10/05/2021

-

Date d'applicabilité : 28/09/2021

Date de fin de validité : [Date de fin de validité]

PROJET

NT	-	CNER-DCCL-GEF	2021	006074

Indice : 1.1

Description de l'algorithme de détermination de la production d'une éolienne ramenée au point de connexion

32 Pages 0 annexes

Documents annulés : -

Documents de référence : -

Référence fonctionnelle : -

Résumé : Ce document décrit le fonctionnement de l'algorithme de décompte pour les parcs éoliens offshore de l'AO 1 et AO 2.

Accessibilité :

Libre

Filières :

Métier	[Métier]
Domaine professionnel	[Domaines professionnels]
Processus local	[RTE-Processus local]

Domaine GED :

[Domaine]

Centre National Expertise Réseaux
Campus Transfo
2119 avenue Schneider
69330 Jonage

Description de l'algorithme de détermination de la production d'une éolienne ramenée au point de connexion

Rédacteur(s)		Vérificateur(s)		Approbateur(s)	
Nom	Visa	Nom	Visa	Nom	Date/Visa
V.BAYLE [Rédacteur2] [Rédacteur3]		N. BOUDIAF [Vérificateur2] [Vérificateur3]		N. BOUDIAF [Approbateur2] [Approbateur3]	
Lieu de conservation (ou...) : [Lieu de conservation]					

**Le rédacteur s'assure de la validité du contenu du document et de sa conformité aux règles documentaires.*
**Le vérificateur dispose des compétences techniques adaptées pour une vérification du contenu du document.*
**L'approbateur est une personne autorisée à la publication du document, engageant l'entité. Il s'assure de la faisabilité des instructions décrites ainsi que de la mise en œuvre des moyens nécessaires et valide la date de mise en application.*

DIFFUSION	
Pour action	Pour information
	Les lauréats des AO1 et A02

HISTORIQUE

Indice	Date	Projet ou Pour approbation	Rédacteur(s)	Modifications
0.1	16/04/21	Projet	V.BAYLE	Initialisation du document
1	31/05/21	Projet	N. BOUDIAF	Mise à disposition du document en mode PROJET
1.1	08/09/21	Pour approbation	V.BAYLE	Précisions et compléments Mise à disposition du document validé

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Rte

SOMMAIRE

1. Introduction 4
1.1 Description d'un parc éolien 4
1.2 Principe de l'algorithme de décompte 6
2. Données d'entrée 7
2.1 Données dynamiques 7
2.1.1 Données de comptage 7
2.1.2 Données producteur 7
2.2 Données statiques 8
3. Schémas de principe 10
3.1 Schéma d'une grappe d'éoliennes et modélisation d'un câble 10
3.2 Modélisation d'un transformateur HTA/BT 11
4. Description fonctionnelle de l'algorithme 12
4.1 Contrôle des données de comptage 12
4.1.1 Traitement de données CPT et TM 13
4.1.2 Contrôle de cohérence des données CPT 14
4.1.3 Remplacement de données CPT absentes 14
4.2 Traitement de chaque grappe 15
4.2.1 Calculs dans le sens WTG->OSS 15
4.2.2 Calculs dans le sens OSS->WTG 16
4.2.3 Contrôle de cohérence des données TM 17
4.2.4 Correction de données TM 18
4.2.5 Coefficients de partage des puissances 19
4.3 Répartition des CPT Rouge 23
4.4 Fonctions de transfert pour les transformateurs 24
4.4.1 Fonctions de transfert HTB/HTA 24
4.4.2 Fonctions de transfert HTA/BT 25
4.4.3 Fonctions de transfert pour les câbles 29

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

1. Introduction

1.1 Description d'un parc éolien

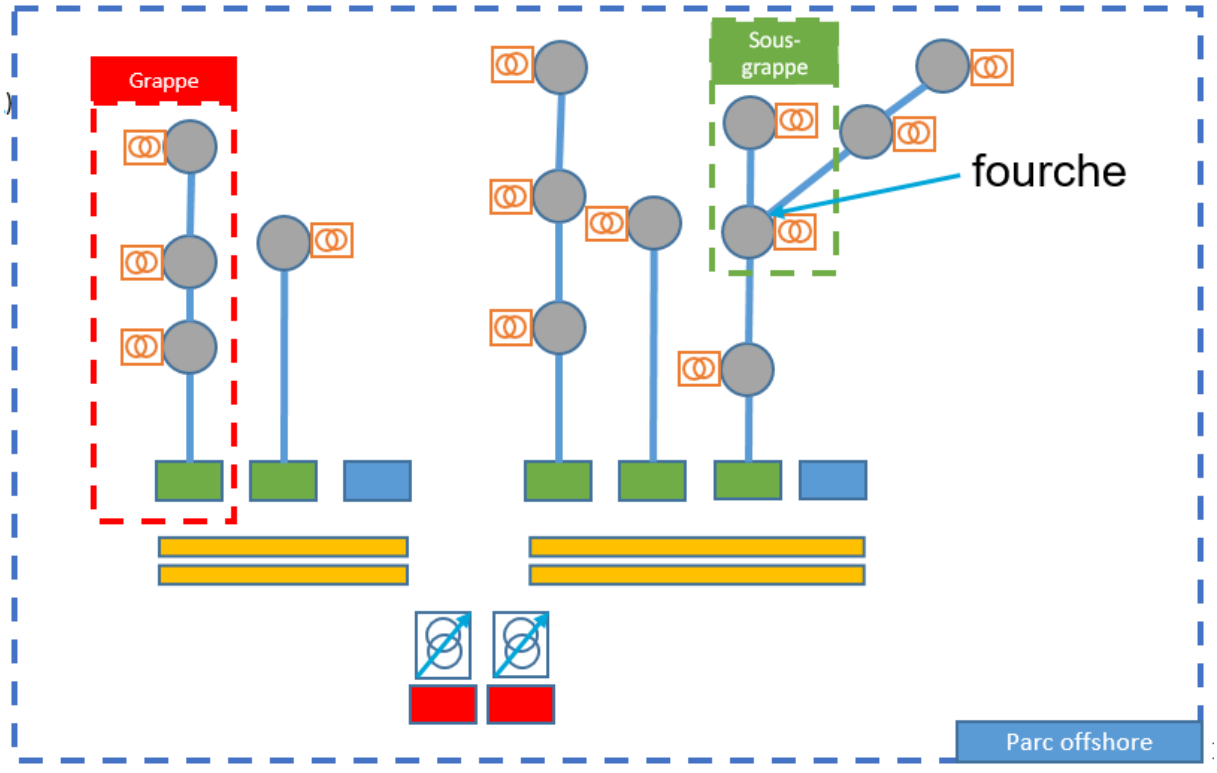
Un parc éolien offshore a une puissance installée d'environ 500 MW, et est constitué d'éoliennes de puissance installée 6 MW ou 8 MW. Le nombre d'éoliennes par parc varie entre environ 60 et 80.
Les réseaux offshore installés par les producteurs ont la forme suivante :

- les éoliennes sont disposées en « grappes » et reliées entre elles par des câbles sous-marins, de longueur typique 1 km.
- toutes ces grappes convergent vers la plateforme offshore.
- le point de livraison de situe côté HTB, sur les départs des deux câbles sous-marin vers le poste de raccordement terrestre.
- Deux transformateurs situés sur la plateforme offshore assurent la conversion HTA/HTB

Localisation des points de comptage :

- Comptage « limite de propriété » sur chaque départ HTB (**ROUGE**)
- Comptage « énergie verte » sur chaque départ HTA (**VERT**)
- Comptage « auxiliaires » (**BLEU**)

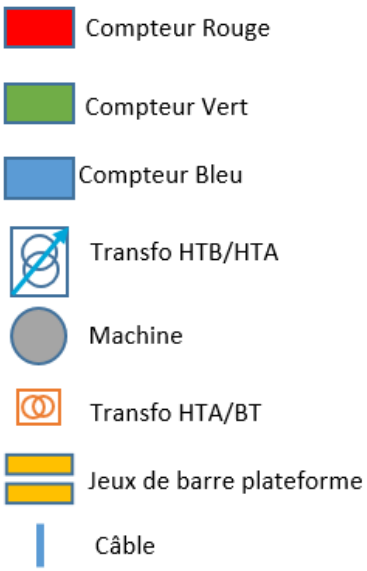
Les compteurs mesurent les puissances actives et réactives.



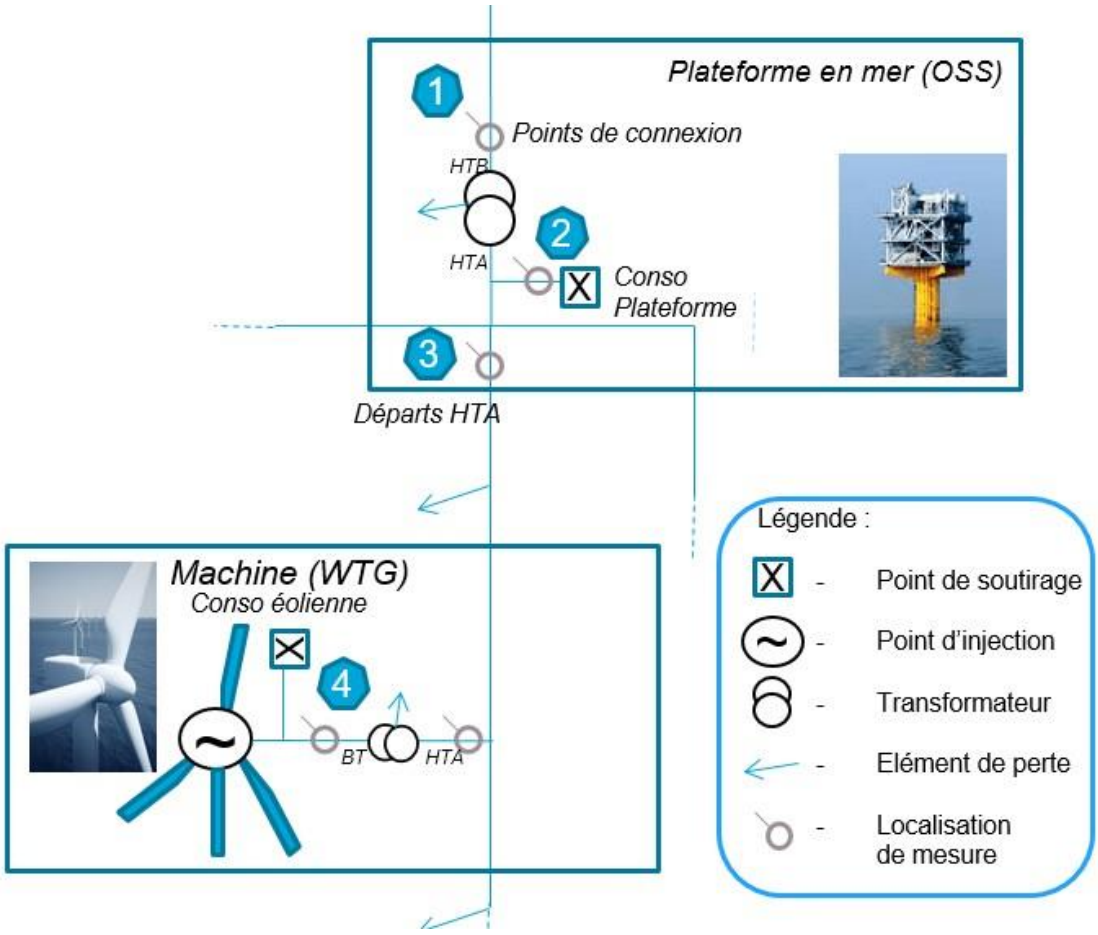
Légende :

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Description de l'algorithme de détermination de la production d'une éolienne ramenée au point de connexion



Localisation des points de mesure producteur :



Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Les transducteurs de mesure situés en position 1, 2, 3 et 4 fournissent les mesures de tension.

Les transducteurs en position 4 (HTA ou BT) fournissent également les puissances actives et réactives.

Les positions des régleurs en charge des transformateurs HTB/HTA et HTA/BT sont également mesurées.

1.2 Principe de l'algorithme de décompte

La structure des contrats d'obligation d'achat de l'énergie produite par les parcs offshore de l'AO 1 et AO 2 impose de distinguer les productions de groupes d'éoliennes affectées à des contrats d'obligation d'achat différents. Ces groupes d'éoliennes peuvent ne pas correspondre à des grappes d'éoliennes complètes, ce qui impose de distinguer les productions au sein d'une même grappe d'éolienne. Afin de couvrir les différentes situations possibles et qu'il n'est pas possible d'anticiper, et pour ne pas installer un point de comptage par mât éolien, choix couteux et contraignant, il a été préféré de mettre en place un système de comptage basé sur un algorithme de décompte de l'énergie produite. Cet algorithme de décompte, calcule, pour chaque pas de temps de 10 min, la production de chaque éolienne, ramenée à la limite de propriété RTE/producteur.

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

2. Données d'entrée

2.1 Données dynamiques

2.1.1 Données de comptage

Les compteurs mesurent les puissances actives et réactives moyennes, produites et consommées, au pas minute (compteurs 4 cadrans). Les données sont ensuite agrégées sur 10 min.
La puissance active nette est calculée. Une puissance active nette positive correspond à une production de puissance active.
De même, la puissance réactive nette est calculée. Une puissance réactive nette positive correspond à une production de puissance réactive.

Les données de comptage utilisées sont les suivantes :

Pour chaque départ grappe :
P_{VERT} : puissance active nette mesurée au point de comptage en tête de grappe
Q_{VERT} : puissance réactive nette mesurée au point de comptage en tête de grappe

Pour chaque point de livraison :
P_{ROUGE} : puissance active nette mesurée au point de comptage en tête de câble HTB
Q_{ROUGE} : puissance réactive nette mesurée au point de comptage en tête de câble HTB

Pour chaque départ auxiliaire :
P_{BLEU} : puissance active nette mesurée au point de comptage auxiliaire
Q_{BLEU} : puissance réactive nette mesurée au point de comptage auxiliaire

2.1.2 Données producteur

Les données acquises par les transducteurs du producteur sont les puissances actives, réactives et les tensions composées. Ces données sont ensuite agrégées sur des pas de 10 minutes.
Une puissance active positive correspond à une production de puissance active.
Une puissance réactive positive correspond à une production de puissance réactive.

Les données nécessaires au fonctionnement de l'algorithme sont les suivantes :

Pour chaque point de comptage :
U_{VERT} : tension composée mesurée au point de comptage en tête de grappe
U_{ROUGE} : tension composée mesurée au point de comptage en tête de câble HTB
U_{BLEU} : tension composée mesurée au point de comptage auxiliaire

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Pour chaque transformateur HTB/HTA :
PR_{OSS} : position du régleur en charge du transformateur

Pour chaque éolienne :
P_{eol} : puissance active injectée par l'éolienne au point de mesure
Q_{eol} : puissance réactive injectée par l'éolienne au point de mesure
U_{eol} : tension composée de l'éolienne au point de mesure

Si les TM sont mesurées côté BT, le paramètre suivant est également nécessaire :

PR_{eol} : position du régleur en charge du transformateur HTA/BT

2.2 Données statiques

Les données électrotechniques nécessaires aux calculs sont les suivantes :

Pour chaque transformateur HTB/HTA :
m : rapport de transformation HTB/HTA incluant un rapport $\frac{1}{\sqrt{3}}$ pour tenir compte du couplage (YD ou YDD)
R_1 : résistance de l'enroulement HTB
L_1 : inductance de l'enroulement HTB
R_2 :résistance de l'enroulement HTA
L_2 : inductance de l'enroulement HTA
R_m : résistance de magnétisation
L_m : inductance de magnétisation
N_{pr} : nombre de prise du régleur en charge
S_{pr} : seuil de variation d'une prise régleur (%)
Si le transformateur a un second enroulement HTA :
R_3 :résistance du second enroulement HTA
L_3 : inductance du second enroulement HTA

Pour chaque transformateur HTA/BT, si la mesure est effectuée côté BT :
m : rapport de transformation HTA/BT incluant un rapport $\sqrt{3}$ pour tenir compte du couplage (DY)
R_1 : résistance de l'enroulement HTA
L_1 : inductance de l'enroulement HTA
R_2 :résistance de l'enroulement BT
L_2 : inductance de l'enroulement BT
R_m : résistance de magnétisation
L_m : inductance de magnétisation
N_{pr} : nombre de prise du régleur en charge
S_{pr} : seuil de variation d'une prise régleur

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Pour chaque câble :

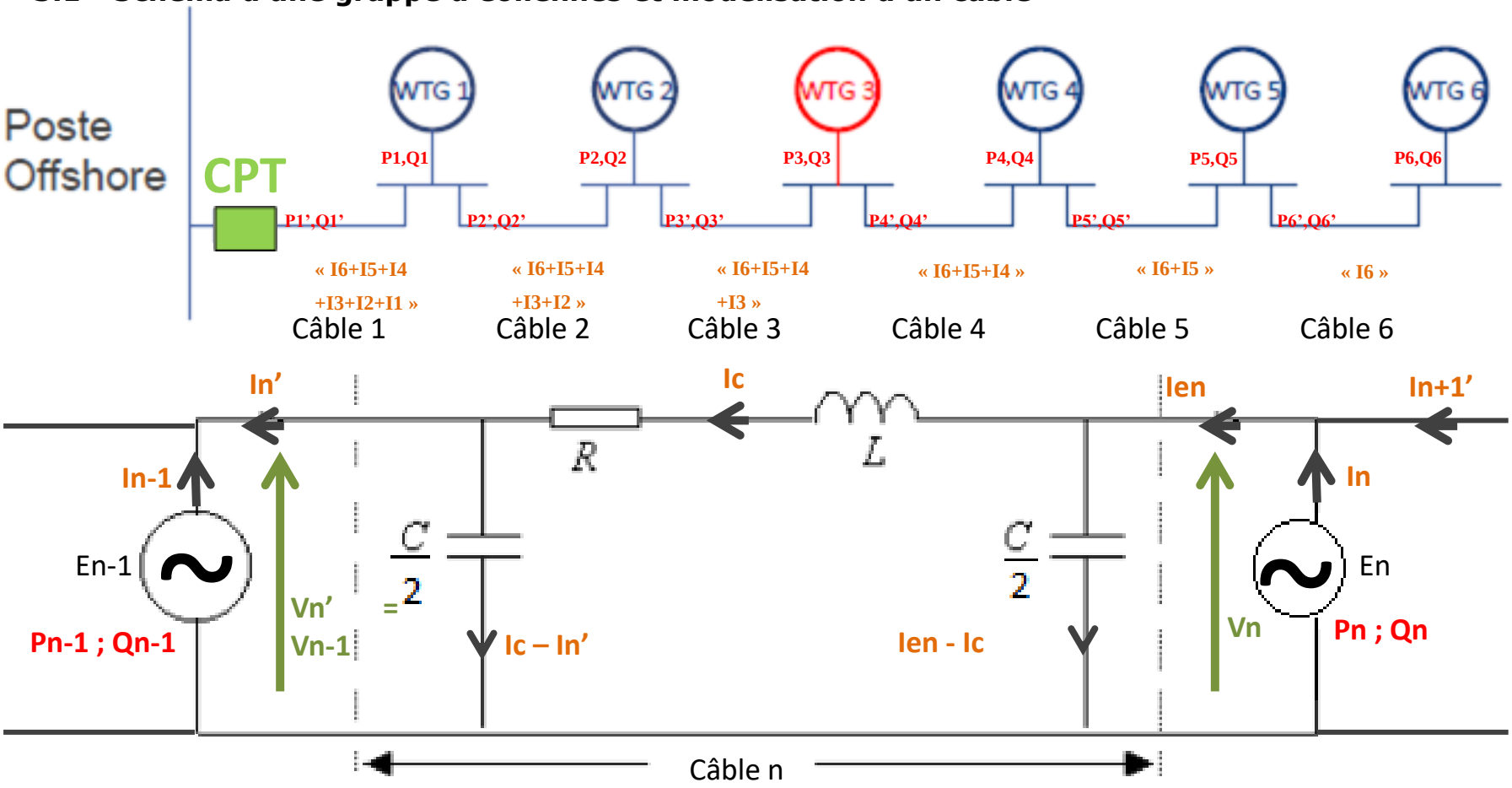
R : Résistance du câble
L : Inductance du câble
C : Capacité du câble

δ_{TM} : Précision des TM producteur

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

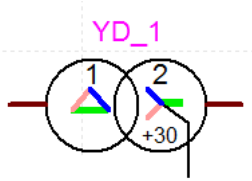
3. Schémas de principe

3.1 Schéma d'une grappe d'éoliennes et modélisation d'un câble



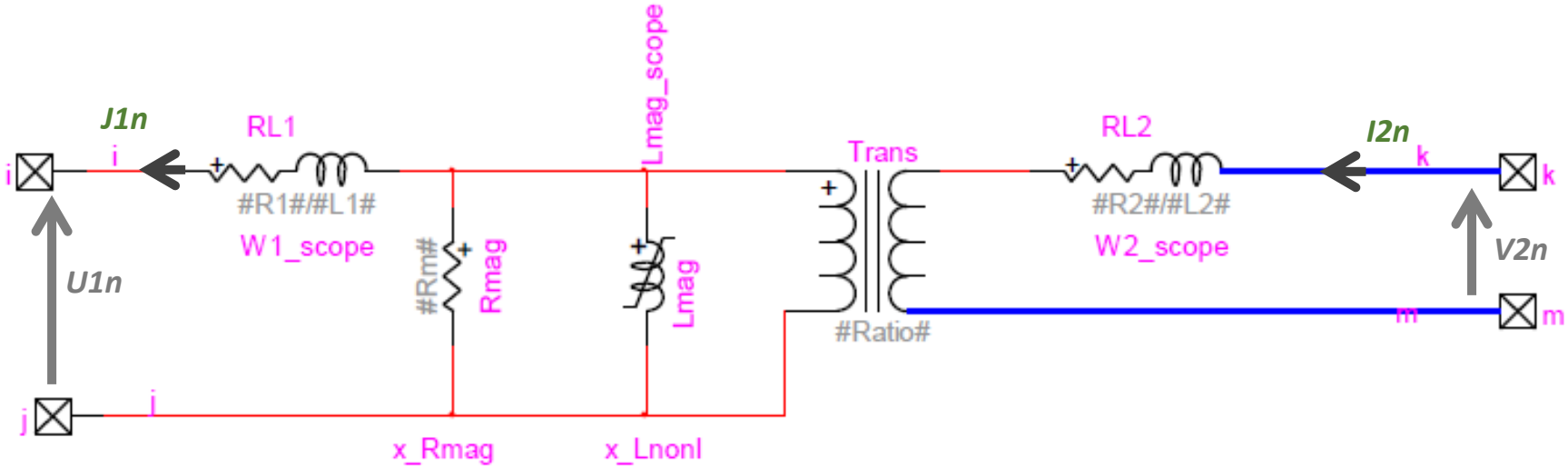
Hypothèse simplificatrice : valeur de R constante (non fonction de la température)

3.2 Modélisation d'un transformateur HTA/BT



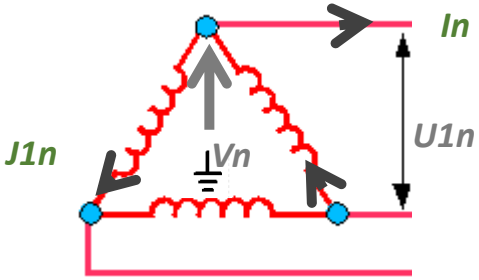
Le transformateur est monté :

- en triangle côté HTA
- en étoile côté BT



Hypothèse simplificatrice n° 2 : valeur de Rmag >> R1 et Lmag >> L1
Hypothèse simplificatrice n° 3 : valeur de R1, L1, R2, L2 constantes (non fonction de la température)

Les grandeurs récupérées en sortie de ce modèle sont donc les tensions composées et les courants « de branche » :



Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

4. Description fonctionnelle de l'algorithme

4.1 Contrôle des données de comptage

Le contrôle porte sur la présence des données, ainsi que sur leur cohérence.

Une donnée CPT_{ROUGE} est constituée pour chaque comptage rouge du triplet P_{ROUGE} ,Q_{ROUGE} U_{ROUGE}
Une donnée CPT_{VERT} est constituée pour chaque comptage vert du triplet P_{VERT} ,Q_{VERT} U_{VERT}
Une donnée CPT_{BLEU} est constituée pour chaque comptage bleu du triplet P_{BLEU} ,Q_{BLEU} U_{BLEU}

Remarque : une donnée CPT est donc constituée de données de comptage RTE et de mesure de tension producteur.

Une donnée CPT est considérée comme absente si au moins une donnée du triplet est absente.

Pour chaque donnée CPT présente, le traitement des données décrit au paragraphe 4.1.1 est effectué.

Un comptage du nombre de données absentes est effectué. Trois cas sont possibles :

1. S'il manque plus que 1 donnée CPT :

- S'il ne manque aucune donnée de comptage, le traitement des données (4.1.1) est tout de même effectué pour les données CPT manquantes mais le contrôle des données CPT (4.1.2) n'est pas effectué.
- S'il manque au moins une donnée de comptage, aucune répartition ne sera effectuée.

2. S'il ne manque qu'une seule donnée CPT, un remplacement de la donnée manquante est effectué (cf. paragraphe 4.1.3). Dans ce cas, le contrôle des données CPT n'est pas effectué.

3. S'il ne manque aucune donnée CPT, le contrôle de cohérence des données CPT est effectué (4.1.2).

4.1.1 Traitement de données CPT et TM

Si on est dans le cas d'un point de comptage Vert :

- Une donnée TM est constituée du triplet P_{eol} , Q_{eol} , U_{eol} .
- Une donnée TM est considérée comme absente si au moins une donnée du triplet est absente.
- Si les données TM sont mesurées côté BT, et que la donnée $PR_{éol}$ est absente, elle est remplacée par le numéro de prise médian.
- Le rapport de transformation réel m est calculé selon la formule suivante :

$$m = m\left(1 + S_{pr}\left(\frac{(N_{pr}+1)}{2} - PR_{éol}\right)\right)$$

- Si une donnée TM est absente, on remplace la valeur de la TM U_{eol} par la moitié de la valeur moyenne des autres TM U_{eol} .Une erreur sera détectée (4.2.3) et une tentative de correction sera effectuée (4.2.4).
- Une éolienne dont la valeur de tension U_{eol} est inférieure à 10% de la tension maximale de la grappe est considérée comme déconnectée de la grappe.
- La tension simple V_{eol} est calculée pour chaque éolienne :

$$V_{eol} = {U_{eol}}/{\sqrt{3}}$$

- Le courant est injecté par chaque éolienne est calculé, ainsi que le déphasage :

$$I_{eol} = \frac{\sqrt{P_{eol}^2 + Q_{eol}^2}}{3V_{eol}}$$

$$\Delta\varphi_{I_{eol}\ /V_{eol}} = \arctan\left(\frac{Q_{eol}}{P_{eol}}\right)$$

Si on est dans le cas d'un point de comptage rouge :

- Si PR_{OSS} est absente, elle est remplacée le numéro de prise médian.
- Le rapport de transformation réel m est calculé selon la formule suivante :

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

$$m = m\left(1 + S_{pr}\left(\frac{(N_{pr}+1)}{2} - PR_{OSS}\right)\right)$$

Si on est dans le cas d'un Point de Comptage Rouge, Vert ou Bleu :

- La tension simple V_{CPT} est calculée pour chaque point de comptage :

$$V_{CPT} = {U_{CPT}}/{\sqrt{3}}$$

- Le courant I_{CPT} injecté à chaque point de comptage est calculé, ainsi que le déphasage :

$$I_{CPT} = \frac{\sqrt{P_{CPT}^2 + Q_{CPT}^2}}{3V_{CPT}}$$

$$\Delta\varphi_{I_{CPT}\ /V_{CPT}} = \arctan\left(\frac{Q_{CPT}}{P_{CPT}}\right)$$

4.1.2 Contrôle de cohérence des données CPT

Le principe du contrôle des données est de comparer les sommes de productions vertes et bleues d'une part à la somme des productions rouges d'autre part, en tenant compte des pertes dans les transformateurs. La formule de principe est la suivante :

$$\left[\sum_i {}^{primaire}P_{VERT_i} + \sum_j {}^{primaire}P_{BLEU_j}\right] = \sum_k P_{ROUGE_k}$$

Comme les compteurs Verts et Bleus sont côté HTA, on ramène les puissances actives côté HTB pour faire la comparaison. On compare la valeur avec la somme des puissances actives

La transformation des puissances se fait à l'aide des fonctions de transformations décrites au paragraphe 4.4.1.

L'écart relatif entre les sommes est calculé.

4.1.3 Remplacement de données CPT absentes

Le remplacement d'une donnée CPT Rouge se fait par la formule de principe suivante :

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

$$P_{ROUGE_{cor}} = \left[\sum_{i}^{primaire} P_{VERT_i} + \sum_{j}^{primaire} P_{BLEU_j} \right] - \sum_{k \neq cor} P_{ROUGE_k}$$

Ceci nécessite de ramener les données des comptages VERT et BLEU côté HTB des transformateurs de la plateforme (le détail des calculs est au paragraphe 4.4.1).

Le remplacement d'une donnée de comptage VERT se fait par la formule suivante :

$$P_{VERT_{cor}} = \sum_{k}^{secondaire} P_{ROUGE_k} - \left[\sum_{i \neq cor} P_{VERT_i} + \sum_{j} P_{BLEU_j} \right]$$

Ceci nécessite de ramener les données des comptages ROUGE côté HTA des transformateurs de la plateforme (détail des calculs au paragraphe 4.4.1).

On procède de même pour remplacer une donnée de comptages BLEU.

$$P_{BLEU_{cor}} = \sum_{k}^{secondaire} P_{ROUGE_k} - \left[\sum_{i \neq cor} P_{BLEU_i} + \sum_{j} P_{VERT_j} \right]$$

Remarque : les formules précédentes sont aussi valables avec les puissances réactives. Les calculs au 4.4.1 permettent également la détermination de la tension éventuellement manquante.

4.2 Traitement de chaque grappe

Le traitement de chaque grappe se fait indépendamment des autres grappes

4.2.1 Calculs dans le sens WTG->OSS

Un calcul par récurrence est effectué. Pour chaque éolienne, les fonctions de transfert du paragraphe 4.4.2 sont utilisées pour calculer les tensions, courant et puissances côté HTA. Dans le cas où les TM sont mesurées côté HTA, les données sont utilisées directement.

Les fonctions de transfert du paragraphe 4.4.3 sont ensuite utilisées pour déterminer par récurrence les puissances et courant dans chaque câble, ainsi que les tensions à chaque nœud électrique.

Soit N le nombre d'éoliennes dans la grappe, alors on a $\forall n \in [\![1; N]\!]$:

- I'_{n+1}, P'_{n+1}et Q'_{n+1} ont été calculés précédemment

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

- le capteur de l'éolienne numéro n donne les mesures de P_{2_n}, Q_{2_n} et V_{2_n}, d'où sont déduits les valeurs de P_{1_n}, Q_{1_n}, V_n , I_n (4.4.2)
- ce qui permet de déterminer I_{e_n}(4.4.3.1.1)
- Puis I_{c_n}, et I'_n(4.4.3.1.2)
- le capteur de l'éolienne numéro n-1 donne la mesure de $P_{2_{n-1}}$, $Q_{2_{n-1}}$ et $V_{2_{n-1}}$ d'où est déduit la valeur de V_{n-1} (4.4.2)
- Ce qui permet de calculer P'_n et Q'_n(4.4.3.2)
- Avec les conditions initiales suivantes :

$$\begin{cases} P'_{N+1} = 0 \\ Q'_{N+1} = 0 \\ I'_{N+1} = 0 \\ V_0 = V_{VERT} \end{cases}$$

On peut donc déterminer par récurrence les valeurs de P'_n , Q'_n et I'_n pour chaque câble n.

Le contrôle de cohérence (4.2.3) est effectué à la fin des calculs.

4.2.2 Calculs dans le sens OSS->WTG

Un calcul par récurrence est effectué. Pour chaque fourche dans la grappe, le calcul est d'abord effectué dans le sens WTG->OSS (cf. 4.2.1), car il n'est pas possible de faire les calculs dans le sens OSS->WTG si on est dans une fourche.

Pour chaque éolienne, les fonctions de transfert du paragraphe 4.4.2 sont utilisées pour calculer les tensions, courants et puissances côté HTA. Dans le cas où les TM mesurées côté HTA, les données d'entrée sont utilisées directement.

Les fonctions de transfert du paragraphe 4.4.3 sont ensuite utilisées pour déterminer par récurrence les puissances et courant dans chaque câble, ainsi que les tensions à chaque nœud électrique.

Soit N le nombre d'éoliennes dans la grappe, alors on a $\forall n \in [\![1; N]\!]$:

- V_{n-1} , I'_n, P'_net Q'_n ont été calculés précédemment
- ce qui permet de déterminer I_{e_n} et I_{c_n} (4.4.3.1.2)
- le capteur de l'éolienne numéro n donne les mesures de P_{2_n}, Q_{2_n} et V_{2_n}, d'où sont déduits les valeurs de P_{1_n}, Q_{1_n}, V_n , I_n (4.4.2.1)
- ce qui permet de déterminer I'_{n+1} (4.4.3.1.1)
- Enfin, P'_n et Q'_n sont calculés (4.4.3.2)
- Avec les conditions initiales suivantes :

$$\begin{cases} P'_1 = P_{VERT} \\ Q'_1 = Q_{VERT} \\ I'_1 = I_{VERT} \\ V_0 = V_{VERT} \end{cases}$$

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

On peut donc déterminer par récurrence les valeurs de P'_n , Q'_n et I'_n pour chaque câble n.

Le contrôle de cohérence (4.2.3) est effectué à la fin des calculs.

4.2.3 Contrôle de cohérence des données TM

Il apparait une redondance entre les grandeurs :

- $\mathrm{V_{n-1}}$, calculée au paragraphe 4.4.2.1 à partir des valeurs obtenues des TM de l'éolienne n-1.
- $\mathrm{V'_n}$, grandeur calculée à partir des valeurs de l'éolienne n et des formules du paragraphe 4.4.3.1.2.

Ces valeurs devant être égales, cette relation est utilisée pour contrôler la cohérence locale de chaque TM.

Si on a :

$$|V'_n - V_{n-1}| < \delta_{TM} V'_n$$

Où δ_{TM} est la précision des TM

Alors la TM numéro n-1 est validée.

Le calcul est effectué pour les tensions $\mathrm{V'_n}$ obtenues dans les paragraphes 4.2.2 et 4.2.1. La TM est validée si elle est validée pour l'un ou l'autre des calculs.

Si toutes les TM d'une grappe sont absentes, toutes les TM passent automatiquement au statut non validé.

Le contrôle de cohérence global est effectué la comparaison des valeurs de :

- P_{CPT} et P'_1 issus des calculs du 4.2.1
- P_N et P_{1_N} issus des calculs du 4.2.2

Si on a :

$$\begin{cases} |P'_1 - P_{CPT}| < \delta_{TM} P_{CPT} \\ |P_N - P_{1_N}| < \delta_{TM} P_{1_N} \end{cases}$$

Alors les calculs sont globalement cohérents au niveau de la grappe.

Si les contrôles de cohérence globaux et locaux sont validés, alors la répartition des puissances peut s'effectuer selon les calculs de la partie 4.2.5.

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Si un des contrôles de cohérence est en échec, et que la grappe de comporte pas de fourche, une tentative de correction est effectuée (4.2.4).

Remarque : si on est dans une fourche, le contrôle global est impossible car il n'y a pas de données de comptage en tête de fourche. Il est dans de cas remplacé par un contrôle de la tension en tête de grappe.

Remarque : pour les grappes comportant des fourches, le contrôle est réalisé avec un coefficient $(1+\sqrt{Nf}) \times \delta_{TM}$ avec Nf le nombre de fourches.

4.2.4 Correction de données TM

La correction de données n'est possible que dans les grappes dépourvues de fourche.

Si les contrôles de cohérence sont KO mais qu'aucune TM ne présente d'incohérence, cela signifie que les contrôles globaux sont en échec. Il est impossible de corriger une TM, donc la répartition de P_{VERT} et Q_{VERT} se fera de manière arbitraire.
Si plusieurs TM sont incohérentes, il n'est pas non plus possible d'effectuer de correction. La répartition de P_{VERT} et Q_{VERT} se fera de manière arbitraire

Si une seule TM est incohérente, une tentative de correction est effectuée pour cette TM :

P_{cor}, Q_{cor} et V_{cor} sont calculés en combinant les méthodes du paragraphe 4.2.1 et 4.2.2:

$$OSS \rightarrow E1 \rightarrow \cdots \rightarrow Ecor \leftarrow \cdots \leftarrow E5 \leftarrow E6$$

La tension corrigée est calculée comme la moyenne des tensions calculées par les deux méthodes.

Les puissances corrigées sont calculées à partir des équations du paragraphe 4.4.3.2 et des puissances encadrantes obtenues par les deux méthodes.

Les calculs du 4.2.1 et du 4.2.2 sont relancés avec ces valeurs de remplacement, et ainsi que les contrôles du 4.2.3.

- Si OK → les mesures de la TM défectueuse sont remplacées. Les TM ainsi corrigées peuvent être utilisées pour la répartition de P_{VERT} et Q_{VERT} entre les éoliennes.

- Si KO → la répartition de P_{VERT}et Q_{VERT} se fait de manière arbitraire

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

4.2.5 Coefficients de partage des puissances

4.2.5.1 Partage des courants entre les éoliennes

Les pertes joules sont dissipées dans chaque câble n :

$$P_{Jn} = 3 \times R_n \times |I_{Cn}|^2$$

Où :
P_{Jn} est la puissance dissipée dans le câble n.

Le courant I_{Cn} provient de l'éolienne n et du câble n+1 :

$$\begin{cases} \alpha_n = \dfrac{|I_n|}{|I_n| + |I'_{n+1}|} \\ 1 - \alpha_n = \dfrac{|I'_{n+1}|}{|I_n| + |I'_{n+1}|} \end{cases}$$

α_n est la proportion de courant dans le câble n provenant de l'éolienne n

La part du courant de l'éolienne n dans le courant I_{Cm} est donc déterminée par la formule suivante :

$$\beta_{nm} \begin{cases} \alpha_n \prod_{i=m}^{n-1}(1-\alpha_i) & si\ m < n \\ \alpha_n & si\ m = n \\ 0 & si\ m > n \end{cases}$$

Exemple pour N=6 :

$$\begin{bmatrix} part\ de \\ dans \end{matrix} & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 & E6 \\ I_{C1} & \alpha_1 & \alpha_2(1-\alpha_1) & \alpha_3(1-\alpha_2)(1-\alpha_1) & \cdots & \cdots & \alpha_6 \prod_{i=1}^{5}(1-\alpha_i) \\ I_{C2} & 0 & \alpha_2 & \alpha_3(1-\alpha_2) & \ddots & \alpha_5 \prod_{i=2}^{4}(1-\alpha_i) & \vdots \\ I_{C3} & 0 & 0 & \alpha_3 & \alpha_4(1-\alpha_3) & \ddots & \vdots \\ I_{C4} & 0 & 0 & 0 & \alpha_4 & \alpha_5(1-\alpha_4) & \alpha_6(1-\alpha_5)(1-\alpha_4) \\ I_{C5} & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_5 & \alpha_6(1-\alpha_5) \\ I_{C6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_6 = 1 \end{bmatrix}$$

La part du courant provenant de l'éolienne n dans le câble m est donc donnée par :

$$I_{nCm} = \beta_{nm} I_{Cm}$$

Et on a donc :

$$I_{Cm} = \sum_{n=m}^{N} I_{nCm}$$

Remarque : en présence d'une fourche (par exemple en position 3) on doit ajouter un coefficient dès lors que m > 3 :

$$\beta_{nm} \quad si\ m > 3 \begin{cases} \dfrac{I_{C4}}{I_{C4} + I_{C7}} \alpha_n \displaystyle\prod_{i=m}^{n-1} (1 - \alpha_i) & côté\ éol\ 4 \\ \dfrac{I_{C7}}{I_{C4} + I_{C7}} \alpha_n \displaystyle\prod_{i=m}^{n-1} (1 - \alpha_i) & côté\ éol\ 7 \end{cases}$$

4.2.5.2 Partage des puissances entre les éoliennes

La puissance active mesurée au point de comptage peut s'exprimer de la manière suivante :

$$P_{CPT} = P'_1 = P_{1_1} + P'_2 - P_{J_1} = P_{1_1} + P_{1_2} + P'_3 - (P_{J_1} + P_{J_2}) = \cdots = \sum_{n=1}^{N} (P_{1_n} - P_{J_n})$$

$$P'_1 = \sum_{n=1}^{N} \left(P_{1_n} - 3R_n I_{Cn}^2\right)$$

$$P'_1 = P_{1_1} + \cdots + P_{1_N} - \sum_{n=1}^{N} 3R_n \left[\sum_{i=n}^{N} I_{iCn}\right]^2$$

$$P_{CPT} = P'_1 = P_{1_1} + \cdots + P_{1_N} - \sum_{n=1}^{N} \left[3R_n \left(\sum_{i=n}^{N} I_{iCn}^2 + \sum_{i=n}^{N} \sum_{\substack{j=n \\ j \neq i}}^{N} I_{iCn} I_{jCn}\right)\right] \quad E_{P_{CPT}}$$

La puissance réactive s'exprime :

$$Q_{CPT} = Q'_1 = \sum_{n=1}^{N} \left(Q_{1_n} - 3L_n \omega I_{Cn}^2 + \frac{3C_n \omega}{2} (V_n^2 + V_{n-1}^2)\right)$$

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

$$Q'_1 = Q_{1_1} + \cdots + Q_{1_N} + \sum_{n=1}^{N}\left[-3L_n\omega\left[\sum_{i=n}^{N} I_{iCn}\right]^2 + \frac{3C_n\omega}{2}\left(V_n^2 + V_{n-1}^2\right)\right]$$

$$Q_{CPT} = Q'_1 = Q_{1_1} + \cdots + Q_{1_N} + \sum_{n=1}^{N}\left[-3L_n\omega\left(\sum_{i=n}^{N} I_{iCn}^2 + \sum_{i=n}^{N}\sum_{\substack{j=n \\ j\neq i}}^{N} I_{iCn}I_{jCn}\right) + \frac{3C_n\omega}{2}\left(V_n^2 + V_{n-1}^2\right)\right]$$

Les termes P_{1_i} et I_{iCn}^2 reviennent à l'éolienne i. Allouer ces termes à une éolienne reflète la physique à l'œuvre dans les machines et dans les câbles.

Pour la partie réactive, les termes Q_{1_i} et I_{iCn}^2revient à l'éolienne i. Allouer ces termes à une éolienne reflète la physique à l'œuvre dans les machines et dans les câbles.

En revanche, les termes croisés dans la double somme (côté actif et réactif) sont générés conjointement par les éoliennes i et j, et il n'existe aucune répartition physique qui reflète les équations mathématiques.

Un choix arbitraire doit être fait pour partager ce terme $I_{iCn}I_{jCn}$ entre les éoliennes i et j : puisqu'il s'agit d'un terme de pertes joules, il est naturel de le répartir proportionnellement aux carrés des courants I_{iCn} et I_{jCn}.

Mais les termes en V_n^2 ne sont pas imputables à une éolienne en particulier. La mise sous tension d'une seule éolienne (l'éolienne N par exemple) provoquera la génération de puissance réactive dans tout le câble sous-marin. Ainsi, ces termes sont générés conjointement par toutes les éoliennes couplées à la grappe. On choisira donc de répartir ce terme équitablement entre ces éoliennes

4.2.5.3 Coefficient de partage des puissances en tête grappe

Finalement on répartit chacun des termes ainsi :

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Description de l'algorithme de détermination de la production d'une éolienne ramenée au point de connexion

$$\begin{cases} P_{1_i} & \rightarrow Ei & Répartition\ physique \\ Q_{1_i} & \rightarrow Ei & Répartition\ physique \\ I_{iCn}^2 & \rightarrow Ei & Répartition\ physique \\ I_{iCn}I_{jCn} & \begin{cases} \dfrac{I_{iCn}^2}{I_{iCn}^2+I_{jCn}^2} \rightarrow Ei \\ \dfrac{I_{jCn}^2}{I_{iCn}^2+I_{jCn}^2} \rightarrow Ej \end{cases} & Répartition\ arbitraire \\ V_n^2 & \begin{cases} \dfrac{1}{N_r} \rightarrow En \end{cases} & Répartition\ arbitraire \end{cases}$$

Avec N_r le nombre d'éoliennes connectées dans la grappe

La part de l'éolienne m dans la puissance P1' est donc donnée par :

$$c_m = \left\{ P_{1_m} - \sum_{n=1}^{N} 3R_n \left[I_{mCn}^2 + 2 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{N} I_{mCn} I_{iCn} \frac{I_{mCn}^2}{I_{mCn}^2 + I_{iCn}^2} \right] \right\} \Big/ \left\{ \sum_{n=1}^{N} [P_n - 3R_n I_{Cn}^2] \right\}$$

La part de l'éolienne m dans la puissance Q1' est donc donnée par :

$$q_m = \frac{\left\{ Q_{1_m} - \sum_{n=1}^{N} 3L_n\omega \left[I_{mCn}^2 + 2 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{N} I_{mCn} I_{iCn} \frac{I_{mCn}^2}{I_{mCn}^2 + I_{iCn}^2} \right] + \frac{1}{N_r} \sum_{n=1}^{N} \frac{3C_n\omega}{2} (V_n^2 + V_{n-1}^2) \right\}}{\left\{ \sum_{n=1}^{N} \left[Q_n - 3L_n\omega I_{Cn}^2 + \frac{3C_n\omega}{2} (V_n^2 + V_{n-1}^2) \right] \right\}}$$

Les puissances actives et réactives attribuées à l'éolienne m sont donc données par :

$$P_{VERT_m}^{eol} = c_m \times P_{VERT}$$
$$P_{VERT_m}^{eol} = q_m \times Q_{VERT}$$

Remarque : une éolienne déconnectée se voit affecter un coefficient nul

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

4.2.5.4 Partage des puissances en cas de répartition arbitraire

En cas d'échec du contrôle des données TM, le coefficient est égal à la production verte divisée par le nombre d'éoliennes connectées de la grappe.

4.3 Répartition des CPT Rouge

La somme des P_{ROUGE} est calculée. Si la somme est négative, le parc soutire au point de livraison. Par conséquent, aucune répartition n'est effectuée

La somme des P_{VERT} est calculée. Si la somme est négative, les grappes sont globalement consommatrices et aucune répartition n'est effectuée. Dans le cas où la somme des P_{ROUGE} est positive, cela correspond à une production des auxiliaires.

La somme des P_{BLEU} est calculée. Si elle est positive, on est dans le cas d'une production des auxiliaires, donc elle doit être retirée de la somme des P_{ROUGE} . Le calcul s'effectue en utilisant les fonctions de transfert du paragraphe 4.4.1.

Les pertes dans chaque grappe sont cumulées pour obtenir les pertes grappes totales.

Les pertes platerforme sont calculées comme la différence entre les sommes de $P_{VERT} + P_{BLEU}$ moins la somme des P_{ROUGE} .

Les pertes totales sont calculées comme les somme des pertes plateforme et des pertes totales grappes.

Les parts de puissances rouge associées à chaque éolienne sont calculées ainsi :

$$P^{eol}_{ROUGE_n} = \frac{P^{eol}_{VERT_n}}{\sum_i P_{VERT_i}} \sum P_{ROUGE}$$

$$Q^{eol}_{ROUGE_n} = \frac{Q^{eol}_{VERT_n}}{\sum_i Q_{VERT_i}} \sum Q_{ROUGE}$$

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

4.4 Fonctions de transfert pour les transformateurs

4.4.1 Fonctions de transfert HTB/HTA

Si le transformateur a trois enroulements, il est ramené à deux enroulements :

L'enroulement HTA équivalent a donc pour caractéristiques :

$$R_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \; ; \; L_2 = \frac{L_2 L_3}{L_2 + L_3}$$

Pour assigner à chaque comptage les pertes (dissipées dans les transformateurs) qui lui reviennent, il faudrait connaitre la topologie du réseau à chaque pas d'intégration. Pour des raisons de complexité et vu le faible nombre d'occurrence où ce remplacement de donnée de comptage sera utilisé, cette option n'a pas été retenue. On suppose donc qu'il n'y a qu'un seul transformateur et toute la puissance passe au dans ses enroulements.
Il faut donc appliquer un coefficient complémentaire aux caractéristiques électrotechniques retenues :

$$R_2 = \frac{R_2}{2} \; ; \; L_2 = \frac{L_2}{2} \; ; \; R_1 = \frac{R_1}{2} \; ; \; L_2 = \frac{L_1}{2}$$

Le calcul des pertes donne alors un résultat inférieur à ce que donnerait le calcul réel. Ainsi, le calcul d'une donnée de comptage Rouge manquante donnera une puissance active supérieure à la puissance réelle.

Une fois ces transformations effectuées, le traitement est identique à celui décrit au paragraphe 4.4.2

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

4.4.2 Fonctions de transfert HTA/BT

Le schéma de principe des transformateurs est disponible au paragraphe 3.2.

4.4.2.1 Tensions et courants

V_{2n} est la tension simple BT pour chaque éolienne n
I_{2n} est le courant BT pour chaque éolienne n
$\Delta\varphi_{I_{2n}/V_{2n}}$ est le déphasage entre courant et tension pour chaque éolienne n

La phase de V_{2n} est prise comme référence.

Les relations dans le transformateur de l'éolienne n peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} \underline{U_{1n}} = m(\underline{V_{2n}} - (R_2 + L_2\omega j)\underline{I_{2n}}) - (R_1 + L_1\omega j)\underline{J_{1n}} \\ \underline{J_{1n}} = \dfrac{\underline{I_{2n}}}{m} - \underline{U_{1n}}\left(\dfrac{1}{R_m} + \dfrac{1}{j\omega L_m}\right) \end{cases}$$

Où :

U_{1n} est la tension composée côté HTA pour chaque éolienne n
J_{1n} est le courant de branche côté HTA pour chaque éolienne n

En exprimant I_{1n} en fonction de V_{2n} et I_{2n}, ce système se ramène à :

$$\begin{cases} \underline{J_{1n}}(1 - \left(\dfrac{1}{R_m} + \dfrac{1}{j\omega L_m}\right)(R_1 + L_1\omega j) = \left(\dfrac{1}{m} + m \times (R_2 + L_2\omega j)\left(\dfrac{1}{R_m} + \dfrac{1}{L_m\omega j}\right)\right)\underline{I_{2n}} - m \times \left(\dfrac{1}{R_m} + \dfrac{1}{L_m\omega j}\right)\underline{V_{2n}} \\ \underline{U_{1n}} = m(\underline{V_{2n}} - (R_2 + L_2\omega j)\underline{I_{2n}}) - (R_1 + L_1\omega j)\underline{I_{1n}} \end{cases}$$

Ou encore, en considérant que $R_1 \ll R_m$, $R_1 \ll \omega L_m$, $L_1 \ll L_m$, $\omega L_1 \ll R_m$:

$$\begin{pmatrix} \underline{U_{1n}} \\ \underline{J_{1n}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{w} & \underline{x} \\ \underline{y} & \underline{z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{V_{2n}} \\ \underline{I_{2n}} \end{pmatrix}$$

Avec :

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Description de l'algorithme de détermination de la production d'une éolienne ramenée au point de connexion

$$\begin{cases} \underline{z} = \left[\frac{1}{m} + m \times (R_2 + L_2\omega j)\left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{L_m\omega j}\right)\right] \\ \underline{y} = \left[-m \times \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{L_m\omega j}\right)\right] \\ \underline{w} = \left[m - \underline{y} \times (R_1 + L_1\omega j)\right] \\ \underline{x} = \left[-m \times (R_2 + L_2\omega j) - \underline{z} \times (R_1 + L_1\omega j)\right] \end{cases}$$

Il vient alors, en prenant la partie réelle de ces équations :

$$\begin{cases} U_{1n}(t) = \sqrt{2}\left[\left|\underline{V_{2n}}\right| Re(\underline{w}) + \left|\underline{I_{2n}}\right| Re(\underline{x})\cos(\Delta\varphi_{I_2/V_2}) + \left|\underline{I_{2n}}\right| Im(\underline{x})\sin(\Delta\varphi_{I_2/V_2})\right] \times \cos(\omega t) \\ +\sqrt{2}\left[-\left|\underline{V_{2n}}\right| Im(\underline{w}) + \left|\underline{I_{2n}}\right| Re(\underline{x})\sin(\Delta\varphi_{I_2/V_2}) - \left|\underline{I_{2n}}\right| Im(\underline{x})\cos(\Delta\varphi_{I_2/V_2})\right] \times \sin(\omega t) \\ U_{1n}(t) = A_{VT}\sqrt{2}\cos(\omega t) + B_{VT}\sqrt{2}\sin(\omega t) \\ J_{1n}(t) = \sqrt{2}\left[\left|\underline{V_{2n}}\right| Re\left(\underline{y}\right) + \left|\underline{I_{2n}}\right| Re(\underline{z})\cos(\Delta\varphi_{I_2/V_2}) + \left|\underline{I_{2n}}\right| Im(\underline{z})\sin(\Delta\varphi_{I_2/V_2})\right] \times \cos(\omega t) \\ +\sqrt{2}\left[-V_{2n} Im\left(\underline{y}\right) + \left|\underline{I_{2n}}\right| Re(\underline{z})\sin(\Delta\varphi_{I_2/V_2}) - \left|\underline{I_{2n}}\right| Im(\underline{z})\cos(\Delta\varphi_{I_2/V_2})\right] \times \sin(\omega t) \\ I_{1n}(t) = A_{IT}\sqrt{2}\cos(\omega t) + B_{IT}\sqrt{2}\sin(\omega t) \end{cases}$$

U_{1n} et J_{1n}sont donc déterminés par :

$$\begin{cases} U_{1_n}(t) = U_{1_n}\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \Delta\varphi_{V_{1_n}/V_{2_n}}\right) \quad [V_1] \\ U_{1_n} = \sqrt{A_{VT}^2 + B_{VT}^2} \\ \Delta\varphi_{U_{1_n}/V_{2_n}} = \arctan\left(\frac{B_{VT}}{A_{VT}}\right) \\ J_{1_n}(t) = J_{1_n}\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \Delta\varphi_{J_{1_n}/V_{2_n}}\right) \quad [I_1] \\ J_{1_n} = \sqrt{A_{IT}^2 + B_{IT}^2} \\ \Delta\varphi_{J_{1_n}/V_{2_n}} = \arctan\left(\frac{B_{IT}}{A_{IT}}\right) \end{cases}$$

Reste à relier les déphasages $\Delta\varphi_{J_{1_n}/V_{1_n}}$ et $\Delta\varphi_{I_{1_n}/V_{2_n}}$:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{J_{1n}/U_{1_n}} = \Delta\varphi_{J_{1_n}/V_{2_n}} + \Delta\varphi_{V_{2_n}/U_{1_n}} \\ \quad = \Delta\varphi_{J_{1_n}/V_{2_n}} - \Delta\varphi_{U_{1_n}/V_{2_n}} \end{cases}$$

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Des calculs similaires permettent d'exprimer les tensions et courants BT en fonction des tensions et courant HTA :

$$\begin{pmatrix} V_{2n} \\ \underline{I_{2n}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{a} & \underline{b} \\ \underline{c} & \underline{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{1n} \\ \underline{J_{1n}} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$\begin{cases} \underline{a} = \left[\frac{1}{m} + m \times (R_2 + L_2\omega j)\left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{L_m\omega j}\right)\right] \\ \underline{b} = \left[m(R_2 + L_2\omega j) + \frac{(R_1 + L_1\omega j)}{m}\right] \\ \underline{c} = \left[m \times \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{L_m\omega j}\right)\right] \\ \underline{d} = [m] \end{cases}$$

Remarque : Dans le cas d'une transformation HTB/HTA, l'enroulement HTB est en étoile et l'enroulement HTA est en triangle. Les équations ci-dessus s'appliquent en inversant tensions composées et simples et courants de branche et de ligne.

On calcule alors la tension simple $V_n(t)$ appliquée à l'entrée du câble n, et le courant de ligne $I_n(t)$ injecté par l'éolienne n :

$$\begin{cases} V_n = \frac{U_{1_n}}{\sqrt{3}} \\ \Delta\varphi_{V_n/V_{2_n}} = \Delta\varphi_{U_{1_n}/V_{2_n}} - \frac{\pi}{6} \\ I_n = \sqrt{3} J_{1_n} \\ \Delta\varphi_{I_n/V_n} = \Delta\varphi_{J_{1n}/U_{1_n}} \end{cases}$$

4.4.2.2 Puissances

Pour chaque transformateur on a les relations suivantes, en négligeant la résistance et l'inductance de magnétisation :

$$P_{1_n} = P_{2_n} - 3 \times R_{2_n} \times I_{2_n}^2 - 3 \times R_{1_n} \times J_{1_n}^2$$
$$Q_{1_n} = Q_{2_n} - 3 \times L_{2_n}\,\omega \times I_{2_n}^2 - 3 \times L_{1_n}\,\omega \times J_{1_n}^2$$

Où :
P_{2_n} est la puissance active injectée par l'éolienne n côté BT

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Q_{2_n} est la puissance réactive injectée par l'éolienne n côté BT

P_{1_n} est la puissance active injectée par l'éolienne n côté HTA
Q_{1_n} est la puissance réactive injectée par l'éolienne côté HTA

Remarque : Dans le cas d'une transformation HTB/HTA, l'enroulement HTB est en étoile et l'enroulement HTA est en triangle. Les équations ci-dessus s'appliquent en inversant courants de branche et de ligne.

Une autre méthode équivalente pour exprimer les puissances injectées par les éoliennes côté HTA est d'utiliser directement les tensions et courants calculées au paragraphe 4.4.2.1 :

$$P_{1_n} = 3 \times V_n \times I_n \times \cos\left(\Delta\varphi_{I_n/V_n}\right)$$
$$Q_{1_n} = 3 \times V_n \times I_n \times \sin\left(\Delta\varphi_{I_n/V_n}\right)$$

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

4.4.3 Fonctions de transfert pour les câbles

Le schéma de principe est présenté au paragraphe 3.1

4.4.3.1 Tensions et courant

4.4.3.1.1 Calcul du courant au nœud n

A l'entrée du câble numéro n, en prenant la phase de $\underline{V_n}$ comme référence, on a :

$$\begin{cases} \underline{I_{e_n}} = \underline{I_n} + \underline{I'_{n+1}} \\ \underline{I_{e_n}} = \left[\left|\underline{I_n}\right|\sqrt{2}e^{-j\Delta\varphi_{I_n/V_n}} + \left|\underline{I'_{n+1}}\right|\sqrt{2}e^{-j\Delta\varphi_{I'_{n+1}/V_n}}\right]e^{j\omega t} \\ I_{e_n}(t) = \sqrt{2}\left[\left|\underline{I_n}\right|\cos\left(\Delta\varphi_{I_n/V_n}\right) + \left|\underline{I'_{n+1}}\right|\cos\left(\Delta\varphi_{I'_{n+1}/V_n}\right)\right]\cos(\omega t) \\ +\sqrt{2}\left[\left|\underline{I_n}\right|\sin\left(\Delta\varphi_{I_n/V_n}\right) + \left|\underline{I'_{n+1}}\right|\sin\left(\Delta\varphi_{I'_{n+1}/V_n}\right)\right]\sin(\omega t) \\ I_{e_n}(t) = A_e\sqrt{2}\cos(\omega t) + B_e\sqrt{2}\sin(\omega t) \end{cases}$$

Où :
I_{e_n} est le courant en entrée du câble n
I'_{n+1} est le courant en sortie du câble n+1

I_{e_n} est donc déterminé par :

$$\begin{cases} I_{e_n}(t) = I_{e_n}\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \Delta\varphi_{I_{e_n}/V_n}\right) \\ I_{e_n} = \sqrt{A_e^2 + {B_e}^2} \\ \Delta\varphi_{I_{e_n}/V_n} = \arctan\left(\frac{B_e}{A_e}\right) \end{cases}$$

Au point de jonction d'une fourche, le courant en sortie de fourche est ajouté selon le même principe.

4.4.3.1.2 Calcul dans le câble n

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Description de l'algorithme de détermination de la production d'une éolienne ramenée au point de connexion

On a les relations entre tensions et courants aux bornes de la résistance et des condensateurs modélisés :

$$\begin{cases} \underline{I_{e_n}} - \underline{I_{Cn}} = \dfrac{C_n \omega j}{2} \underline{V_n} \\ \underline{I_{Cn}} - \underline{I'_n} = \dfrac{C_n \omega j}{2} \underline{V'_n} \\ \underline{V_n} - \underline{V'_n} = (R_n + L_n \omega j) \underline{I_{Cn}} \end{cases}$$

Où :
I_{Cn} est le courant traversant l'impédance du modèle en Pi du câble n
V'_n est la tension en sortie de câble n

Et on a de plus :

$$\underline{V'_n} = \underline{V_{n-1}}$$

On exprime I_{Cn} en fonction de I_{e_n} et V_n :

$$\begin{cases} \underline{I_{Cn}} = \underline{I_{e_n}} - \dfrac{C_n \omega j}{2} \underline{V_n} = \left[I_{e_n} \sqrt{2} e^{-j \Delta\varphi_{I_{e_n}/V_n}} - \dfrac{C_n \omega j}{2} V_n \sqrt{2} \right] e^{j\omega t} \\ I_{C_n}(t) = \sqrt{2} \left[I_{e_n} \cos\left(\Delta\varphi_{I_{e_n}/V_n} \right) \right] \cos(\omega t) \\ + \sqrt{2} \left[I_{e_n} \sin\left(\Delta\varphi_{I_{e_n}/V_n} \right) + \dfrac{C_n \omega j}{2} V_n \right] \sin(\omega t) \\ = A_C \sqrt{2} \cos(\omega t) + B_C \sqrt{2} \sin(\omega t) \end{cases}$$

I_{C_n} est donc déterminé par :

$$\begin{cases} I_{C_n}(t) = I_{C_n} \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n} \right) \\ I_{C_n} = \sqrt{A_C^2 + {B_C}^2} \\ \Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n} = \arctan\left(\dfrac{B_C}{A_C} \right) \end{cases}$$

On exprime V'_n en fonction de I_{C_n} et V_n :

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

$$\begin{cases} \underline{V_n'} = \underline{V_n} - (R_n + L_n\omega j)\underline{I_{Cn}} = \left[\left|\underline{V_n}\right|\sqrt{2} - \left|\underline{I_{C_n}}\right|\sqrt{2}(R_n + L_n\omega j)e^{-j\Delta\varphi_{I_{Cn}/V_n}}\right]e^{j\omega t} \\ V_n'(t) = \sqrt{2}\left[V_n - R_n I_{C_n}\cos\left(\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n}\right) - L_n\omega I_{c_n}\sin\left(\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n}\right)\right]\cos(\omega t) \\ +\sqrt{2}\left[-R_n I_{C_n}\sin\left(\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n}\right) + L_n\omega I_{c_n}\cos\left(\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n}\right)\right]\sin(\omega t) \\ = A_V\sqrt{2}\cos(\omega t) + B_V\sqrt{2}\sin(\omega t) \end{cases}$$

V_n' est donc déterminé par :

$$\begin{cases} V_n'(t) = V_n'\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \Delta\varphi_{V_n'/V_n}\right) \\ V_n' = \sqrt{A_V^2 + {B_V}^2} \\ \Delta\varphi_{V_n'/V_n} = \arctan\left(\dfrac{B_V}{A_V}\right) \end{cases}$$

On exprime I_n' en fonction de I_{C_n} et V_n' :

$$\begin{cases} |\underline{I_n'}| = \left|\underline{I_{C_n}}\right| - \dfrac{C_n\omega j}{2}\left|\underline{V_n'}\right| = \left[\left|\underline{I_{C_n}}\right|\sqrt{2}e^{-j\Delta\varphi_{I_{Cn}/V_n'}} - \dfrac{C_n\omega j}{2}\left|\underline{V_n'}\right|\sqrt{2}\right]e^{j\omega t} \\ I_n'(t) = \sqrt{2}\left[\left|\underline{I_{C_n}}\right|\cos\left(\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n'}\right)\right]\cos(\omega t) \\ +\sqrt{2}\left[\left|\underline{I_{C_n}}\right|\sin\left(\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n'}\right) + \dfrac{C_n\omega j}{2}\left|\underline{V_n'}\right|\right]\sin(\omega t) \\ = A_S\sqrt{2}\cos(\omega t) + B_S\sqrt{2}\sin(\omega t) \end{cases}$$

I_n' est donc déterminé par :

$$\begin{cases} I_n'(t) = I_n'\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \Delta\varphi_{I_n'/V_n'}\right) \\ I_n' = \sqrt{A_S^2 + {B_S}^2} \\ \Delta\varphi_{I_n'/V_n'} = \arctan\left(\dfrac{B_S}{A_S}\right) \end{cases}$$

Reste à relier les déphasages $\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n}$ et $\Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n'}$:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n'} = \Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n} + \Delta\varphi_{V_n/V_n'} \\ = \Delta\varphi_{I_{C_n}/V_n} - \Delta\varphi_{V_n'/V_n} \end{cases}$$

4.4.3.2 Puissances

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

Description de l'algorithme de détermination de la production d'une éolienne ramenée au point de connexion

Pour chaque câble on a les relations suivantes :

$$P'_n = 3 \times V'_n \times I'_n \times \cos\left(\Delta\varphi_{I'_n/V'_n}\right) \quad [E_{P_C}]$$

$$Q'_n = 3 \times V'_n \times I'_n \times \sin\left(\Delta\varphi_{I'_n/V'_n}\right) \quad [E_{Q_C}]$$

$$P'_n = P'_{n+1} + P_n - 3 \times R_n \times {I_{Cn}}^2 \quad [E_{P_{C2}}]$$

$$Q'_n = Q'_{n+1} + Q_n - 3 \times L_n\omega \times {I_{Cn}}^2 + 3\frac{C_n\omega}{2}(V_n^2 + V_n'^2) \quad [E_{Q_{C2}}]$$

$$[E_{S_C}]$$

Où :
P'_n est la puissance active en sortie de câble n
Q'_n est la puissance réactive en sortie de câble n
P_n est la puissance active en entrée de câble n
Q_n est la puissance réactive en entrée de câble n

FIN DU DOCUMENT

Copyright RTE. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)