

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 23.12.21.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 30.06.23 Bulletin 23/26.

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

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

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

72 Inventeur(s) : DENEUVILLE Boris, VELAY Maxime
et AURAN Geoffrey.

73 Titulaire(s) : ELECTRICITE DE FRANCE Société ano-
nyme.

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

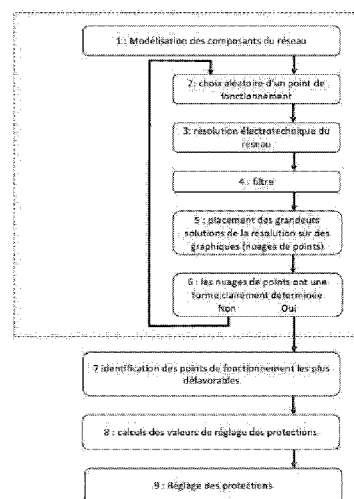
54 Procédé de protection d'un réseau électrique par déclenchement d'actions sur des protections physiques
que comporte le réseau.

57 L'invention concerne un procédé de protection d'un
réseau électrique, dans lequel on met en œuvre :

Un suivi d'au moins une grandeur électrique sur le ré-
seau, Un déclenchement d'actions sur des protections phy-
siques que comporte le réseau, en fonction de ce suivi,
et dans lequel on met en œuvre préalablement les
étapes suivantes :

- Détermination d'une modélisation du réseau élec-
trique,
- Détermination de valeurs pour certains paramètres
physiques du réseau ainsi modélisé, et de plages de valeurs
pour d'autres paramètres physiques dudit réseau modélisé,
- Calcul, en fonction de la modélisation et pour plusieurs
valeurs d'au moins un paramètre physique que le calcula-
teur fait varier dans une plage de valeurs ainsi déterminée,
de valeurs pour au moins une grandeur électrique,
- Détermination de situations de défaut ou de situations
défavorables sur le réseau en fonction des valeurs ainsi ob-
tenues,
- Réglage des déclenchements d'actions sur les protec-
tions physiques du réseau électrique en fonction des situa-
tions ainsi déterminées.

Figure pour l'abrégé : Figure 2



Description

Titre de l'invention : Procédé de protection d'un réseau électrique par déclenchement d'actions sur des protections physiques que comporte le réseau

Domaine technique général et art antérieur

- [0001] La présente invention concerne la protection d'un réseau électrique.
- [0002] Elle trouve avantageusement, mais non limitativement, application pour la protection de réseau à tension alternative triphasée.
- [0003] Les réseaux électriques à tension alternative (dite AC) triphasée, publics ou privés, sont composés d'un ou plusieurs réseaux de tensions différentes reliés entre eux par des transformateurs qui permettent de monter et baisser les niveaux de tension. Des plus élevées aux moins élevées ces tensions sont nommées :
- [0004] - Très Haute Tension : THT (ex : 400 kV)
- [0005] - Haute Tension B : HTB (ex : 63 kV)
- [0006] - Haute Tension A : HTA (ex : 20 kV)
- [0007] - Basse tension : BT (ex : 230 V et 400 V)
- [0008] De façon générale, les réseaux électriques comportent classiquement des protections physiques (comme des disjoncteurs magnétothermiques ou fusibles de tableau électrique basse tension), qui permettent de détecter un défaut (comme un court-circuit) en mesurant des grandeurs électriques (comme le courant) et réalisent une action (par exemple l'ouverture d'un disjoncteur) pour isoler le défaut (ex : mettre le circuit en court-circuit hors tension).
- [0009] Le réglage des protections sur le réseau pose aujourd'hui une difficulté.
- [0010] Jusqu'à récemment, la détermination des cas de fonctionnement les plus défavorables pris en compte pour déterminer le réglage des seuils de déclenchement des protections physiques se faisait par calculs électrotechniques et « à dire d'expert ». Notamment, pour les réseaux HTA sur lesquels sont raccordées des centrales de production HTA et posant notamment des problématiques dites d'aveuglement des relais de protection, on choisissait « à dire d'expert » les cas où la centrale produit le maximum, ou le minimum, selon la protection considérée et la position de la centrale par rapport à cette protection. Les personnes en charge des régler les protections savent qu'il ne s'agit pas forcément exactement du point de fonctionnement le plus défavorable mais l'erreur associée, faible, était négligée et prise en compte dans les marges de sécurité des réglages.
- [0011] Les progrès récents de l'électronique de puissance, et la multiplication des centrales raccordées au niveaux de tension HTA et BT et les nouvelles architectures de réseaux

comme les microgrids ou microréseaux désormais utilisées du fait de la transition énergétique, ne permettent plus des déterminations par calculs. En outre, la précision requise ne permet plus de se fier uniquement aux connaissances des personnes en charge.

- [0012] Notamment, de nombreuses centrales ont des générateurs interfacés par des onduleurs. Or ces derniers ont des comportements non linéaires qui dépendent des automatismes de contrôle commande programmé par les constructeurs. Ceci empêche d'utiliser les méthodes classiques de calculs électrotechniques classiquement connus.
- [0013] Également, du fait de la transition énergétique, de nombreuses centrales sont raccordées en HTA et BT. Un calcul électrotechnique de réseau en court-circuit en HTA et BT oblige, pour chaque protection, à savoir caractériser précisément le point de fonctionnement de toutes les centrales HTA et BT.
- [0014] En outre, pour différentes raisons, les courants de court-circuit sont plus faibles qu'auparavant. En particulier, de plus en plus de centrales sont interfacées par électronique de puissance (par des onduleurs) qui délivrent moins de courant de court-circuit que des générateurs tournants. Par ailleurs, des fonctionnements en microréseau (déconnecté du réseau public) sont possibles. Dès lors, si tous les générateurs sont interfacés par onduleur, les courants de court-circuit sont beaucoup plus faibles que lorsque le réseau est connecté au réseau public. Une plus grande précision dans les calculs est par conséquent requise pour régler les protections.
- [0015] Pour toutes ces raisons, la détermination des seuils de fonctionnement et des cas les plus défavorables est difficilement envisageable par calcul. Cela nécessiterait de connaître les automatismes de contrôle commande de toutes les centrales raccordées au réseau ou d'avoir reçu des modèles de la part des constructeurs des matériels, ce qui n'est généralement pas le cas.
- [0016] Cela impliquerait en outre, pour chaque cas, des temps de modélisation et de calcul particulièrement important.

Présentation générale de l'invention

- [0017] Un but général de l'invention est de proposer une solution de réglage des protections physiques d'un réseau qui ne présentent pas ces inconvénients.
- [0018] A cet effet, selon un aspect, l'invention propose un procédé de protection d'un réseau électrique, dans lequel on met en œuvre :
- [0019] – Un suivi d'au moins une grandeur électrique sur le réseau,
- Un déclenchement d'actions sur des protections physiques que comporte le réseau, en fonction de ce suivi.
- [0020] Dans ce procédé, on met en œuvre préalablement les étapes suivantes :
- [0021] - Détermination d'une modélisation du réseau électrique,
- [0022] - Détermination de valeurs pour certains paramètres physiques du réseau ainsi

modélisé, et de plages de valeurs pour d'autres paramètres physiques dudit réseau modélisé,

- [0023] - Calcul, en fonction de la modélisation et pour plusieurs valeurs d'au moins un paramètre physique que le calculateur fait varier dans une plage de valeurs ainsi déterminée, de valeurs pour au moins une grandeur électrique,
- [0024] - Détermination de situations de défaut ou de situations défavorables sur le réseau en fonction des valeurs ainsi obtenues,
- [0025] - Réglage des déclenchements d'actions sur les protections physiques du réseau électrique en fonction des situations ainsi déterminées.
- [0026] Un tel procédé est avantageusement complété par les différentes caractéristiques suivantes prises seules ou en combinaison :
- [0027] • La détermination de situations de défaut ou de situations défavorables, le calculateur met en œuvre un filtrage sur les valeurs calculées pour au moins une grandeur électrique ;
- Le calculateur modélise un générateur comme une source de type « grid forming » et calcule des valeurs pour au moins une grandeur électrique, pour une pluralité de valeurs de paramètre(s) physique(s) que le calculateur fait varier pour ladite source ;
- Le calculateur modélise un générateur comme une source de type « grid following » et calcule des valeurs pour au moins une grandeur électrique, pour une pluralité de valeurs de paramètre(s) physique(s) que le calculateur fait varier pour ladite source ;
- Le calculateur modélise un générateur de type « grid forming » par une source de tension directe et une source de tension inverse respectivement dans un réseau électrique direct et un réseau électrique inverse ;
- Le calculateur calcule des valeurs d'intensité de courant du générateur circulant dans les trois conducteurs de phases du réseau (au sens des « phases A, B ou C » pour un système triphasé) pour plusieurs valeurs de l'amplitude de tension et de phase (au sens « angle ») de la source de tension directe et pour plusieurs valeurs de l'amplitude tension et de phase de la source de tension inverse ;
- Le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve que les résultats correspondant aux calculs pour lesquels :
 - l'amplitude de tension directe est supérieur à un premier seuil fonction de la tension nominale, ledit seuil étant supérieur à 90% de ladite tension nominale, et préférentiellement égal à 95% de celle-ci ou supérieur,
 - l'amplitude de tension inverse est inférieure à un deuxième seuil

- fonction de la tension nominale, ledit deuxième seuil étant inférieur à 10% de la tension nominale, et préférentiellement égal à 5% de celle-ci ou inférieur,
- les intensités de courant des trois conducteurs de phase sont inférieures à un seuil d'intensité de courant maximal.
 - Le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve que les résultats correspondant aux calculs pour lesquels :
 - l'amplitude de tension directe est inférieure à un troisième seuil fonction de la tension nominale, ledit troisième seuil étant inférieur à 110% de la tension nominale et préférentiellement égal à 105% de celle-ci ou inférieur.
 - Le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve pas les résultats correspondant aux calculs pour lesquels :
 - l'amplitude d'intensité de courant d'au moins l'une des phases est supérieure à un seuil voisin de l'intensité de courant maximal, ledit seuil étant supérieur à 110% et préférentiellement égal à 105% ou supérieur,
 - l'amplitude d'intensité de courant de toutes les phases est inférieure à un seuil voisin de l'intensité de courant maximal, ledit seuil étant supérieur à 90% et préférentiellement égal à 95% ou supérieur.
 - Le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve pas les cas pour lesquels :
 - l'amplitude du courant de toutes les phases est inférieure à un seuil voisin de l'intensité de courant maximal, ledit seuil étant supérieur à 90% et préférentiellement égal à 95% ou supérieur, et la tension au point de raccordement est inférieure à un seuil voisin de la tension nominale du réseau, ledit seuil étant inférieur à 95% et préférentiellement égal à 90% ou inférieur.
 - Le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve pas les cas pour lesquels :
 - la source « grid following » injecte un courant non nul et la tension au point de raccordement dudit générateur est inférieure à un seuil, ledit seuil étant voisin de 90% de la tension nominale du réseau électrique,
 - et/ou la source « grid following » injecte un courant non nul et la tension au point de raccordement dudit générateur est supérieure à un seuil, ledit seuil étant voisin de 105% de la tension nominale du réseau électrique,

- et/ou la source « grid following » soutire une puissance active au réseau,
- et/ou la source « grid following » injecte ou soutire une puissance réactive supérieure aux valeurs limites dudit générateur.

[0028] L'invention concerne en outre un programme comprenant des instructions de code adaptées pour la mise en œuvre d'étapes d'un procédé du type précité, lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

Brève description des dessins

[0029] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui suit, laquelle est purement illustrative et non limitative, et doit être lue en regard des figures annexées sur lesquelles :

- [0030] – la [Fig.1] est une représentation schématique illustrant le positionnement d'une cellule de disjoncteur HTA au niveau d'un poste source entre au moins un transformateur HTB/HTA connecté à au moins une ligne HTB, et des lignes HTA ;
- la [Fig.2] détaille différentes étapes d'un procédé selon un mode de mise en œuvre possible de l'invention illustrant le positionnement d'une cellule de disjoncteur HTA au niveau d'un poste source entre au moins une ligne HTB et des lignes HTA ;
- la [Fig.3a] illustre schématiquement un générateur « grid following » raccordé sur un réseau qui comporte un court-circuit biphasé ;
- la [Fig.3b] illustre schématiquement le réseau direct correspondant au schéma de la [Fig.3a] ;
- la [Fig.3c] illustre schématiquement le réseau inverse correspondant au schéma de la [Fig.3a] ;
- la [Fig.4] illustre schématiquement un générateur « grid forming » raccordé sur un réseau qui comporte un court-circuit biphasé ;
- la [Fig.5a] illustre schématiquement le réseau direct correspondant au schéma de la [Fig.4];
- la [Fig.5b] illustre schématiquement l'évolution d'amplitude de tension du réseau direct de la [Fig.5a] ;
- la [Fig.5c] illustre schématiquement l'évolution de la phase de tension du réseau direct de la [Fig.5a] ;
- la [Fig.6a] illustre schématiquement le réseau inverse correspondant au schéma de la [Fig.4];
- la [Fig.6b] illustre schématiquement l'évolution d'amplitude de tension du réseau inverse de la [Fig.6a] ;

- la [Fig.6c] illustre schématiquement l'évolution de la phase de tension du réseau inverse de la [Fig.6a] ;
- [0031] [Fig.7a_1]
- [0032] [Fig.7a_2]
- [0033] – les figure 7a_1 et 7a_2 sont des graphes sur lesquels on a porté les distributions de courants minimum et maximum des phases A et B, et de la phase C, vues par une protection à maximum de courant durant un défaut biphasé AB, en fonction de puissance totale de centrales raccordées sur le départ en défaut.
- la [Fig.7b] est un graphe sur lequel on a porté les distributions de courants de défaut vers la terre en fonction du courant maximal que peut délivrer un onduleur « grid-forming ».
- la [Fig.7c] est un graphe sur lequel on a porté les distributions de courants vues par une protection à maximum de courant en fonction du courant maximal que peut délivrer un onduleur « grid-forming ».
- la [Fig.7d] est un graphe sur lequel on a porté les amplitudes des tensions directes et inverses au point de raccordement d'un onduleur « grid-forming » qui a atteint son maximum de courant.
- [0034] **Description d'un ou plusieurs modes de mise en œuvre et de réalisation**
- [0035] Généralités sur les protections physiques des réseaux électriques
- [0036] La protection d'un réseau électrique est assurée par des protections physiques réparties sur le réseau.
- [0037] De telles protections physiques peuvent être de différents types, par exemple des disjoncteurs magnétothermiques ou des fusibles de tableau électrique basse tension.
- [0038] Dans l'exemple illustré sur la [Fig.1], (où un fil représente une ligne triphasée composée de 3 « conducteurs » ou « phases »), une cellule de disjoncteur CD est prévue sur un réseau HTA, au niveau d'un poste source S à transformateur assurant la jonction entre ledit réseau HTA et les lignes de tension d'un réseau HTB.
- [0039] Un relais de protection effectue un suivi de l'intensité du courant traversant ladite cellule et ouvre la cellule de disjoncteur si l'amplitude du courant ainsi mesuré dépasse un seuil donné.
- [0040] Le relais de protection envoie alors un ordre de déclenchement au disjoncteur pour qu'il mette toute la ligne hors tension.
- [0041] Ainsi, en cas de court-circuit (schématisé par un éclair) sur le réseau HTA, une surintensité (courant de court-circuit) parcourt la cellule disjoncteur HTA et est détectée par le relais de protection, qui déclenche alors le disjoncteur.
- [0042] De nombreuses fonctions de protection sont envisageables, typiquement :
- [0043] - Protection à maximum de courant : la protection déclenche si l'amplitude du

courant dépasse un seuil (ex : 300 Ampère) ;

[0044] - Protection à minimum de tension : la protection déclenche si l'amplitude de la tension descend sous un seuil (ex : 18 000 Volt).

[0045] Dans un mode de mise en œuvre du procédé proposé, on détermine les situations de défaut ou les situations défavorables sur le réseau de la façon qui va être décrite ci-après.

[0046] Cette détermination est faite sur des moyens de calcul déportés (ordinateur à distance) et programmés à cet effet.

[0047] Le résultat obtenu est ensuite utilisé pour régler les protections physiques : réglage des courbes de déclenchement des disjoncteurs magnétothermiques, choix des types de fusibles, seuil d'une protection en courant, en tension, temporisation d'une protection.

[0048] Le réglage peut se faire par transmission d'ordre à distance, via le réseau, ou se faire directement sur site, par un opérateur recevant les données de réglage et de calibration déterminées.

[0049] Modélisation du réseau électrique et traitement de simulation

[0050] Dans une première étape (étape 1, [Fig.2]) on détermine une modélisation des composants du réseau.

[0051] Dans cette modélisation, les générateurs sont modélisés selon 3 types de modèles, tandis que le reste du réseau est modélisé par des impédances.

[0052] Les modèles utilisés pour les générateurs conduisent à décrire certaines parties du réseau par des paramètres de valeur fixe, tandis que d'autres parties du réseau sont décrites par des paramètres susceptibles d'évoluer dans des plages de valeur de fonctionnement données.

[0053] Le traitement met quant à lui en œuvre des simulations en balayant la ou les plages de valeurs des paramètres, par exemple en choisissant aléatoirement les valeurs de paramètres aléatoire (« tir » aléatoire) (étape 2 – choix aléatoire d'un point de fonctionnement).

[0054] Les modèles de générateurs sont les suivants.

[0055] • Modèle 1 : Source de tension avec impédance de court-circuit.

[0056] Ce modèle est utilisé dans le cas où les centrales de production sont basées sur des machines tournantes que sont les alternateurs synchrones et asynchrones.

[0057] Le réseau se modélise alors comme comportant des impédances et des sources de tension du type précité.

[0058] La modélisation se fait alors classiquement en décomposant le système en un système direct et en un système inverse.

[0059] Dans le système direct, la modélisation se fait par des sources de tension avec une impédance dites « de court-circuit direct ». Les paramètres que sont l'amplitude et la phase de la force électromotrice du générateur caractérisent son point de fonc-

tionnement avant le court-circuit.

[0060] Dans les systèmes inverses, le réseau est modélisé par des impédances de court-circuit inverses.

[0061] Pour une telle décomposition, on pourra avantageusement se référer à la norme IEC 60909.

[0062] Comme on l'aura compris, un tel modèle caractérise un point de fonctionnement donné du générateur, c'est-à-dire les puissances active P et réactive Q qu'il délivrait avant le défaut.

[0063] Les paramètres du réseau sont à valeurs fixes.

[0064] • Modèle 2 : générateur « grid following ».

[0065] Le modèle 2 est utilisé dans le cas de générateurs qui ne sont pas en mesure de contrôler l'amplitude de la tension à leur point de raccordement, mais contrôlent les flux de puissance qu'ils délivrent au réseau, c'est-à-dire les puissances active P et réactive Q .

[0066] C'est typiquement le cas d'une centrale solaire composée de panneaux photovoltaïques raccordés au réseau par des onduleurs.

[0067] Le générateur est alors modélisé comme une source de courant dans le réseau direct et le réseau inverse.

[0068] Dans l'exemple illustré sur la [Fig.3a], on considère un générateur raccordé sur un réseau qui comporte un court-circuit biphasé AB (contact entre les phases A et B).

[0069] Les réseaux direct et inverse correspondants sont illustrés sur les figures 3b et 3c.

[0070] L'amplitude I_1 (resp I_2) et la phase θ_1 (resp θ_2) de i_1 (resp i_2) caractérisent un point de fonctionnement du générateur, c'est-à-dire les puissances P et Q qu'il délivrait avant apparition du défaut.

[0071] En faisant varier aléatoirement I_1 , I_2 , θ_1 et θ_2 , dans les plages de valeurs envisageables, on prend en compte tous les points de fonctionnement du générateur.

[0072] Si le générateur ne peut délivrer que des courants directs, comme dans le cas de nombreux onduleurs photovoltaïque, et si l'utilisateur dispose de cette information, on imposera $I_2 = 0$.

[0073] • Modèle 3 : générateur « grid forming ».

[0074] Ce modèle est utilisé dans le cas de générateurs qui sont en mesure de contrôler l'amplitude de la tension AC à leur point de raccordement.

[0075] C'est typiquement le cas d'un onduleur de batterie ou d'un alternateur synchrone.

[0076] Dans ce modèle, le générateur et le reste du réseau sont également décomposés dans les réseaux directs et inverses. Les paramètres sont susceptibles d'évoluer sur des plages de valeurs.

[0077] La [Fig.3a] schématise un réseau sur lequel le générateur est de type « grid forming » et est raccordé sur un réseau qui comporte un court-circuit biphasé AB (contact entre

les phases A et B).

[0078] Les figures 5a et 6a sont les schémas directs et inverses de ce réseau.

[0079] Le défaut en réseau représente une charge globale qui mène le générateur en surcharge :

[0080] - d'une part il ne peut pas maintenir la tension directe à une amplitude V_n à son point de raccordement (car ses courant directs sont trop faibles au regard des impédances directes du réseau) (figures 5b, 5c) ;

[0081] - d'autre part il ne peut pas ramener à zéro la tension inverse à son point de raccordement (car ses courant inverses sont trop faibles au regard des impédances inverses du réseau et de la tension inverse au défaut qu'il doit compenser) (figures 6b, 6c).

[0082] • Exemple de traitement et de simulation

[0083] Un exemple de traitement et de simulation est le suivant dans le cas du modèle 3.

[0084] Le générateur avec une source de tension $V1_{Gen} e^{j\theta1_{Gen}}$ direct et inverse $V2_{Gen} e^{j\theta2_{Gen}}$, tels que représentés sur les figures 5a et 6a.

[0085] Pour prendre en compte l'infinité de solutions, l'invention modélise :

[0086] - le générateur par des sources de tension dans les réseaux direct et inverse

[0087] - fait varier aléatoirement $V1$, $\theta1$, $V2$, $\theta2$

[0088] - ne conserve, dans une étape de filtre, que les cas possibles, c'est-à-dire :

[0089] ° soit le générateur est capable d'alimenter la charge, alors au point de raccordement

[0090] * la tension directe est proche de la tension nominale de réseau

[0091] * la tension inverse est quasi nulle

[0092] * les courants des phases A, B et C sont inférieurs à I_{max}

[0093] ° soit le générateur est en surcharge, alors au point de raccordement

[0094] * la tension directe est inférieure à tension nominale de réseau

[0095] * la tension inverse est nulle ou non nulle

[0096] * les courants des phases A, B et C sont inférieurs ou égaux à I_{max} .

[0097] Ainsi le traitement de résolution électrotechnique du réseau (étape 3) prend en compte tous les automatismes de contrôle commande possibles, et de fait propose une modélisation générique et universelle.

[0098] En outre, les modélisations étant simples, le temps nécessaire pour modéliser un réseau et réaliser des milliers de calculs est moindre que pour une seule simulation détaillée classique.

[0099] Filtrage – Exemple de détermination de situations de défaut ou de situations défavorables sur le réseau en fonction des valeurs ainsi obtenues

[0100] Un filtrage est ensuite mis en œuvre pour ne garder que les valeurs des plages de paramètres cohérentes avec le fonctionnement attendu (étape 4 – filtre – [Fig.2]).

Grid Following

- [0101] Différents filtres sont mis en œuvre dans le cas d'un réseau modélisé selon le modèle 2 avec un générateur « grid following ».
- [0102] Notamment, le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve pas les cas pour lesquels :
- [0103] – la source « grid following » injecte un courant non nul et la tension au point de raccordement dudit générateur est inférieure à un seuil, ledit seuil étant voisin de 90% de la tension nominale du réseau électrique,
 - et/ou la source « grid following » injecte un courant non nul et la tension au point de raccordement dudit générateur est supérieure à un seuil, ledit seuil étant voisin de 105% de la tension nominale du réseau électrique,
 - et/ou la source « grid following » soutire une puissance active au réseau,
 - et/ou la source « grid following » injecte ou soutire une puissance réactive supérieure aux valeurs limites dudit générateur.

Grid Forming

- [0104] Différents filtres sont mis en œuvre dans le cas d'un réseau modélisé selon le modèle 3 « grid forming »
- [0105] Dans cette hypothèse, pour que le calcul soit conservé, il faut que l'une des deux conditions suivantes soit validée :
- [0106] ° Condition 1.
- [0107] * L'amplitude de la tension directe $V1_{Gen}$ est comprise entre 95% et 105% de la tension nominale V_n ,
- [0108] * L'amplitude de la tension inverse $V2_{Gen}$ est inférieure à 5% de la tension nominale V_n ,
- [0109] * L'amplitude d'intensité de courant des 3 phases A, B ou C est inférieure à I_{max} .
- [0110] Cela signifie que le réseau en défaut est assimilable à une charge électrique de puissance inférieure à la puissance que peut délivrer le générateur. Il est en mesure de contrôler la tension et la maintenir proche de V_n .
- [0111] - Condition 2
- [0112] Le courant des phases A, B ou C dont l'amplitude est la plus grande est comprise entre 95% et 105% de I_{max} , les autres ont une amplitude inférieure à 105%. Cela signifie que le générateur a atteint son courant maximal et n'est pas en mesure de maintenir la tension à une amplitude proche de V_n .
- [0113] Un 3e filtre est activable.
- [0114] Ce dernier caractérise la capacité du générateur à délivrer une tension triphasée équilibrée, c'est-à-dire pour laquelle $V1_{Gen}$ est le plus grand, et $V2_{Gen}$ le plus petit. Il requiert une connaissance précise du générateur et en particulier les paramètres X et Y

(en %) utilisés ci-dessous doivent être communiqués par le constructeur.

- [0115] Une fois les filtrages réalisés, on dispose d'un ensemble de solutions, chacune ayant une valeur pour les amplitudes V1Gen et V2Gen. L'invention ne conserve que les X% de V1gen les plus grand puis les Y% de V2Gen les plus petits.

Convertisseur source de tension

- [0116] Par ailleurs, un autre filtre est également envisageable pour les convertisseurs.
- [0117] Lors de la création du composant, un courant maximal est défini $I_{out-max}$ et correspond au courant maximal que peut délivrer l'onduleur source de tension sur court-circuit AC. Si le courant sur l'une des trois phases est supérieur au courant maximal $I_{out-max}$, le tirage sera éliminé.
- [0118] Si le courant maximal n'est pas atteint, deux cas sont retenus :
- [0119] – La tension directe au point de raccordement est proche de sa valeur nominale (supérieure à une limite basse correspondant à un paramètre $V_{min} = 0,9$ pu par défaut). Dans ce cas-là, l'onduleur source de tension alimente le réseau normalement (peut-être qu'il n'y a aucun court-circuit dans le réseau, ou celui-ci est suffisamment éloigné).
- La tension directe au point de raccordement est inférieure à $V_{min-pu-vsi}$ et le courant est supérieur à une limite basse de courant (« $I_{out-min}$ », défini par l'utilisateur). Il s'agit d'une situation se traduisant par une saturation en courant de l'onduleur source de tension, le paramètre $I_{out-min}$ permet de ne conserver qu'un nuage de points réduit proche du courant de saturation.
- [0120] Les cas pour lesquels la tension est faible et le courant est faible ne sont pas retenus.
- [0121] Chacune de ces trois valeurs est modifiable dans le module plot graphique où l'utilisateur pourra faire varier les plages de variation.
- [0122] Traitement post filtrage - Caractérisation des situations les plus défavorables et réglage
- [0123] Le traitement délivre aux personnes chargées de régler les protections des graphiques présentant des grandeurs caractéristiques de la protection comme la tension, le courant, ou encore le temps de fusion d'un fusible, en fonction d'une autre grandeur prédéfinie par l'utilisateur. Il s'agit de nuages de points, chaque point correspondant à un calcul (un point de fonctionnement / un constructeur).
- [0124] Les points sont tracés sur le graphique (étape 5 de le [Fig.2] – placement des grandeurs solutions de la résolution sur des graphiques (nuages de points) et arrête automatiquement le processus lorsque toutes les solutions forment un nuage de points délimité.
- [0125] Tant que ce n'est pas le cas, le traitement reprend d'autres calculs avec de nouvelles valeurs aléatoires.
- [0126] Un exemple de graphique obtenu à l'issu d'un traitement complet est illustré sur la

figure 7a_1, qui présente, lors d'un défaut biphasé entre les phases A et B, les courants parcourant une protection de départ HTA ($\text{Min}(I_A, I_B)$, $\text{Max}(I_A, I_B)$, I_C) et met en évidence le phénomène d'aveuglement du relais. La figure 7a_2 représente un agrandissement de la zone encadrée dans la figure 7a_1, à proximité de la puissance en abscisse proche de zéro.

- [0127] En l'occurrence, l'amplitude du courant de défaut sur au moins une des phases en défaut dépasse 500 A, pour être certain que le relais ne soit pas aveuglé, soit il faut régler la protection à maximum de courant à 500 A, soit la régler à 550 A et s'assurer que les protections de découplages de toutes les centrales déconnectent ces centrales.
- [0128] Un autre exemple est illustré sur la [Fig.7b], qui présente l'amplitude d'un courant de défaut vers la terre en fonctions des courants maximum délivrés par un onduleur.
- [0129] En l'occurrence, le courant maximal possible est de 160 A si l'onduleur utilisé peut délivrer un courant maximum égal 2.4 fois son courant nominal. Cette information est utile au calcul de la temporisation maximale des protections contre ce type de défaut et pour limiter les tensions de contacts faisant suite aux montées en potentiel des masses à proximité du défaut.
- [0130] Un autre exemple est illustré sur la [Fig.7c], qui présente l'amplitude d'un courant de défaut phase neutre en fonctions des courants maximum délivrés par un onduleur.
- [0131] En l'occurrence, si l'onduleur utilisé pour alimenter le circuit considéré peut délivrer un courant maximum égal 2.4 fois son courant nominal, le courant de défaut sera supérieur à 1400 A (zone entourée). Un fusible qui, à 1400 A, fond en une durée inférieure à la durée maximale de surcharge de l'onduleur « grid-forming », peut protéger le circuit considéré.
- [0132] Un autre exemple est illustré sur la [Fig.7d], qui présente, lors d'un défaut biphasé, l'amplitude des tensions directes et inverses possibles au point de raccordement d'un onduleur « grid forming » qui atteint son courant maximum, ainsi que les points de fonctionnement privilégiés si l'onduleur est fabriqué pour d'abord maximiser la tension directe puis minimiser la tension inverse (zone entourée).
- [0133] En l'occurrence, pour être certain qu'une protection à minimum de tension directe ne déclenche pas, son réglage peut être augmenté jusqu'à $0.7 V_n$.
- [0134] Les points de fonctionnement les plus défavorables sont ainsi identifiés (étape 7). Les valeurs de réglages des protections physiques sont calculées (étape 8) et les réglages ainsi déterminés sont transmis (étape 9).

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de protection d'un réseau électrique, dans lequel on met en œuvre :
- Un suivi d'au moins une grandeur électrique sur le réseau,
 - Un déclenchement d'actions sur des protections physiques que comporte le réseau, en fonction de ce suivi,
- et dans lequel on met en œuvre préalablement les étapes suivantes :
- Détermination d'une modélisation du réseau électrique,
 - Détermination de valeurs pour certains paramètres physiques du réseau ainsi modélisé, et de plages de valeurs pour d'autres paramètres physiques dudit réseau modélisé,
 - Calcul, en fonction de la modélisation et pour plusieurs valeurs d'au moins un paramètre physique que le calculateur fait varier dans une plage de valeurs ainsi déterminée, de valeurs pour au moins une grandeur électrique,
 - Détermination de situations de défaut ou de situations défavorables sur le réseau en fonction des valeurs ainsi obtenues,
 - Réglage des déclenchements d'actions sur les protections physiques du réseau électrique en fonction des situations ainsi déterminées.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, dans lequel pour la détermination de situations de défaut ou de situations défavorables, le calculateur met en œuvre un filtrage sur les valeurs calculées pour au moins une grandeur électrique.
- [Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel le calculateur modélise un générateur comme une source de type « grid forming » et calcule des valeurs pour au moins une grandeur électrique, pour une pluralité de valeurs de paramètre(s) physique(s) que le calculateur fait varier pour ladite source.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel le calculateur modélise un générateur comme une source de type « grid following » et calcule des valeurs pour au moins une grandeur électrique, pour une pluralité de valeurs de paramètre(s) physique(s) que le calculateur fait varier pour ladite source.
- [Revendication 5] Procédé selon la revendication 3, dans lequel le calculateur modélise un générateur de type « grid forming » par une source de tension directe et

une source de tension inverse respectivement dans un réseau électrique direct et un réseau électrique inverse.

[Revendication 6]

Procédé selon la revendication 3, dans lequel le calculateur calcule des valeurs d'intensité de courant du générateur circulant dans les trois conducteurs de phase du réseau pour plusieurs valeurs de l'amplitude de tension et de phase de la source de tension directe et pour plusieurs valeurs de l'amplitude de tension et de phase de la source de tension inverse.

[Revendication 7]

Procédé selon la revendication 6, dans lequel le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve que les résultats des calculs pour lesquels :

- l'amplitude de tension directe est supérieure à un premier seuil fonction de la tension nominale, ledit seuil étant supérieur à 90% de ladite tension nominale, et préférentiellement égal à 95% de celle-ci ou supérieur,
- l'amplitude de tension inverse est inférieure à un deuxième seuil fonction de la tension nominale, ledit deuxième seuil étant inférieur à 10% de la tension nominale, et préférentiellement égal à 5% de celle-ci ou inférieur,
- les intensités de courant dans les trois conducteurs de phase sont inférieures à un seuil d'intensité de courant maximal.

[Revendication 8]

Procédé selon la revendication 7, dans lequel le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve que les résultats des calculs pour lesquels :

- l'amplitude de tension directe est inférieure à un troisième seuil fonction de la tension nominale, ledit troisième seuil étant inférieur à 110% de la tension nominale et préférentiellement égal à 105% de celle-ci ou inférieur.

[Revendication 9]

Procédé selon l'une des revendications 6 à 8, dans lequel le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve pas résultats des calculs pour lesquels :

- l'amplitude d'intensité de courant d'au moins l'une des phases est supérieure à un seuil voisin de l'intensité de courant maximal, ledit seuil étant supérieur à 110% et préféren-

tiellement égal à 105% ou supérieur,

- l'amplitude d'intensité de courant de toutes les phases est inférieure à un seuil voisin de l'intensité de courant maximal, ledit seuil étant supérieur à 90% et préférentiellement égal à 95% ou supérieur.

[Revendication 10] Procédé selon les revendications 6 à 9, dans lequel le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve pas les cas pour lesquels :

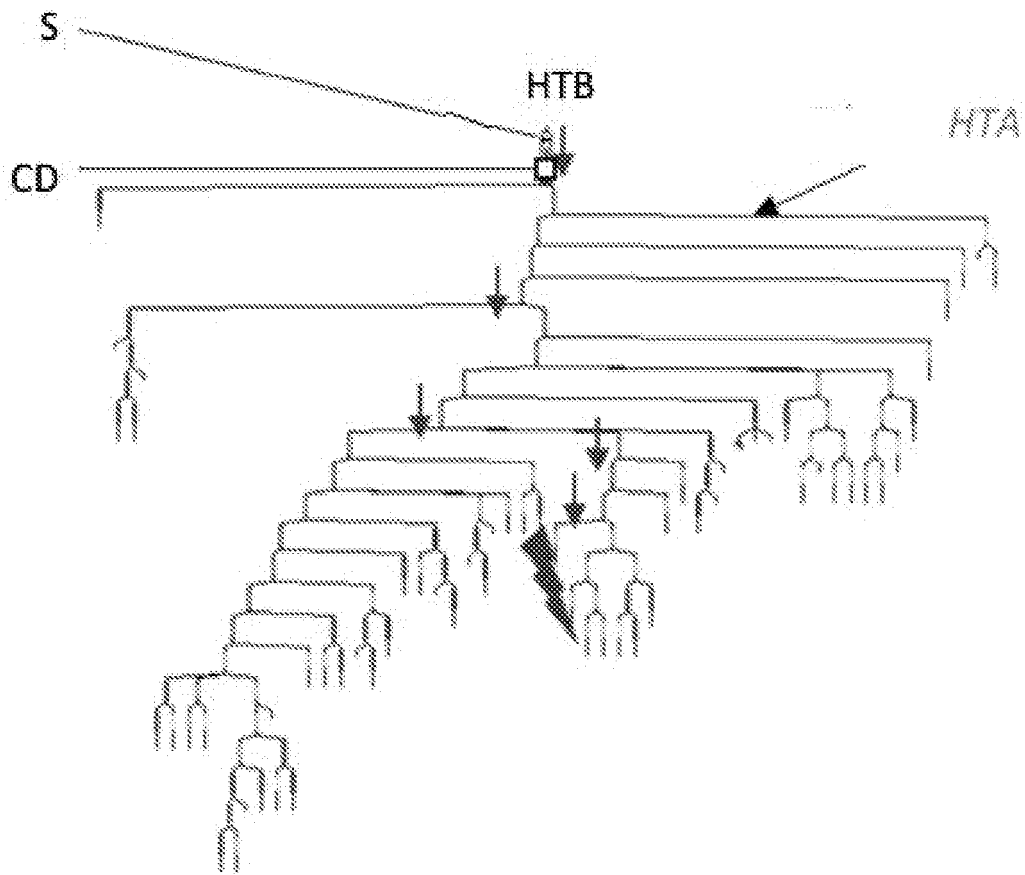
- l'amplitude du courant de toutes les phases est inférieure à un seuil voisin de l'intensité de courant maximal, ledit seuil étant supérieur à 90% et préférentiellement égal à 95% ou supérieur, et la tension au point de raccordement est inférieure à un seuil voisin de la tension nominal du réseau, ledit seuil étant inférieur à 95% et préférentiellement égal à 90% ou inférieur.

[Revendication 11] Procédé selon la revendication 4, dans lequel le calculateur met en œuvre un filtrage qui ne conserve pas les cas pour lesquels :

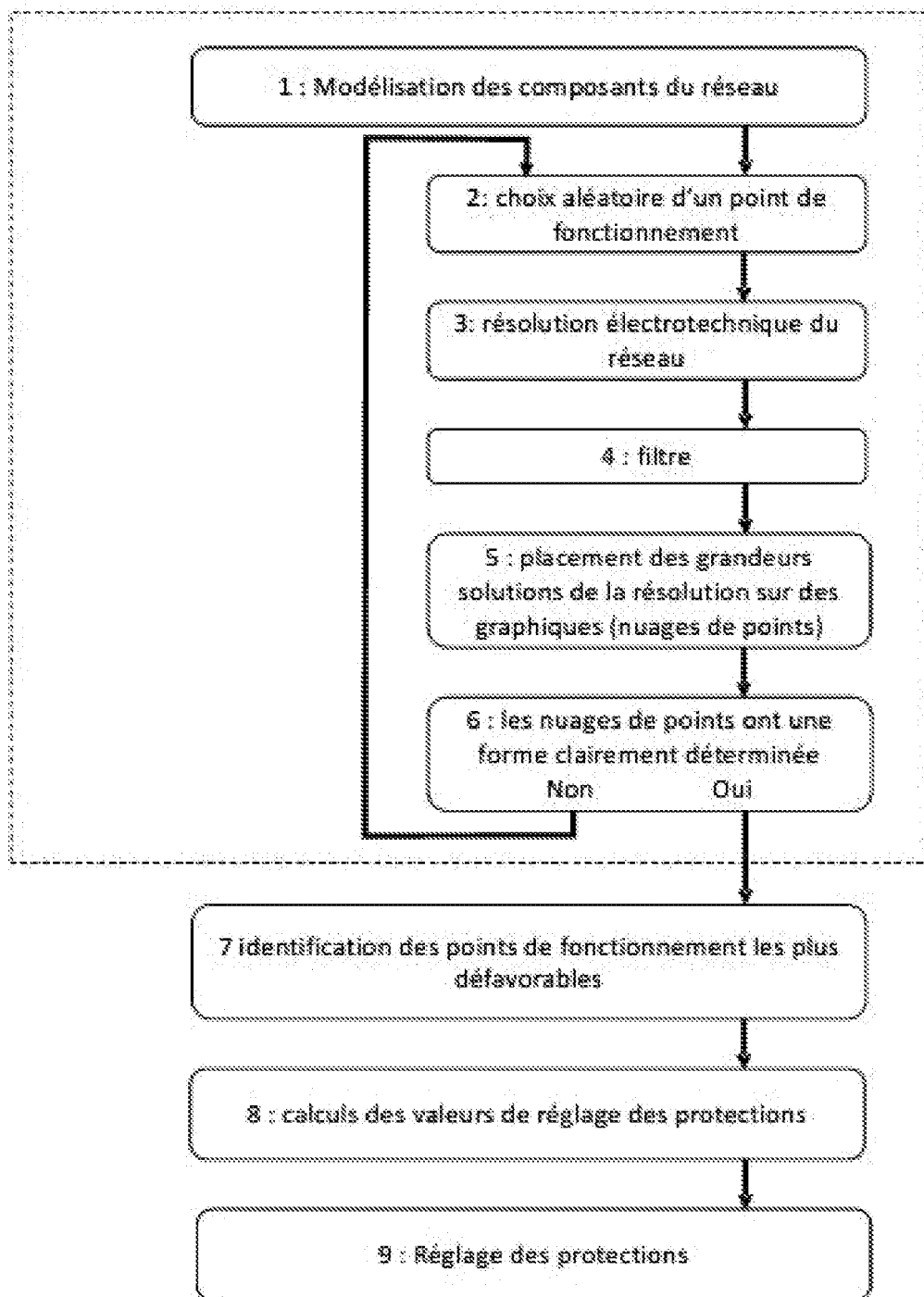
- la source « grid following » injecte un courant non nul et la tension au point de raccordement dudit générateur est inférieure à un seuil, ledit seuil étant voisin de 90% de la tension nominale du réseau électrique,
- et/ou la source « grid following » injecte un courant non nul et la tension au point de raccordement dudit générateur est supérieure à un seuil, ledit seuil étant voisin de 105% de la tension nominale du réseau électrique,
- et/ou la source « grid following » soutire une puissance active au réseau,
- et/ou la source « grid following » injecte ou soutire une puissance réactive supérieure aux valeurs limites dudit générateur.

[Revendication 12] Programme comprenant des instructions de code adaptées pour la mise en œuvre des étapes d'un procédé selon l'une des revendications 1 à 10, lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

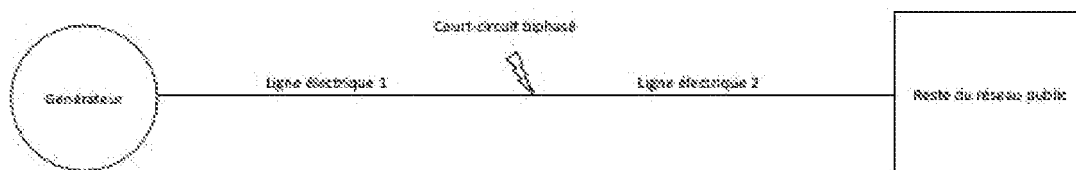
[Fig. 1]



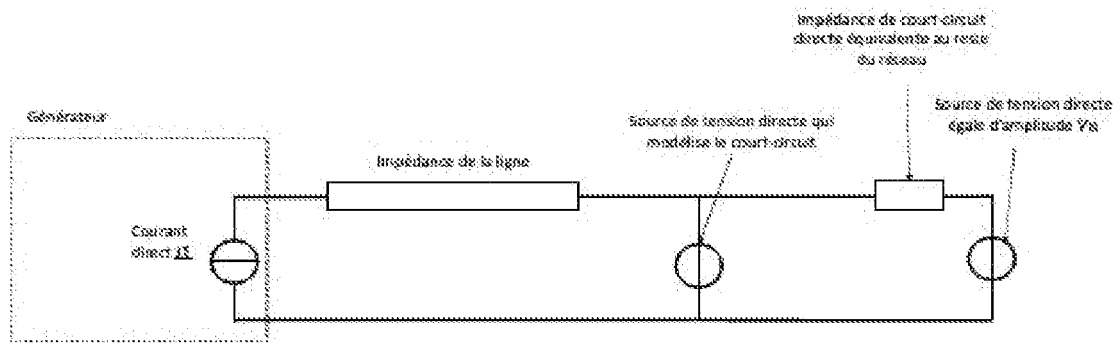
[Fig. 2]



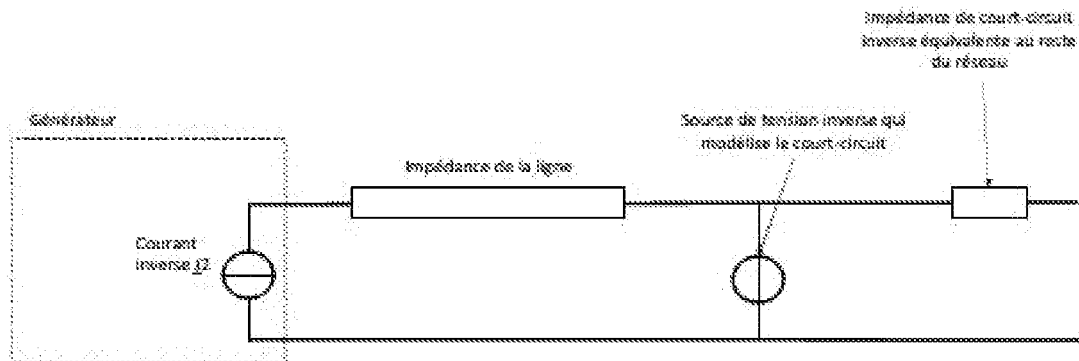
[Fig. 3a]



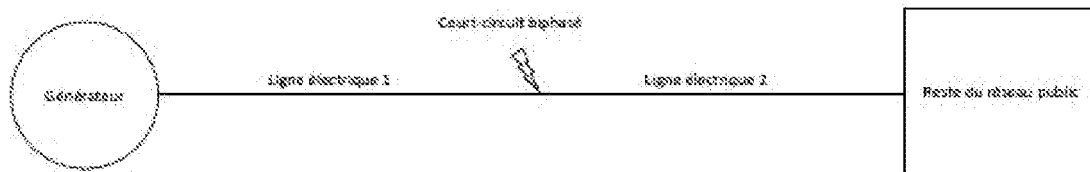
[Fig. 3b]



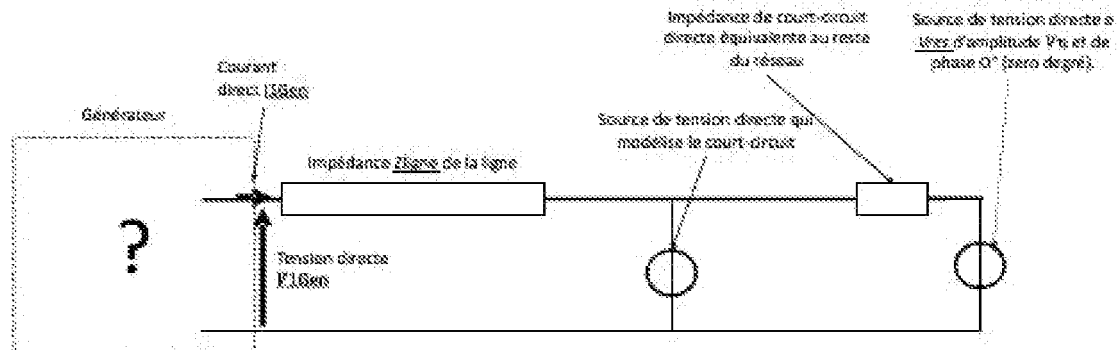
[Fig. 3c]



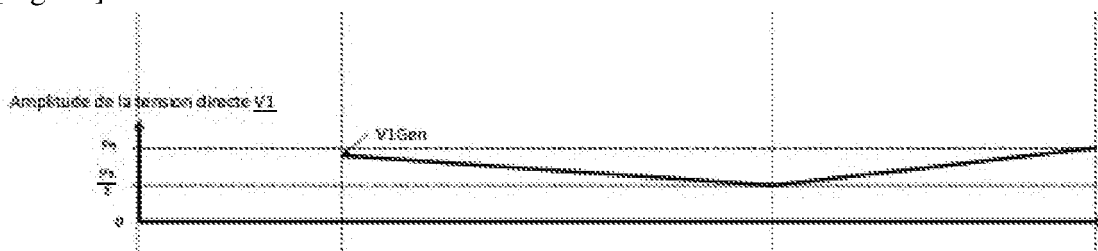
[Fig. 4]



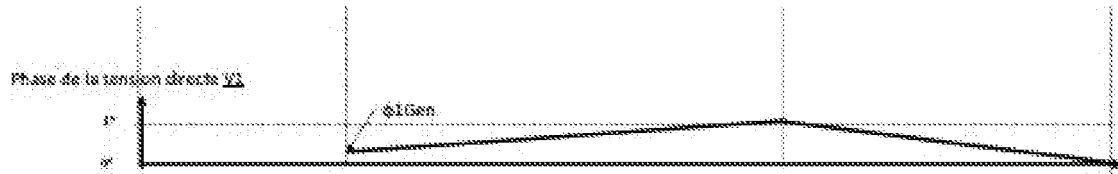
[Fig. 5a]



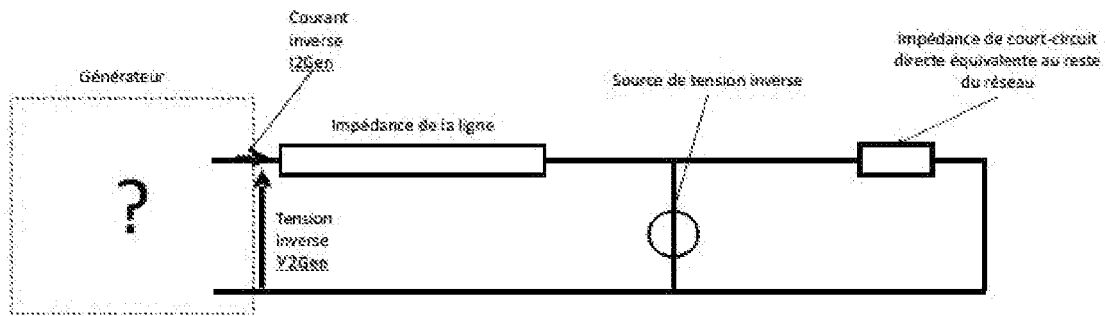
[Fig. 5b]



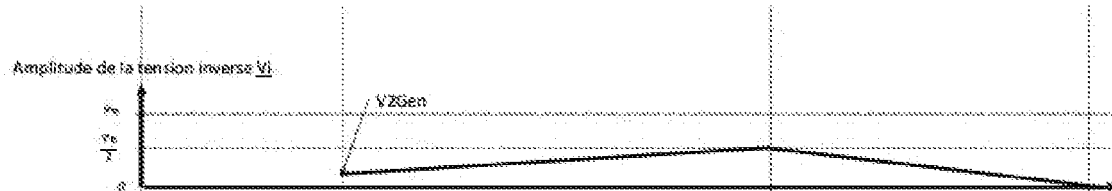
[Fig. 5c]



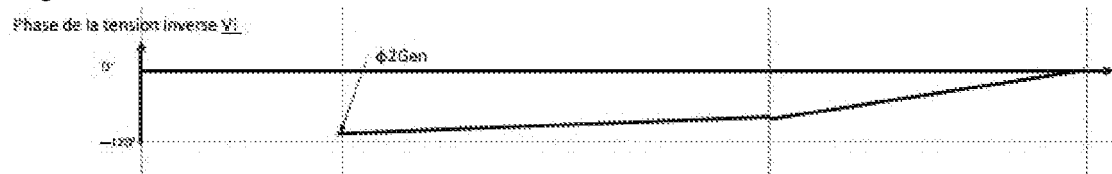
[Fig. 6a]



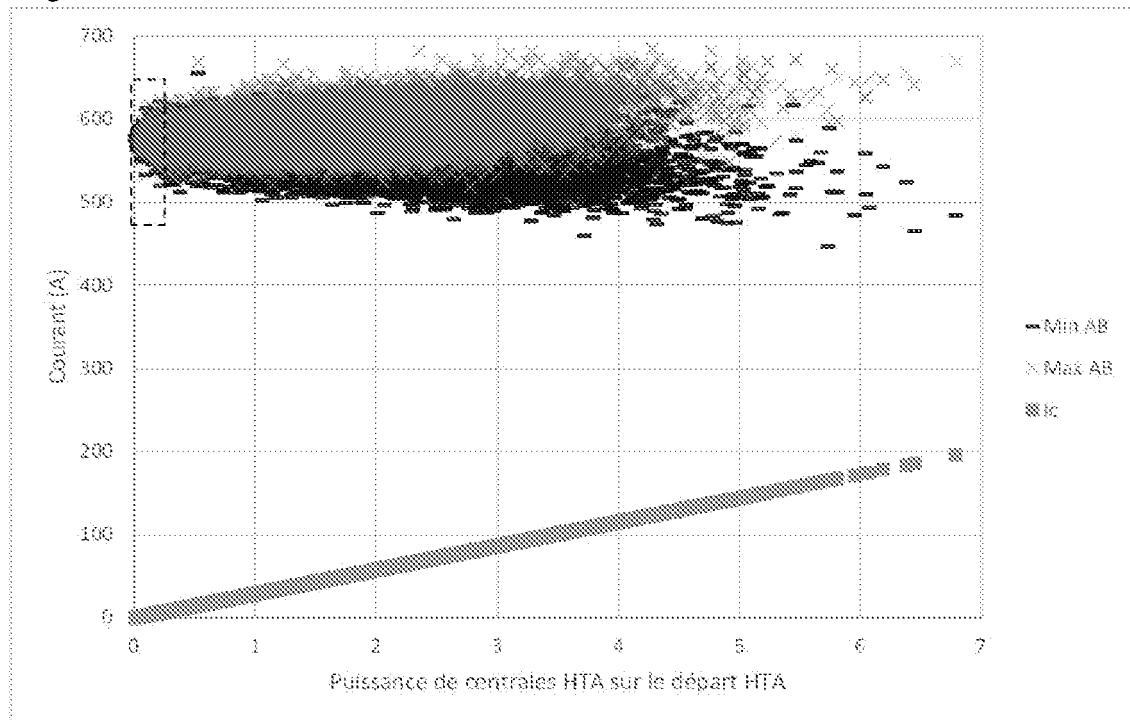
[Fig. 6b]



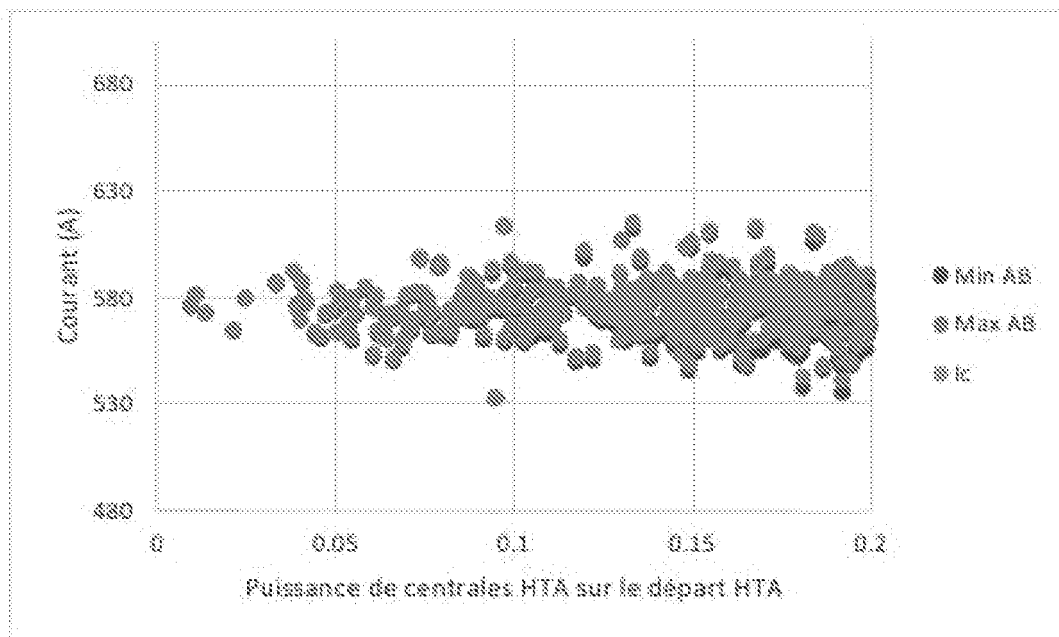
[Fig. 6c]



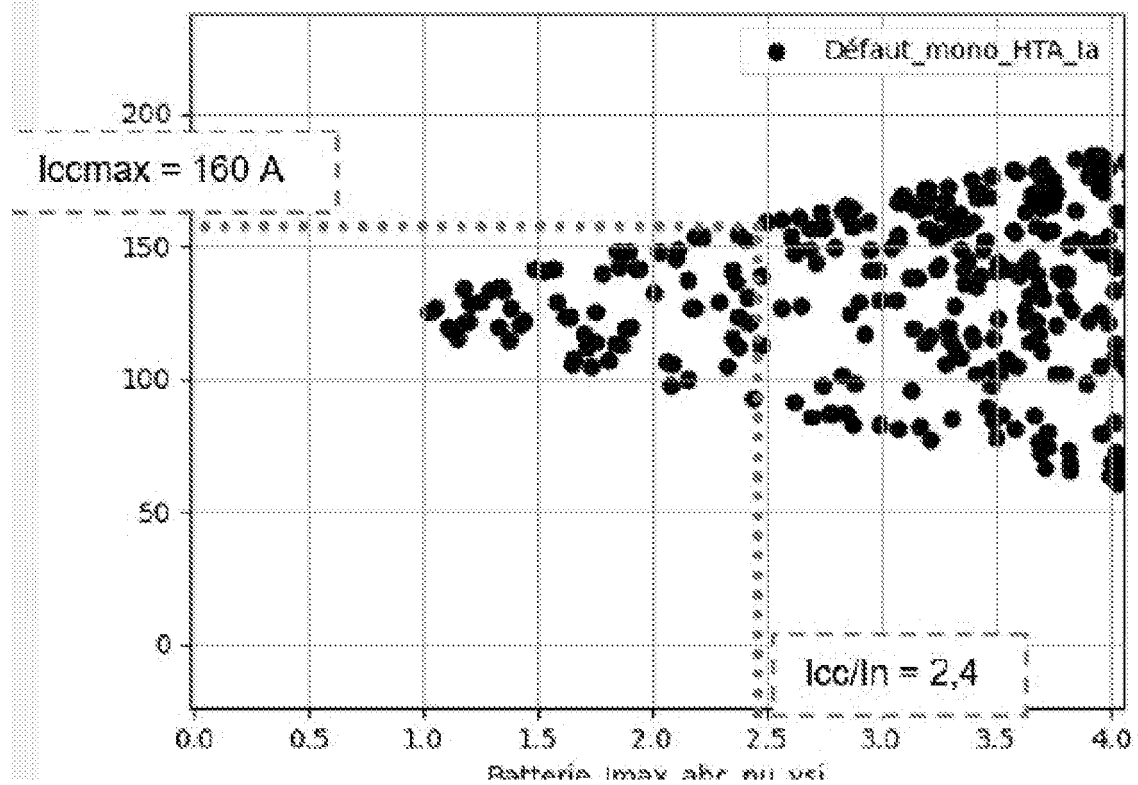
[Fig. 7a_1]



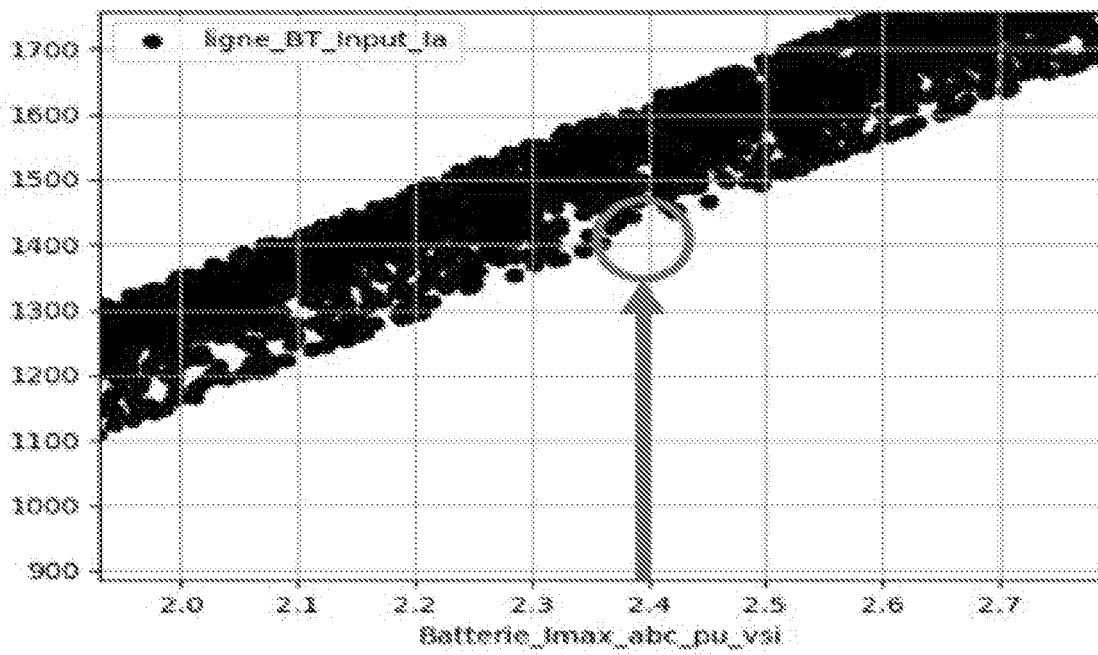
[Fig. 7a_2]



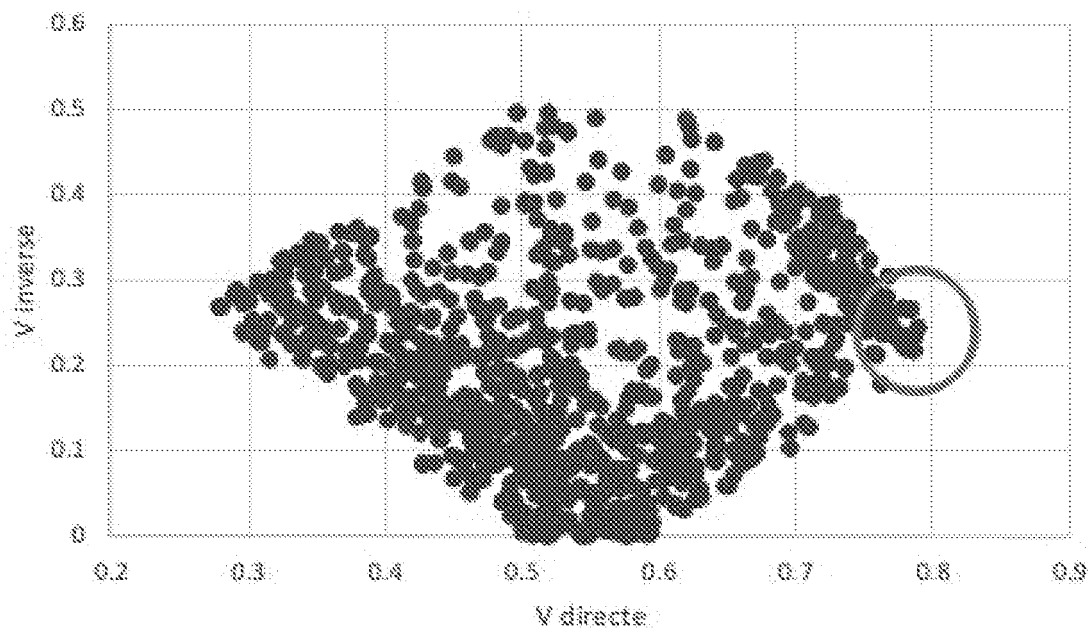
[Fig. 7b]



[Fig. 7c]



[Fig. 7d]



ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2114430 FA 902246**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **03-08-2022**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication		Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2008201020 A1	21-08-2008	AT	493790	T	15-01-2011
		CN	101617466	A	30-12-2009
		EP	2127063	A1	02-12-2009
		ES	2358876	T3	16-05-2011
		US	2008201020	A1	21-08-2008
		WO	2008103341	A1	28-08-2008

US 2016190790 A1	30-06-2016	CN	105474493	A	06-04-2016
		EP	3036807	A1	29-06-2016
		ES	2639465	T3	26-10-2017
		US	2016190790	A1	30-06-2016
		WO	2015024676	A1	26-02-2015

US 2011282507 A1	17-11-2011	CN	102239645	A	09-11-2011
		EP	2194656	A1	09-06-2010
		US	2011282507	A1	17-11-2011
		WO	2010063816	A1	10-06-2010
