la tension distribuée reste entre plus ou moins 5 ou 10% autour d'une valeur de consigne prédéfinie et la fréquence à plus ou moins 1% d'une valeur de consigne prédéfinie (50 Hz en Europe). Dans la pratique, le réseau de distribution d'électricité est représenté comme un ensemble de nœuds et de

mailles, dont le comportement électrique est modélisé par les équations de Kirchhoff. D'autre part, la fréquence du réseau résulte du couplage électromécanique présent au niveau des alternateurs des unités de production d'électricité. Ces alternateurs étant nombreux, chacun d'entre eux subit l'influence de tous les autres et l'ensemble se comporte comme si le réseau de distribution impose sa fréquence à chaque alternateur et donc la fréquence du réseau. Ce phénomène est couramment appelé « synchronisme ».

Finalement, la gestion pratique d'un réseau de distribution d'électricité repose sur un procédé qui mesure la fréquence au niveau de quelques points du réseau, notamment au niveau de chaque unité de production, et la tension en tout ou partie des nœuds, et la régulation du réseau cherche à maintenir les valeurs de tension et fréquence à leurs valeurs de consigne, sur la base de la résolution des équations de Kirchhoff pour connaître l'ensemble du réseau. Pour optimiser cette approche, des solutions comme celle décrite dans le document EP2330525 proposent des méthodes permettant d'accélérer la résolution de ces équations.

Le document EP2224570 décrit une autre solution qui prévoit de relier au réseau de distribution d'électricité des dispositifs de stockage d'électricité. Ces approches permettent d'atteindre aujourd'hui un résultat suffisant par le fait que la capacité totale de production des unités de production est en général largement supérieure à la consommation totale des unités de consommation. Ainsi, grâce à cette situation favorable, le réseau de distribution reste convenable sans nécessiter d'adaptation ou d'optimisation particulière.

Si les unités de production deviennent moins importantes relativement aux besoins des unités de consommation, une situation de soudaine augmentation de la demande de ces unités de consommation ou une

défaillance accidentelle d'une unité de production entraîne un risque de propagation d'une chute de tension et/ou d'un écroulement de la fréquence sur l'ensemble du réseau de distribution électrique. Une telle situation peut entraîner la coupure de distribution d'électricité dans tout ou partie du système électrique. Il est donc important de garantir la stabilité d'un réseau de distribution d'électricité, pour réduire au maximum les coupures de distribution d'électricité, en faisant face aux éventuels incidents et aux situations particulières défavorables.

D'autre part, il existe aujourd'hui une évolution des systèmes électriques, dont les unités de production d'électricité se diversifient, incluant une part de plus en plus importante de sources d'énergie renouvelable, souvent intermittente et plus difficile à gérer. En parallèle, le besoin des unités de consommation augmente. Dans ce contexte, on ne dispose pas de méthode permettant d'évaluer le niveau de fiabilité des futures architectures du réseau de distribution d'électricité, ni de garantir la pertinence de leur gestion avec les approches existantes.

En résumé, les approches de l'état de la technique ne permettent pas de répondre aux questions de gestion optimale d'un système électrique. Notamment, les approches de calcul sur la base de la modélisation électrique, basée sur la résolution des lois de Kirchhoff, recherchant à déterminer en temps réel l'état du système atteignent les limites suivantes :

- les équations sont complexes à résoudre du fait du nombre très important de nœuds du réseau de distribution électrique ;
- les données de communication qui transitent entre les composants du système électrique sur le réseau, qui se déplacent à la vitesse de la lumière, ne vont pas assez vite pour permettre une réaction suffisamment rapide pour faire face à un incident, durant lequel la propagation d'une défaillance sur le réseau se déplace de même à une vitesse très importante. Pour cela, il est

obligatoire de disposer de moyens dédiés pour gagner du temps en cas de défaillance. La gestion en temps réel est en réalité impossible, du fait des limites de la physique.

Finalement, il existe un besoin d'une solution permettant de gérer au mieux la distribution d'électricité d'un système électrique.

Plus précisément, un objet est de définir une solution permettant d'améliorer la gestion d'un système électrique, notamment sa stabilité.

A cet effet, l'invention repose sur un procédé de gestion d'un système électrique comprenant des unités de production d'électricité, des unités de consommation d'électricité, et un réseau de distribution d'électricité reliant les unités de production d'électricité aux unités de consommation d'électricité, caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur les réserves d'énergie magnétique et/ou cinétique qu'il accumule.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut prendre en compte les deux paramètres de stabilité du système électrique qui représentent respectivement la durée pendant laquelle les réserves d'énergie magnétique et cinétique du système électrique s'épuisent totalement ou partiellement, si toute la production d'électricité du système électrique est stoppée ou déconnectée du système électrique ou si le système électrique subit une fluctuation.

Les deux paramètres de stabilité H_{cin} et H_{mag} du système électrique peuvent être définis de la manière suivante :

$$H_{cin} = \frac{E_{cin}}{S} \quad \text{et} \quad H_{mag} = \frac{F}{S}$$

où

E_{cin} désigne l'énergie cinétique des différents organes constituant le système électrique,

F représente l'énergie magnétique des différents organes constituant le système électrique,

S désigne la puissance apparente nominale des différents organes de génération d'électricité du système électrique,

ou les deux paramètres de stabilité H'_{cin} et H'_{mag} du système électrique peuvent être définis de la manière suivante :

$$H'_{cin} = \frac{E_{cin}}{\Delta S} \quad \text{et} \quad H'_{mag} = \frac{F}{\Delta S}$$

où ΔS représente une variation de puissance apparente du système électrique.

Les deux paramètres de stabilité du système électrique peuvent être définis à partir des caractéristiques des alternateurs des unités de production d'électricité du système électrique connectés au système électrique.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut comprendre une étape de calcul du ou des paramètres de stabilité du système électrique à partir du bilan de puissance du système électrique, puis comprendre une étape d'analyse de deux régimes transitoires distincts, un régime transitoire durant lequel le bilan de puissance considère la variation de l'énergie magnétique du système électrique à énergie cinétique considérée constante, et un régime transitoire durant lequel le bilan de puissance considère la variation de l'énergie cinétique du système électrique à énergie magnétique considérée constante.

Le bilan de puissance du système électrique peut être calculé à partir d'une modélisation thermodynamique du système électrique et se définir par l'équation suivante :

$$P_{meca\text{-}in} = P_{meca\text{-}out} + P_{Joule} + \frac{dF}{dt} + \frac{dE_{cin}}{dt}$$

Où

- E_{cin} désigne l'énergie cinétique emmagasinée dans les différents organes du système électrique ;
- $P_{meca\text{-}in}$ désigne la puissance mécanique fournie au système par l'arbre des turbines des alternateurs ;
- $P_{meca\text{-}out}$ désigne la puissance mécanique produite par les moteurs;
- P_{joule} représente la chaleur soutirée au système électrique ;
- F représente l'énergie magnétique emmagasinée dans les différents organes du système électrique.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut comprendre une étape de mesure de grandeurs de fonctionnement du système électrique par des capteurs, comme des grandeurs électriques du système électrique comme la fréquence et la tension, et l'étape d'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule peut prendre en compte au moins une mesure d'une grandeur de fonctionnement mesurée du système électrique.

L'étape d'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule peut prendre en compte la réserve magnétique et/ou cinétique sur une ou plusieurs sous-partie(s) du système électrique pour en déduire finalement la réserve magnétique et/ou cinétique globale cumulée du système électrique.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut comprendre une étape de comparaison du ou des paramètre(s) de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule avec une

valeur seuil pour déterminer si le système électrique est suffisamment stable.

La valeur seuil peut être calculée de manière théorique, en considérant comme hypothèse qu'un système électrique est fiable si sa réserve d'énergie magnétique et/ou cinétique lui permet une variation minimale de fréquence et/ou de tension, ou d'une ou de plusieurs autres grandeurs électriques, pendant une durée minimale imposée, ou cette valeur seuil peut être déterminée de manière empirique, à partir d'un système électrique considéré comme fiable, pour lequel le ou les paramètres de stabilité sont connus et servent de référence.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut comprendre la mise en œuvre de tout ou partie des actions suivantes en fonction d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule :

- réduction de la consommation globale d'électricité ;
- augmentation de la production globale d'électricité ;
- mise en fonctionnement ou arrêt d'un ou plusieurs dispositifs d'accumulation d'énergie cinétique et/ou magnétique.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut comprendre la définition de l'architecture d'un nouveau système électrique ou de la modification d'un système électrique existant en fonction de l'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumulera.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut déterminer le taux maximal acceptable des unités de production d'électricité renouvelable intermittente, comme à base d'énergie éolienne et/ou solaire, en fonction de l'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumulera.

Le procédé de gestion d'un système électrique peut comprendre une étape de planification de l'évolution d'un système électrique de sorte qu'il possède au moins un paramètre de stabilité basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumulera au-dessus d'un seuil.

L'invention porte aussi sur un programme informatique comprenant un moyen de codes adapté à la réalisation des étapes d'un procédé de gestion d'un système électrique tel que décrit précédemment lorsque le programme informatique est exécuté sur un calculateur.

L'invention porte aussi sur une unité de gestion d'un système électrique, caractérisée en ce qu'elle comprend un calculateur qui met en œuvre un procédé de gestion d'un système électrique tel que décrit précédemment.

Le système électrique comprenant des unités de production d'électricité, des unités de consommation d'électricité, et un réseau de distribution d'électricité reliant les unités de production d'électricité aux unités de consommation d'électricité, peut comprendre une unité de gestion qui met en œuvre un procédé de gestion d'un système électrique tel que décrit précédemment.

Le système électrique peut comprendre des dispositifs de communication pour la transmission vers l'unité de gestion des mesures de grandeurs électriques provenant de capteurs du système électrique et pour la transmission de l'unité de gestion de commandes à des actionneurs du système électrique.

Ces objets, caractéristiques et avantages de la présente invention seront exposés en détail dans la description suivante d'un mode d'exécution particulier fait à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

La figure 1 représente schématiquement un système électrique selon un mode de réalisation de l'invention.

La figure 2 représente le système électrique selon un mode de réalisation de l'invention avec une approche thermodynamique.

La figure 3 représente schématiquement l'évolution dans le temps de grandeurs du système électrique lors d'un scénario d'incident selon le mode de réalisation de l'invention.

La figure 4 représente l'évolution des variations de fréquence et de tension en fonction des critères de stabilité au sein d'un système électrique selon le mode de réalisation de l'invention.

La figure 1 représente schématiquement un système électrique selon un mode d'exécution de l'invention. Ce système électrique comprend des unités de production d'électricité 1, qui peuvent absorber ou fournir une puissance sur le réseau de distribution d'électricité 3 pour alimenter plusieurs unités de consommation d'électricité 2. Les unités de production d'électricité 1 et de consommation d'électricité 2 comprennent des actionneurs qui respectivement produisent et consomment de l'énergie électrique. Les actionneurs de certaines unités de production sont plus particulièrement des alternateurs, et ceux des unités de consommation d'électricité sont par exemple des moteurs.

Ce système électrique comprend un nombre important d'alternateurs, de sorte que la puissance globale échangée par le système électrique est grande devant celle de chaque alternateur. Une augmentation de la demande de puissance par les unités consommatrices induit l'augmentation de l'angle interne de tout ou partie des alternateurs, afin d'atteindre un

nouveau point de fonctionnement stable, en fonction de l'inertie mécanique de ces alternateurs. Ces alternateurs sont de préférence des alternateurs synchrones.

Le système électrique comprend de plus des capteurs, non représentés, permettant de mesurer des grandeurs représentant l'état du système électrique, au niveau des unités de production, de consommation et du réseau de distribution, et des dispositifs de communication 5 entre ces capteurs et au moins une unité de gestion 4. Cette unité de gestion 4 reçoit ainsi des données mesurées par les capteurs et transmet des commandes vers des actionneurs du système électrique. Ce dernier, selon le mode de réalisation, peut ainsi intégrer les composants d'une architecture de réseau électrique intelligent appelée par sa dénomination anglo-saxonne de « smart grid » dans l'état de la technique. L'unité de gestion comprend au moins un calculateur et des éléments matériel (hardware) et logiciel (software) pour mettre en œuvre les étapes du procédé de gestion du système électrique qui va maintenant être détaillé.

Le procédé de gestion d'un système électrique repose sur une modélisation physique particulière du système électrique, qui va d'abord être décrite.

D'abord, nous considérons un alternateur d'une unité de production d'électricité, qui est une machine tournante qui joue un rôle particulier dans le comportement global du système électrique car son énergie cinétique atteint une valeur importante. L'équilibre mécanique d'un alternateur s'écrit selon :

$$P_{méca\text{-}ext} - P_{méca\text{-}int} = \frac{dE_{cin}}{dt}$$

Où

- E_{cin} désigne l'énergie cinétique présente au sein de l'alternateur du fait de sa vitesse de rotation ;

- $P_{méca\text{-}ext}$ désigne la puissance mécanique fournie à l'alternateur, sa puissance d'entraînement ;
- $P_{méca\text{-}int}$ désigne la puissance mécanique effectivement cédée au système électrique par l'alternateur, qui est l'opposée de la puissance du couple résistant pour un alternateur.

Cette énergie cinétique peut s'écrire :

$E_{cin} = \frac{1}{2} J \Omega^2$

Où J désigne le moment d'inertie de l'alternateur, et Ω sa vitesse de rotation mécanique.

En terme électrique, on peut aussi écrire :

$E_{cin} = \frac{1}{2} (J/p^2) \omega^2$

Où ω représente la pulsation électrique et p le nombre de paire de pôles de l'alternateur.

Il est aussi utile d'introduire à ce stade la constante d'inertie H qui est une variable mesurant le rapport entre l'énergie cinétique d'un alternateur et sa puissance apparente nominale S_n :

$H = \frac{1}{2} J \Omega^2 / S_n$

Ce qui s'écrit aussi $H = E_{cin} / S_n$

Plus H est grand, plus l'énergie cinétique stockée dans l'alternateur est grande. Cette constante d'inertie H représente ainsi la robustesse de l'alternateur pour faire face aux fluctuations, puisque plus le stock d'énergie cinétique est important, plus il peut faire face à une fluctuation. Ce phénomène sera détaillé par la suite.

De manière similaire, un alternateur accumule une énergie magnétique, qui représente un stock complémentaire d'énergie, qui lui permet aussi de faire face à une fluctuation de ses conditions de fonctionnement, qui s'ajoute au stock d'énergie cinétique mentionné ci-dessus.

Le système électrique global est modélisé selon une approche thermodynamique représentée par la figure 2, sous la forme d'une machine monotherme représentée par une fonction d'état G appelée enthalpie libre, et dont les variables d'état sont essentiellement :

- la température T du thermostat (le plus souvent atmosphérique),
- la position des actionneurs connectés au système, directement liés au bilan de puissance mécanique subi par le système électrique selon l'équation $P_{méca\text{-}ext} - P_{méca\text{-}int} = dEcin/dt$:
  où Ecin désigne l'énergie cinétique embarquée dans tous le système, $P_{méca\text{-}ext} = \Sigma\ Fi.Vi$ est la puissance mécanique fournie au système, sa puissance d'entrainement, et $P_{méca\text{-}int}$ est la puissance mécanique effectivement cédée au système électrique, qui est l'opposée de la puissance que le système oppose à son entrainement,
- les excitations des machines obtenues préférentiellement par des courants électriques I_k, et des flux magnétiques Φ_k, ou d'autres procédés équivalents (aimants permanents).

Toute l'information macroscopique et comportementale sur le système électrique est contenue dans la fonction d'état G et ses dérivées. En particulier il est avantageux de considérer l'énergie libre F :

$F=G+\Sigma_k\Phi_k I_k$ où $\Phi_k = - \partial G/ \partial I_k$, qui coïncide avec l'énergie magnétique dans le cas d'un système électrique.

L'évolution du système électrique suit alors une tendance à la réversibilité caractérisée par :

$\min(P_{meca\text{-}int} - dG/dt) = \min(P_{joule} + d/dt(\Sigma_k\Phi_k I_k))$

Cette relation montre que l'énergie de couplage magnétique ($\Sigma_k \Phi_k I_k$) est consubstantielle à la génération et à la transmission d'électricité. Dans un mode préférentiel appelé régime linéaire, on montre : $\Sigma_k(\Phi_k I_k) = 2F = -2G$.

Finalement, cette approche thermodynamique du système électrique dans son ensemble, en prenant en compte les phénomènes de chaleur, de puissance électromagnétique et de puissance mécanique du système électrique, permet d'aboutir à l'équation suivante de conservation de la puissance du système électrique, dans un régime transitoire, entre tous les actionneurs du système électrique :

$$P_{meca\text{-}in} = P_{meca\text{-}out} + P_{Joule} + \frac{dF}{dt} + \frac{dE_{cin}}{dt} \qquad (1)$$

Où

- E_{cin} désigne l'énergie cinétique des différents organes constituant le système électrique ;
- $P_{meca\text{-}in}$ désigne la puissance mécanique fournie au système par l'arbre des turbines des alternateurs ;
- $P_{meca\text{-}out}$ désigne la puissance mécanique produite par les moteurs, c'est-à-dire l'ensemble des éléments consommant l'électricité au niveau des unités de consommation d'électricité ;
- P_{joule} représente la chaleur soutirée au système électrique ;
- F représente l'énergie libre telle que définie par la thermodynamique, qui est l'énergie magnétique dans le cas du système électrique.

Le bilan de puissance précédent permet de comprendre le fonctionnement du système électrique lors d'un changement brusque, comme par exemple une modification soudaine de la puissance mécanique fournie $P_{méca\text{-}ext}$, comme lors d'une brusque fluctuation de charge du système électrique. Dans un tel cas, le système électrique s'appuie dans un premier temps sur les variations de l'énergie magnétique F et de l'énergie cinétique E_{cin}, qui

permettent un ajustement rapide des échanges de puissance du système électrique. Ces deux énergies magnétique et cinétique représentent des réserves d'énergie, emmagasinées (embarquées) au sein du système électrique, qui procurent de l'inertie au système électrique.

L'étude du régime transitoire du système électrique montre qu'il peut se décomposer en deux périodes distinctes relatives respectivement aux périodes de variation des réserves d'énergie magnétique et cinétique, dont les constantes de temps de relaxation diffèrent de plusieurs ordres de grandeurs. A titre d'exemple d'ordre de grandeur, la durée de la variation de l'énergie magnétique dure quelques millisecondes alors que la durée de la variation de l'énergie cinétique dure quelques secondes. Ces durées représentent les phénomènes survenant juste après la fluctuation de charge et offrent un temps de réaction possible au système électrique, pendant lequel l'unité de gestion 4 élabore et commande des réactions au niveau des actionneurs du système électrique pour lui permettre de stabiliser de nouveau les échanges de puissance. Ensuite, quand le régime nominal et stationnaire du système électrique est retrouvé, il reconstitue ses réserves d'énergie magnétique et cinétique pour pouvoir faire face à un prochain incident.

Ainsi, suite à une brusque fluctuation du fonctionnement du système électrique, dans un premier temps, le bilan de puissance permet de prendre en compte la variation de réserve magnétique seule, puis dans un second temps la variation de la réserve d'énergie cinétique seule.

Ainsi, dans un premier temps, le bilan de puissance (1) se résume à :

$$P_{meca\text{-}in} = P_{meca\text{-}out} + P_{Joule} + \frac{dF}{dt} \qquad (2)$$

Ensuite, dans un deuxième temps, ce bilan de puissance (1) s'écrit :

$$P_{meca\text{-}in} = P_{meca\text{-}out} + P_{Joule} + \frac{dE_{cin}}{dt} \qquad (3)$$

L'étude de ces deux régimes transitoires distincts permet de déterminer la durée des réserves d'énergie magnétique puis cinétique avant leur épuisement. Ces deux durées sont essentielles dans la gestion du système électrique, car elles lui permettent de posséder un temps d'adaptation en cas de modification de ses conditions de fonctionnement, pour retrouver un nouveau régime stationnaire stable. Ces deux durées représentent ainsi deux critères de stabilité d'un système électrique.

La figure 3 illustre schématiquement le comportement du système électrique. Ce système électrique comprend des premiers actionneurs des unités de production dont la courbe 11 représente l'évolution temporelle de la puissance mécanique fournie au système électrique. La courbe 12 représente l'évolution temporelle de la puissance consommée par les unités de consommation du système électrique. La courbe 13 représente l'évolution des pertes de chaleur (P_{joule}) en fonction du temps. Les courbes 14 et 15 représentent respectivement l'évolution des réserves d'énergie magnétique F et cinétique E_{cin}. A un premier instant t1, la courbe 12 qui était constante change brusquement de pente, ce qui correspond à une fluctuation de charge, une augmentation de la demande en électricité des unités de consommation du système électrique. Le système électrique s'adapte à l'instant t3, en augmentant sa production d'électricité, pour atteindre un nouvel équilibre stationnaire à l'instant t4. Entre les instants t1 et t3, les réserves d'énergie magnétique sont d'abord consommées, jusqu'à l'instant t2, puis les réserves d'énergie cinétique à partir de l'instant t2. Cette consommation de réserves d'énergie offre l'inertie suffisante au système électrique pour s'adapter à la fluctuation.

La partie droite de la figure 3 illustre ce qui se passerait si à un instant t5 survenait une défaillance particulière du réseau, du type fluctuation de charge ohmique, dans laquelle toutes les réserves cinétique et magnétique seraient épuisées sans que la production d'électricité ne parvienne à s'ajuster. Les réserves d'énergie seraient simplement dissipées par effet Joule sur le réseau de distribution d'électricité et l'ensemble du système électrique atteindrait une situation de défaillance, communément appelée par sa dénomination anglo-saxonne de « black out ».

Pour tenir compte des explications précédentes, le procédé de gestion d'un système électrique selon le mode d'exécution de l'invention définit deux paramètres de stabilité dynamique respectivement basés sur les durées liées aux réserves magnétiques et cinétiques explicitées précédemment. Ces paramètres de stabilité représentent la capacité du système électrique à maintenir la génération électrique et la transmission d'électricité, puis les variations de tension et de fréquence du réseau de distribution d'électricité dans des limites souhaitées.

Pour cela, les équations précédentes vont être exploitées pour étudier le comportement dynamique du système électrique pendant un régime transitoire imposé par une fluctuation de charge.

Nous rappelons que pendant la période transitoire électrique, entre les instants t1 et t2, l'équation (2) suivante est vérifiée :

$$\frac{dF(t)}{dt} = Pmeca\text{-}in - Pmeca\text{-}out - Pjoule$$

A partir de cette équation, nous introduisons le paramètre H_{mag}, qui est un temps qui s'exprime en seconde, qui mesure la durée pendant laquelle le

stock d'énergie magnétique s'épuise totalement si toute la production du système électrique est stoppée ou déconnectée du système.

$$H_{mag} = \frac{F}{S}$$

Où S représente la puissance apparente nominale cumulée sur toutes les unités de production d'électricité de l'ensemble du système électrique.

Entre les instants t2 et t3, l'équation (3) est vérifiée :

La fréquence ω du système électrique évolue selon l'équation suivante :

$$\frac{dEcin\,(t)}{dt} = J\omega(t)\ \frac{d\,\omega(t)}{dt} = P_{meca\text{-}ext} - P_{meca\text{-}int}$$

Où P_{meca_ext} et P_{meca_int} représentent respectivement les puissances externes et internes au système électrique.

A partir de cette équation, on introduit le paramètre H_{cin}, explicité précédemment au niveau d'un alternateur, qui est un temps qui s'exprime en seconde, qui mesure la durée pendant laquelle le stock d'énergie cinétique s'épuise totalement si toute la production du système électrique est stoppée ou déconnectée du système.

$$H_{cin} = \frac{Ecin}{S} = \frac{J\ \omega_0^2}{S}$$

En introduisant ce paramètre dans l'équation précédente, on obtient :

$$\frac{d\,\omega(t)}{dt} = \frac{\omega_0^2}{\omega(t)Hcin\ S}\,(P_{meca\text{-}ext} - P_{meca\text{-}int})$$

Cette nouvelle formulation gouverne la variation de fréquence du réseau électrique après une fluctuation donnée : si $P_{meca\text{-}ext}$, Sn , ω_0 , $P_{meca\text{-}int}$ sont fixés, la variation de fréquence dépend du paramètre H_{cin}. En effet, la variation de fréquence après la fluctuation sera d'autant plus faible que ce paramètre H_{cin} sera grand. Ce paramètre représente donc bien la fiabilité du système pour la variation de fréquence.

Suite aux explications précédentes, le procédé de gestion d'un système électrique selon un mode de réalisation comprend une étape d'estimation de la stabilité du système électrique en calculant les deux paramètres de stabilité représentant respectivement les réserves cinétique et magnétique du système électrique. En variante, la prise en compte d'une seule de ces réserves peut représenter une approche simplifiée et utile aussi à l'analyse du système électrique.

Les deux paramètres de stabilité peuvent être estimés en fonction du temps, selon les plages horaires d'une journée, selon la saison.

Ces deux paramètres de stabilité sont, selon ce mode de réalisation, deux durées H_{cin} et H_{mag} telles que définies précédemment. En variante, toute autre valeur représentative de ces deux réserves pourrait être utilisée. Selon une première variante, les deux durées suivantes peuvent être considérées :

$$H'_{cin} = \frac{E_{cin}}{\Delta S} \text{ et } \qquad H'_{mag} = \frac{F}{\Delta S}$$

Où ΔS représente une variation de puissance apparente du système électrique. Cette approche présente l'avantage plus réaliste de pouvoir correspondre avec des scenarii plus courants. Les durées ainsi définies représentent alors des durées pendant lesquelles le réseau reste sensiblement stable après une telle variation de puissance sous l'effet des réserves d'énergie cinétique et magnétique.

Selon une seconde variante, d'autres énergies du système électrique peuvent être considérées comme par exemple son enthalpie libre G ou une énergie de couplage.

Selon d'autres variantes encore, d'autres dimensions liées à ces réserves d'énergie que des durées peuvent être considérées.

De plus, les deux paramètres de stabilité peuvent être calculés selon les différentes approches suivantes :

- mise en œuvre d'un calcul théorique basé sur un modèle physique du système électrique, comme celui explicité par les équations précédentes;
- mesure de ces paramètres lors du fonctionnement réel d'un système électrique ou d'un système électrique d'architecture similaire ; pour cela, le procédé comprend la mesure des caractéristiques de fonctionnement du système électrique à tout instant, et leur communication à l'unité de gestion ;
- mise en œuvre d'une approche combinée des deux approches ci-dessus.

L'approche précédente sert par exemple de support à la définition de l'architecture des futurs systèmes électriques, ainsi qu'à la modification des systèmes électriques existants. Elle permet de planifier l'évolution des systèmes électriques. En effet, elle permet de déterminer si les choix envisagés permettent ou non d'atteindre une stabilité satisfaisante. Notamment, elle permet de déterminer le pourcentage maximal de sources d'énergie renouvelable intermittentes 7 du système électrique, qui ne peuvent en effet dépasser un pourcentage limite du fait de leur non accumulation d'énergie magnétique et cinétique, et/ou elle permet de déterminer la nécessité d'intégrer des composants comme des volants

d'inertie, des batteries, des condensateurs, des bobines supraconductrices, des machines synchrones additionnelles, etc.

Le procédé de gestion d'un système électrique considère une valeur seuil au-dessus de laquelle une valeur de H_{cin} et/ou H_{mag} d'un système électrique est considérée comme fiable. Cette valeur seuil peut être définie de manière théorique, en considérant comme hypothèse qu'un système électrique est fiable si sa réserve d'énergie cinétique et/ou magnétique lui permet une variation minimale de fréquence, ou d'une ou plusieurs autres grandeurs électriques, pendant une durée minimale imposée, par exemple 10 secondes. Au-dessus de cette valeur seuil, les variations de tension et de fréquence du réseau de distribution d'électricité restent dans des limites souhaitées et le système électrique est considéré comme stable. Selon une autre approche, cette valeur seuil est déterminée de manière empirique, à partir d'un système électrique considéré comme fiable, pour lequel les paramètres de stabilité sont calculés ou déterminés empiriquement, et servant de référence.

La figure 4 représente à titre d'exemple la sensibilité de variations de fréquence et de tension du système électrique en fonction des deux paramètres de stabilité H_{cin} et H_{mag} pour une puissance extérieure apportée de 600 MW. Les courbes 21 et 22 représentent les variations de fréquence en fonction du paramètre de stabilité H_{cin} pour deux valeurs différentes du paramètre de stabilité H_{mag}. Les courbes 23 et 24 représentent les variations de tension en fonction du paramètre de stabilité H_{cin} pour deux valeurs différentes du paramètre de stabilité H_{mag}. Ces deux courbes 23 et 24 sont confondues.

L'approche de stabilité présentée ci-dessus sert aussi à la gestion des systèmes électriques existants. Elle permet de comparer des paramètres

représentant respectivement les réserves cinétique et magnétique du système électrique avec des seuils prédéfinis et si ces paramètres sont sous ces seuils, le procédé de gestion comprend la mise en œuvre de tout ou partie des actions suivantes :

- réduction de la consommation globale d'électricité ;
- augmentation de la production globale d'électricité ;
- mise en fonctionnement de dispositifs d'accumulation d'énergie cinétique et/ou magnétique, qui peuvent être certaines unités de production ou des dispositifs annexes spécialisés.

Toutes ces étapes et actions du procédé de gestion d'un système électrique sont entreprises par l'unité de gestion du système électrique, notamment sous le pilotage de son calculateur, et mises en œuvre par au moins une commande transmise à une ou plusieurs entités du système électrique, les unités de production et/ou de consommation.

Revendications :

1. Procédé de gestion d'un système électrique comprenant des unités de production d'électricité (1), des unités de consommation d'électricité (2), et un réseau de distribution d'électricité (3) reliant les unités de production d'électricité (1) aux unités de consommation d'électricité (2), caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur les réserves d'énergie magnétique et/ou cinétique qu'il accumule.

2. Procédé de gestion d'un système électrique selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il prend en compte les deux paramètres de stabilité du système électrique qui représentent respectivement la durée pendant laquelle les réserves d'énergie magnétique et cinétique du système électrique s'épuisent totalement ou partiellement, si toute la production d'électricité du système électrique est stoppée ou déconnectée du système électrique ou si le système électrique subit une fluctuation.

3. Procédé de gestion d'un système électrique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que les deux paramètres de stabilité H_{cin} et H_{mag} du système électrique sont définis de la manière suivante :

$$H_{cin} = \frac{E_{cin}}{S} \quad \text{et} \quad H_{mag} = \frac{F}{S}$$

où

E_{cin} désigne l'énergie cinétique des différents organes constituant le système électrique,

F représente l'énergie magnétique des différents organes constituant le système électrique,

S désigne la puissance apparente nominale des différents organes de génération d'électricité du système électrique,

ou en ce que les deux paramètres de stabilité H'_{cin} et H'_{mag} du système électrique sont définis de la manière suivante :

$$H'_{cin} = \frac{E_{cin}}{\Delta S} \quad \text{et} \quad H'_{mag} = \frac{F}{\Delta S}$$

où ΔS représente une variation de puissance apparente du système électrique.

4. Procédé de gestion d'un système électrique selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que les deux paramètres de stabilité du système électrique sont définis à partir des caractéristiques des alternateurs des unités de production d'électricité du système électrique connectés au système électrique.

5. Procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de calcul du ou des paramètres de stabilité du système électrique à partir du bilan de puissance du système électrique, puis en ce qu'il comprend une étape d'analyse de deux régimes transitoires distincts, un régime transitoire durant lequel le bilan de puissance considère la variation de l'énergie magnétique du système électrique à énergie cinétique considérée constante, et un régime transitoire durant lequel le bilan de puissance considère la variation de l'énergie cinétique du système électrique à énergie magnétique considérée constante.

6. Procédé de gestion d'un système électrique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le bilan de puissance du système électrique est calculé à partir d'une modélisation thermodynamique du système électrique et se définit par l'équation suivante :

$$P_{meca\text{-}in} = P_{meca\text{-}out} + P_{Joule} + \frac{dF}{dt} + \frac{dE_{cin}}{dt}$$

Où

- E_{cin} désigne l'énergie cinétique emmagasinée dans les différents organes du système électrique ;
- $P_{meca\text{-}in}$ désigne la puissance mécanique fournie au système par l'arbre des turbines des alternateurs ;
- $P_{meca\text{-}out}$ désigne la puissance mécanique produite par les moteurs;
- P_{joule} représente la chaleur soutirée au système électrique ;
- F représente l'énergie magnétique emmagasinée dans les différents organes du système électrique.

7. Procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de mesure de grandeurs de fonctionnement du système électrique par des capteurs, comme des grandeurs électriques du système électrique comme la fréquence et la tension, et en ce que l'étape d'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule prend en compte au moins une mesure d'une grandeur de fonctionnement mesurée du système électrique et/ou en ce que l'étape d'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule prend en compte au moins une estimation de la réserve magnétique et/ou cinétique sur une ou plusieurs sous-partie(s) du système électrique pour en déduire finalement la réserve magnétique et/ou cinétique globale cumulée du système électrique.

8. Procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de comparaison du ou des paramètre(s) de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule avec une valeur seuil pour déterminer si le système électrique est suffisamment stable.

9. Procédé de gestion d'un système électrique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la valeur seuil est calculée de manière théorique, en considérant comme hypothèse qu'un système électrique est fiable si sa réserve d'énergie magnétique et/ou cinétique lui permet une variation minimale de fréquence et/ou de tension, ou d'une ou de plusieurs autres grandeurs électriques, pendant une durée minimale imposée, ou en ce que cette valeur seuil est déterminée de manière empirique, à partir d'un système électrique considéré comme fiable, pour lequel le ou les paramètres de stabilité sont connus et servent de référence.

10. Procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend la mise en œuvre de tout ou partie des actions suivantes en fonction d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumule :

- réduction de la consommation globale d'électricité ;
- augmentation de la production globale d'électricité ;
- mise en fonctionnement ou arrêt d'un ou plusieurs dispositifs d'accumulation d'énergie cinétique et/ou magnétique.

11. Procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend la définition de l'architecture d'un nouveau système électrique ou de la modification d'un système électrique existant en fonction de l'estimation d'au moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumulera.

12. Procédé de gestion d'un système électrique selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il détermine le taux maximal acceptable des unités de production d'électricité renouvelable intermittente (7), comme à base d'énergie éolienne et/ou solaire, en fonction de l'estimation d'au

moins un paramètre de stabilité du système électrique basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumulera.

13. Procédé de gestion d'un système électrique selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comprend une étape de planification de l'évolution d'un système électrique de sorte qu'il possède au moins un paramètre de stabilité basé sur la réserve magnétique et/ou cinétique qu'il accumulera au-dessus d'un seuil.

14. Programme informatique comprenant un moyen de codes adapté à la réalisation des étapes d'un procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications précédentes lorsque le programme informatique est exécuté sur un calculateur.

15. Unité de gestion (4) d'un système électrique, caractérisée en ce qu'elle comprend un calculateur qui met en œuvre un procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications 1 à 13.

16. Système électrique comprenant des unités de production d'électricité (1), des unités de consommation d'électricité (2), et un réseau de distribution d'électricité (3) reliant les unités de production d'électricité (1) aux unités de consommation d'électricité (2), caractérisé en ce qu'il comprend une unité de gestion (4) qui met en œuvre un procédé de gestion d'un système électrique selon l'une des revendications 1 à 13.

17. Système électrique selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comprend des dispositifs de communication (5) pour la transmission vers l'unité de gestion (4) des mesures de grandeurs électriques provenant de capteurs du système électrique et pour la transmission de l'unité de gestion (4) de commandes à des actionneurs du système électrique.

FIG.1

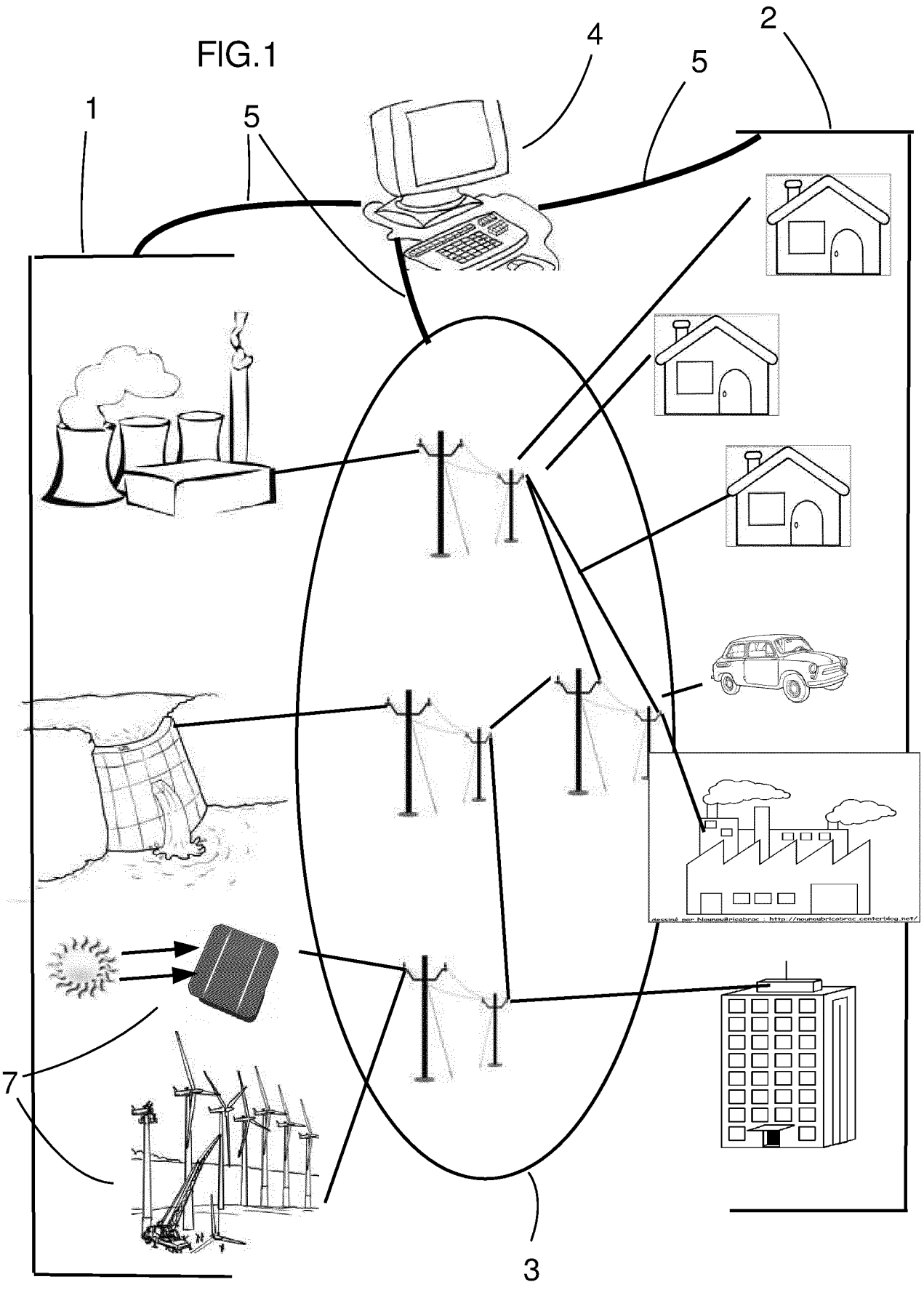


FIG.2

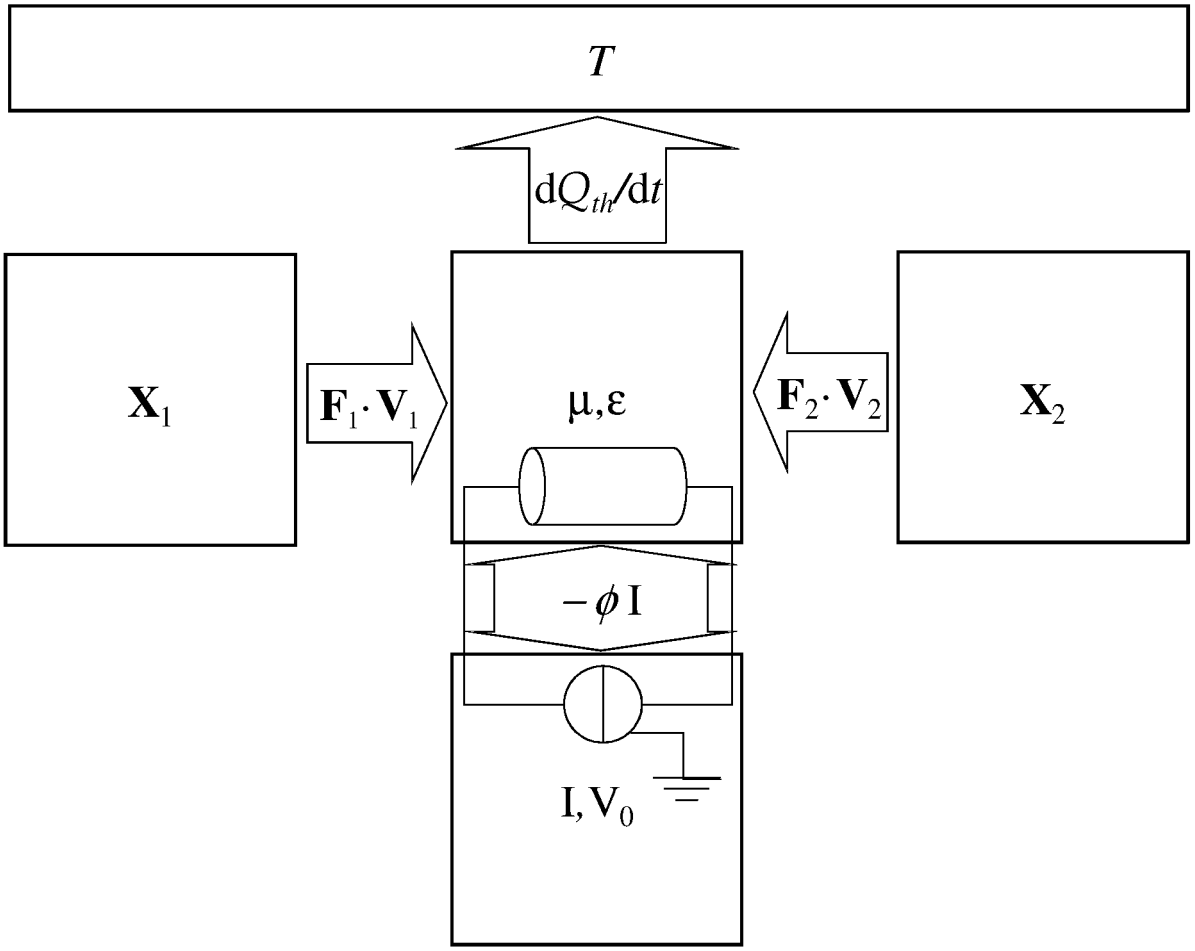


FIG.3

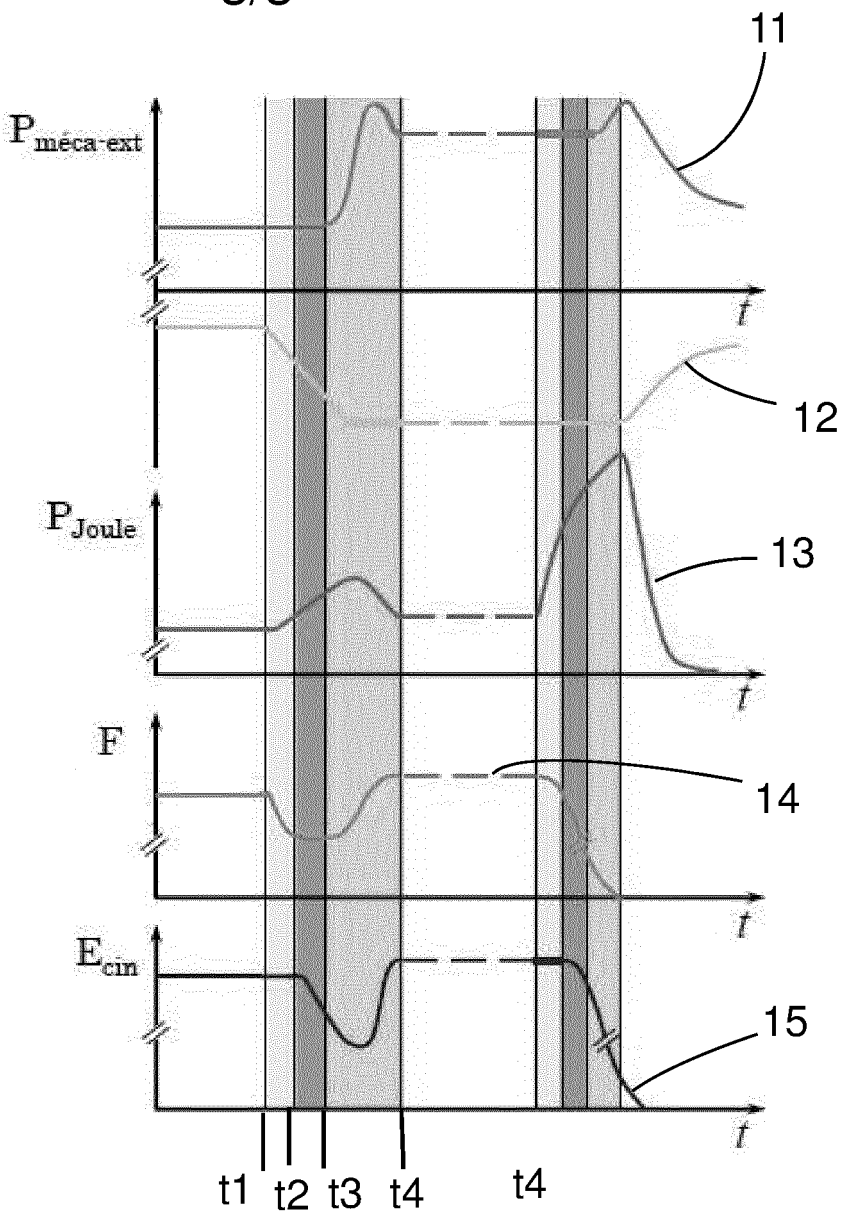
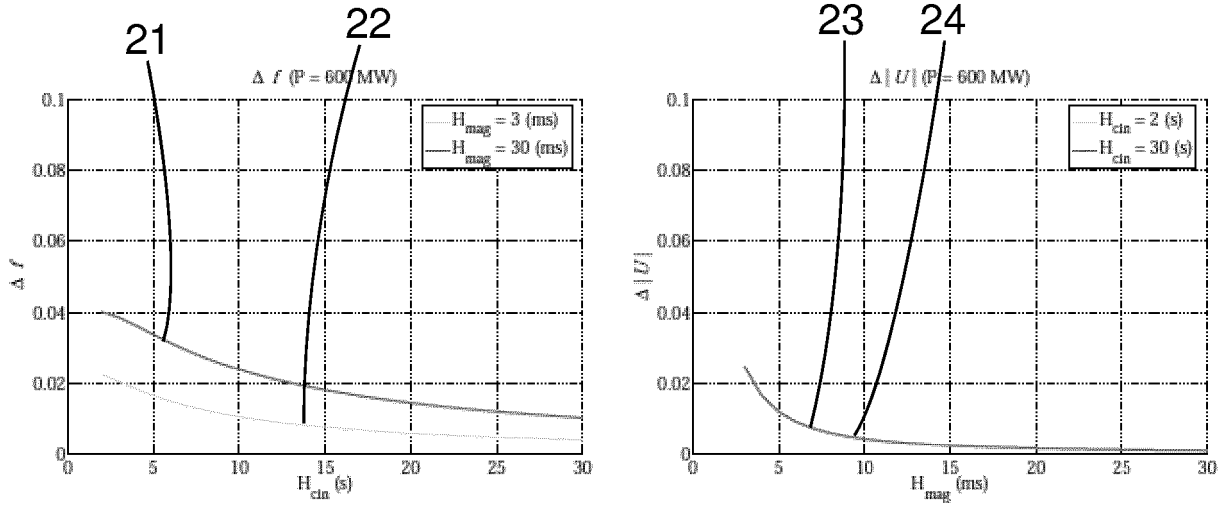

11
$P_{méca-ext}$
t
12
P_{Joule}
13
t
F
14
t
E_{cin}
15
t
t1
t2
t3
t4
t4

FIG.4


21
22
Δ f (P = 600 MW)
H_{mag} = 3 (ms)
H_{mag} = 30 (ms)
Δ f
H_{cin} (s)
23
24
Δ | U | (P = 600 MW)
H_{cin} = 2 (s)
H_{cin} = 30 (s)
Δ | U |
H_{mag} (ms)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement national

FA 759677
FR 1161087

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		
X	EPO: "Mitteilung des Europäischen Patentamts vom 1. Oktober 2007 über Geschäftsmethoden = Notice from the European Patent Office dated 1 October 2007 concerning business methods = Communiqué de l'Office européen des brevets,en date du 1er octobre 2007, concernant les méthodes dans le domaine des activités", JOURNAL OFFICIEL DE L'OFFICE EUROPEEN DES BREVETS.OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN PATENT OFFICE.AMTSBLATTT DES EUROPAEISCHEN PATENTAMTS, OEB, MUNCHEN, DE, vol. 30, no. 11, 1 novembre 2007 (2007-11-01), pages 592-593, XP007905525, ISSN: 0170-9291	1-17	G06Q50/06 H02J3/12
L	* La description et des dessins ayant été dûment considérés, l'objet revendiqué concerne des processus correspondant à des objets et des activités de nature non technique. Il est indiqué à la demanderesse que, selon la pratique établie de l'OEB, aucune recherche n'est à effectuer pour ces aspects de l'invention telle que revendiquée. Les seuls aspects techniques identifiables de l'invention telle que revendiquée concernent l'utilisation de techniques informatiques conventionnelles (Echange et transfert de données, paramètres entre les éléments du système électrique y compris la plateforme de gestion, correlation et génération de données) afin de traiter des données de nature non-technique avec un objectif de gestion ou d'optimisation de ressources électriques. Les techniques informatiques employées sont considérées être universellement connues car largement répandues et accessibles à tous		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G06Q

1

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
12 juillet 2012	Thiam, Mansour

CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons

& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement national

FA 759677
FR 1161087

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		
	à la date de dépôt / priorité de la demande ci-présente. La notoriété d'un tel art antérieur ne peut être raisonnablement contestée. Aucune preuve écrite n'est donc considérée nécessaire * -----		

DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
12 juillet 2012	Thiam, Mansour

CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons
.....
& : membre de la même famille, document correspondant

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)