

ETUDE D'UNE EOLIENNE DE GRANDE PUISSANCE

Recommandations générales

- Vérifier que le sujet comporte 17 pages + 2 pages en annexe + 2 pages réponses
- L'épreuve de **l'option A** se compose de 4 parties indépendantes. A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. *Le candidat est donc invité à lire rapidement et entièrement l'énoncé avant de commencer à composer afin de bien répartir le temps de composition entre les différentes parties.*
- Les parties A, B, C et D doivent être rédigées sur des copies séparées en respectant scrupuleusement la numérotation des questions et les notations de l'énoncé. Une rédaction soignée, une écriture lisible et des résultats encadrés seront appréciés par les correcteurs.
- Si au cours de l'épreuve, le candidat détecte ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale par écrit dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant précisément les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

ETUDE D'UNE EOLIENNE DE GRANDE PUISSANCE

Sommaire

SOMMAIRE	2
PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SYSTÈME.....	3
NOTATIONS UTILISÉES.....	6
LISTE DES PRINCIPALES GRANDEURS	6
PARTIE A : ETUDE DE L'ÉOLIENNE.....	8
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	9
CALCUL DE L'ÉNERGIE RÉCUPÉRABLE PAR L'ÉOLIENNE	9
PARTIE B : ETUDE DU FONCTIONNEMENT DE LA GÉNÉRATRICE	10
HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES	10
FONCTIONNEMENT À ROTOR EN COURT – CIRCUIT (SIMPLE ALIMENTATION)	10
FONCTIONNEMENT EN DOUBLE ALIMENTATION.....	11
PARTIE C : LE CONVERTISSEUR STATIQUE AC-AC.....	14
ETUDE DU CONVERTISSEUR	15
PARTIE D : LA COMMANDE DU CONVERTISSEUR STATIQUE	18
L'ONDULEUR 1.....	19
L'ONDULEUR 2.....	20
FIN DU PROBLÈME	20

Présentation générale du système

Eolienne Haute performance NORDEX S77/1500kW

Rotor

Le rotor se compose de trois pales en plastique renforcé de fibres de verre (GFK), d'un moyeu, de couronnes d'orientation et d'entraînements pour le calage des pales.

Train d'entraînement

Le train d'entraînement est composé de l'arbre du rotor, du multiplicateur, d'un couplage élastique à cardan et de la génératrice.

Le multiplicateur

Le multiplicateur est un engrenage planétaire à deux étages avec un étage à roue dentée droite. Le système de refroidissement consiste en un circuit à capacité de refroidissement graduelle.

Génératrice

La génératrice est de type asynchrone à double alimentation. La génératrice est maintenue à une température de fonctionnement optimale grâce au circuit de refroidissement.

Refroidissement et filtration

Le multiplicateur, la génératrice et le convertisseur ont des systèmes de refroidissement actifs indépendants les uns des autres. Le refroidissement du multiplicateur, de la génératrice et du convertisseur s'effectue par un circuit d'eau qui garantit des températures de fonctionnement optimales par n'importe quel temps.

Système de freinage

Trois pales indépendantes, dont le dispositif de commande est double, se calent obliquement à la direction du vent par le système de freinage aérodynamique. De plus, le frein hydraulique à disque assiste le processus de freinage en cas d'arrêt d'urgence.

Orientation

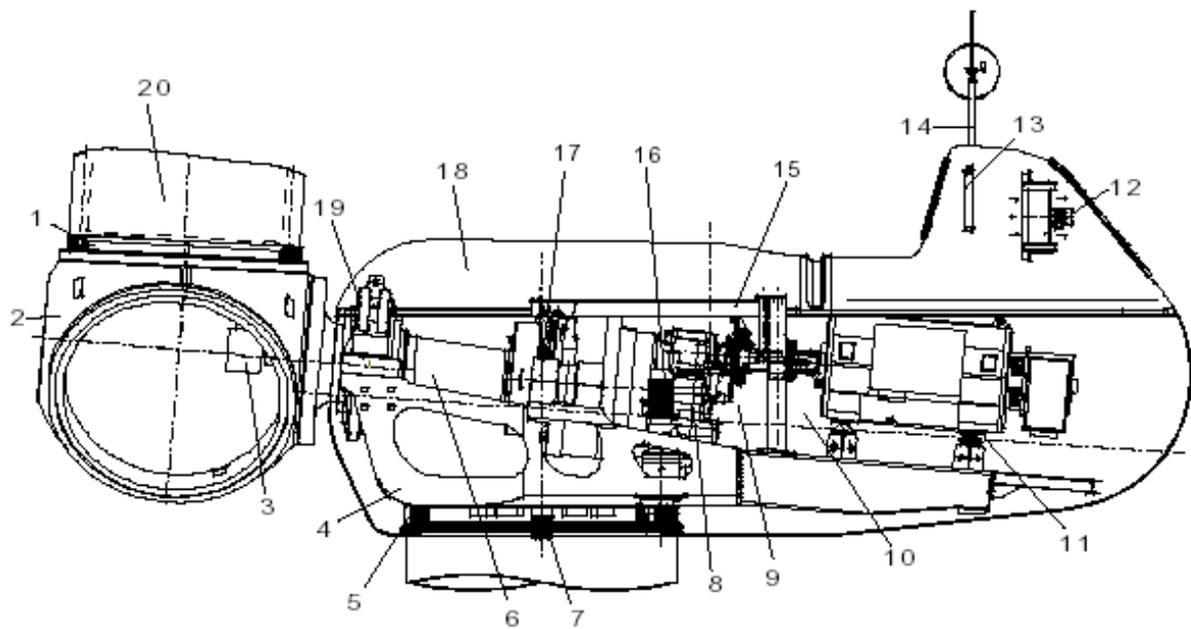
La direction du vent est en permanence mesurée par deux girouettes à hauteur du moyeu. En cas de dépassement par rapport à l'écart admissible, la nacelle est orientée par l'intermédiaire de deux moteurs.

Commande et raccordement au réseau

Les éoliennes sont munies de deux anémomètres. Un anémomètre sert à la commande, le second surveille le premier. Sur un moniteur de contrôle placé dans l'armoire électrique, toutes les données d'exploitation peuvent être contrôlées, et diverses fonctions peuvent être commandées. Les données et signaux pour la surveillance à distance des données sont transmis par liaison RNIS. L'exploitant peut télécharger sur Internet, d'un simple clic de souris, toutes les données significatives de l'éolienne. Le logiciel de communication approprié ainsi que les cartes d'acquisition sont fournis par Nordex.

Caractéristiques :

- Diamètre de rotor : 77 m avec 3pales
- Vitesse de rotation : 9,6 à 17,3 t/mn
- Puissance nominale : 1500 kW (pour un vent de 13 m/s)
- Vent de démarrage : 3 m/s
- Poids 88 000 kg (sans la tour)



- | | | |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 Couronne d'orientation de pale | 8 Multiplicateur | 15 Grue de bord |
| 2 Moyeu de rotor | 9 Frein de sécurité | 16 Entraînement azimutal |
| 3 Entraînement par pitch | 10 Couplage générateur | 17 Roulements du multiplicateur |
| 4 Support de machine | 11 Génératrice | 18 Cabine |
| 5 Roulement azimutal | 12 Radiateur de la génératrice | 19 Palier principal |
| 6 Arbre de rotor | 13 Radiateur du multiplicateur | 20 Pale |
| 7 Freins azimutaux | 14 Mât météo | |



<http://www.nordex-online.com>

Remerciements :

L'auteur remercie la société **Nordex** pour la fourniture des données numériques qui ont permis la réalisation de ce sujet.

Notations utilisées

- lettre minuscule: valeur électrique instantanée
- lettre majuscule soulignée: grandeur complexe (tension, courant, impédance)
- lettre majuscule: valeur constante ou valeur efficace ou module d'une grandeur complexe ($V=|V|$).
- la notation $\langle x \rangle$ désigne la valeur moyenne de la variable x (temporelle) sur une période de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions).
- la notation $\langle x \rangle(\omega t) = X \cdot \sin(\omega t)$ désigne la variation sinusoïdale (d'amplitude X et de pulsation ω) de la valeur moyenne de la variable x sur une période de MLI.
- la notation \hat{X} désigne la valeur crête de la variable.

Liste des principales grandeurs

- $\cos \varphi'$ (déphasage entre i_i' et e_i')
- $\cos \varphi_{1o}$ (déphasage entre I_{1o} et V_s)
- $\cos \varphi_1$ (déphasage entre I_1 et V_s)
- $\cos \varphi_r$ (déphasage entre I_r et V_r)
- C_p le coefficient de puissance tel que la puissance récupérée $P_r = C_p \cdot P_p$
- $E = 1/2 m_a V^2$: énergie cinétique, exprimée en J
- E_r : tension efficace de la fem aux bornes des enroulements rotoriques, exprimée en V
- e_a, e_b et e_c : tensions délivrées par le secondaire du transformateur (a, b, c), exprimés en V
- e_a', e_b' et e_c' : tensions dans le rotor (fem) de la machine asynchrone (a', b', c'), exprimés en V
- f_r : fréquence des courants et des tensions rotoriques, exprimée en Hz.
- f_s : fréquence des courants et des tensions statoriques, exprimée en Hz.
- g : glissement relatif du rotor vis à vis du champ tournant ($g = (ns - n)/ns$)
- i : indice valant a, b ou c
- i' : indice valant a', b' ou c'
- i_a, i_b et i_c : courants dans le secondaire du transformateur (a, b, c), exprimés en A
- i_a', i_b' et i_c' : courants dans le rotor de la machine asynchrone (a', b', c'), exprimés en A
- i_o : courant continu à la sortie de l'onduleur 1, exprimé en A
- i_o' : courant continu à l'entrée de l'onduleur 2, exprimé en A
- I_r : valeur efficace du courant rotorique, exprimé en A
- j : opérateur complexe
- I_{1o} : valeur efficace du courant statorique pour un fonctionnement entraîné à vitesse de synchronisme, exprimé en A
- I_1 : valeur efficace du courant statorique, exprimé en A
- I_2 : valeur efficace du courant rotorique ramené au stator, exprimé en A
- I_c : courant continu dans le collecteur d'un IGBT, exprimé en A
- m : nombre de spires rotoriques par enroulement / nombre de spires statoriques par enroulement
- m_a : masse de l'air se déplaçant à la vitesse V à travers la surface S , exprimée en kg
- n_e, N_e, Ω_e : vitesse du rotor de l'éolienne, exprimée respectivement en t/s, t/mn et en rd/s
- n, N, Ω : vitesse du rotor de la machine asynchrone, exprimée respectivement en t/s, t/mn et en rd/s
- ns, N_s, Ω_s : vitesse du champ tournant de la machine asynchrone exprimée respectivement en t/s, t/mn et en rd/s
- P_m : puissance mécanique fournie par l'éolienne au niveau de l'arbre de la génératrice, exprimée en W

- P_p : puissance éolienne soumise à l'éolienne, exprimée en W
- P_r : puissance récupérée par l'éolienne, exprimée en W
- P_s : puissance électrique au stator, exprimée en W
- P_{UN} : puissance électrique utile nominale, exprimée en W
- Rapport de multiplication de la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne est de : $104,2 = \frac{N}{N_e}$
- R_1 : résistance d'un enroulement statorique, exprimée en Ω
- R_2 : résistance équivalente d'un enroulement rotorique (ramenée au stator), exprimée en Ω
- R_r : résistance d'un enroulement rotorique, exprimée en Ω
- R_{thjc} : résistance thermique jonction-boîtier d'un IGBT, exprimée en $^{\circ}C/W$
- S : surface balayée par l'éolienne, exprimée en m^2
- T_{case} : température du boîtier d'un IGBT, exprimée en $^{\circ}C$
- t_1, t_2, t_3 : temps d'application des configurations en commande vectorielle pour un onduleur, exprimée en s
- T_{MLI} : période de la MLI (à Modulation de Largeur d'Impulsions), exprimée en s
- U_{DC} : tension du bus continu, exprimée en V
- V : vitesse du vent, exprimée en m/s
- V_{CES} : tenue en tension directe collecteur-émetteur avec la tension grille-émetteur nulle d'un IGBT, exprimée en V
- V_{CEsat} : tension directe collecteur-émetteur à l'état saturé d'un IGBT, exprimée en V
- v_{ino} (ou $v_{i'no}$) tension entre le point i (a, b, c) (ou i' (a', b', c')) et no (potentiel milieu de la source continue), exprimée en V
- v_{in} (ou $v_{i'n}$) tension entre le point i (a, b, c) (ou i' (a', b', c')) et n (potentiel milieu de la source continue), exprimée en V
- v_{nno} (ou $v_{n'no}$) tension entre le point n (ou i' n') et no (potentiel milieu de la source continue), exprimée en V
- V_o : demi-tension de l'alimentation continue de l'onduleur, exprimée en V
- V_r : tension efficace aux bornes des enroulements rotoriques, exprimée en V
- V_s : tension efficace secteur basse tension, exprimée en V
- V_x : tension aux bornes de X, exprimée en V
- X : inductance magnétisante à 50Hz, exprimée en Ω

- α_i : rapport cyclique de la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) de la phase i
- λ : inductances de fuites du transformateur et λ' inductances de fuites du rotor de la machine asynchrone, exprimées en H
- φ : déphasage entre le courant et la tension
- δ : masse volumique de l'air ($1,225kg/m^3$)
- ω : pulsation des courants et des tensions, exprimée en rd/s

Partie A : Etude de l'éolienne

La structure de la chaîne cinématique est composée du moteur électrique + d'un multiplicateur mécanique à pignons + 3 pales

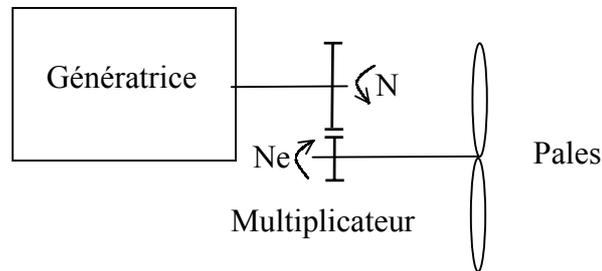


Figure A.1

- Masse d'une pale : $m_e = 6500 \text{ kg}$
- Rapport de multiplication de la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne est de : $104,2 = N/N_e$
- La loi puissance récupérée par les 3 pales en fonction de la vitesse du vent est donnée par la figure A.2 (le rendement du multiplicateur et de la génératrice ne sont pris en compte dans cette figure).

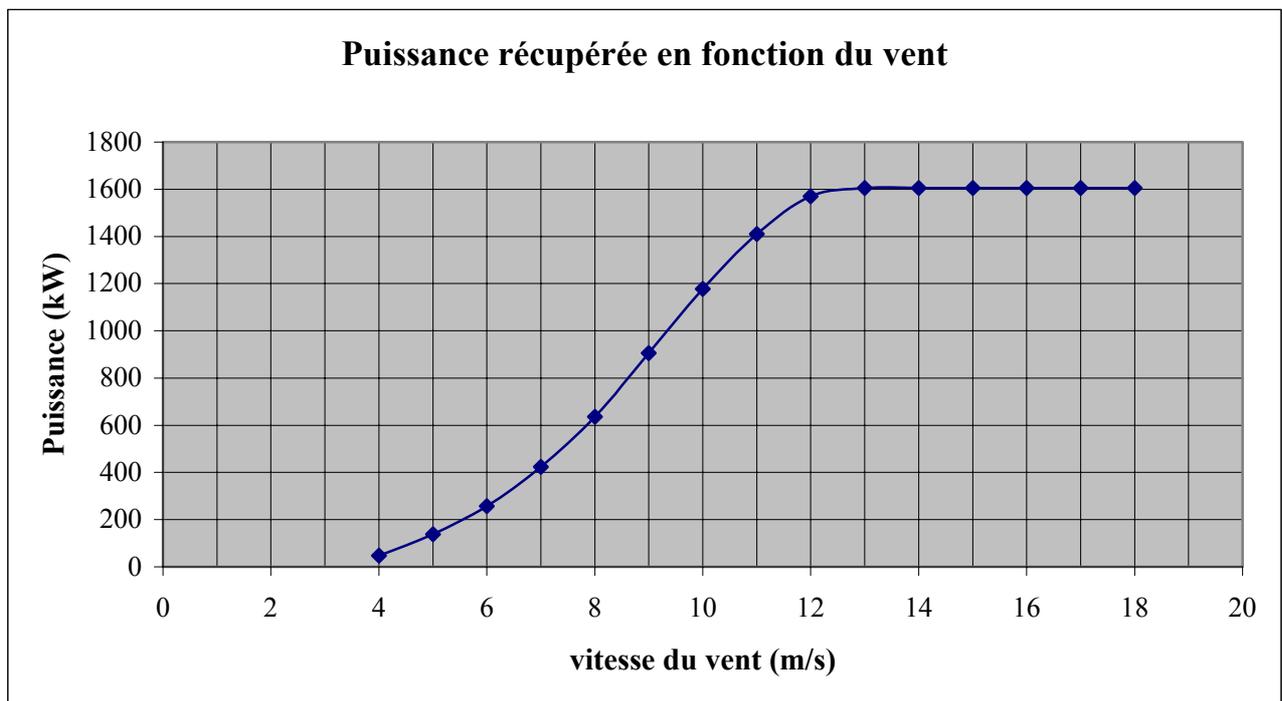


Figure A.2

Vitesse du vent V (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Puissance Pr (kW)	47	138	257	424	636	905	1177	1410	1570	1605	1605	1605	1605	1605	1605

Principe de fonctionnement

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique de l'air.

$$E = \frac{1}{2} m_a \cdot V^2$$

avec V la vitesse du vent (m/s) et m_a la masse de l'air se déplaçant à la vitesse V à travers la surface (S) balayée par l'éolienne.

Q.A.1. Soit δ la masse volumique de l'air ($1,225 \text{ kg/m}^3$), exprimer la masse m_a passant dans la section (S) balayée par l'éolienne (dépend du temps t)

Q.A.2. Ainsi, exprimer l'énergie cinétique de cette masse m_a vue de l'éolienne en fonction de δ , S , V et t

Q.A.3. A partir de l'énergie cinétique de la masse m_a de l'air, exprimer la puissance éolienne P_p soumise à l'éolienne

Q.A.4. Le rendement de l'éolienne n'est pas égal à 1. On définit le coefficient de puissance C_p tel que la puissance récupérée $P_r = C_p \cdot P_p$

D'après la caractéristique du constructeur, tracer sur le document réponse **REP.A.1.** la variation de C_p en fonction de V (la vitesse du vent)

Calcul de l'énergie récupérable par l'éolienne

Chacun sait que le vent n'est pas une source d'énergie constante et permanente. Selon le site où l'éolienne est implantée, elle permet de fournir plus ou moins d'énergie pour un temps donné.

On se propose de calculer l'énergie récupérée par cette éolienne sur le site de Pierrelatte (vallée du Rhône) pendant une année.

Pour cela il est nécessaire de connaître l'histogramme de la vitesse du vent pour ce site. La figure A.3 suivante donne cet histogramme.

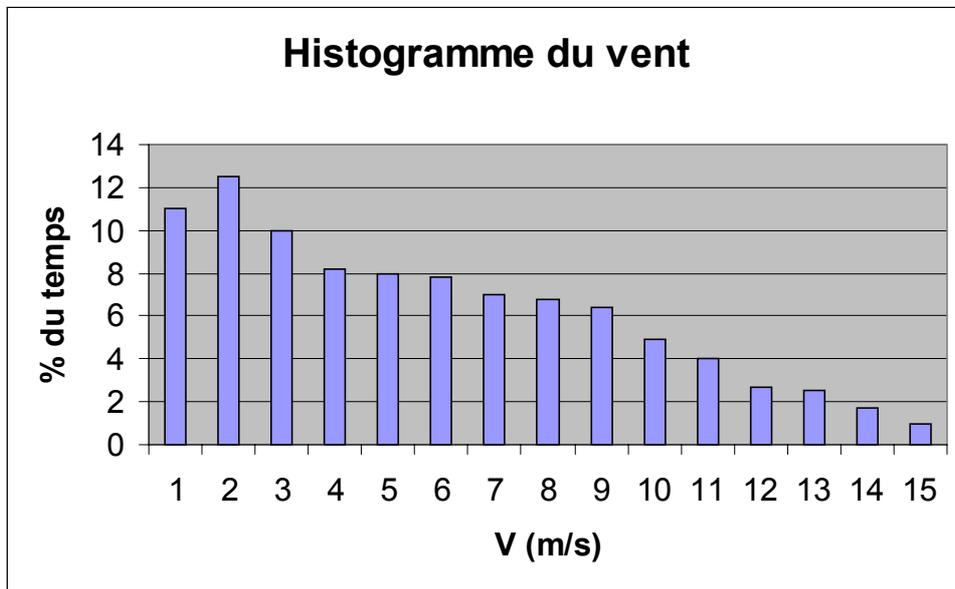


Figure A.3

% du temps	11	12,5	10	8,2	8	7,8	7	6,8	6,6	5	4,1	2,9	2,5	1,7	1
V (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Q.A.5 Calculer l'énergie récupérable par cette éolienne sur le site de Pierrelatte pour une année (365j)

Partie B : Etude du fonctionnement de la génératrice

Hypothèses simplificatrices

- Pour simplifier l'étude analytique, les pertes mécaniques et les pertes fer de la machine seront supposées négligeables.
- Pour les pertes mécaniques du multiplicateur de vitesse, on considérera le rendement de cet ensemble constant et égal à 98 %.

Fonctionnement à rotor en court – circuit (simple alimentation)

Caractéristiques électriques de la machine asynchrone

Ces caractéristiques sont définies par le constructeur lorsque la machine asynchrone fonctionne en génératrice (convention génératrice).

- 4 pôles, rotor bobiné en court-circuit, couplage étoile des enroulements statoriques
- puissance électrique nominale : $P_{UN}=1500$ kW

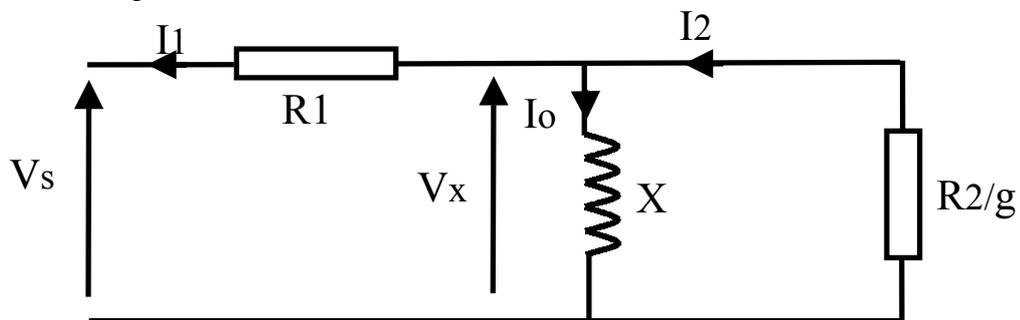


Figure B.1 : Schéma équivalent simplifié par enroulement de la machine asynchrone en fonctionnement génératrice en régime permanent ($g < 0$) rotor en court-circuit.

Avec

- $R_1 = 0,0031\Omega$: résistance d'un enroulement statorique
- $X = 1\Omega$: inductance magnétisante à 50Hz
- $R_2 = 0,003\Omega$: résistance équivalente d'un enroulement rotorique (ramenée au stator)
- g : glissement relatif du rotor vis à vis du champ tournant ($g = (n_s - n)/n_s$)
- la puissance dans R_2/g représente la puissance transmise du rotor vers le stator

$$V_s = 400V - 50 Hz$$

- Q.B.1.** Pour le fonctionnement entraîné à vitesse de synchronisme, calculer la valeur efficace du courant statorique I_{1o}
- Q.B.2.** Pour le fonctionnement entraîné à vitesse de synchronisme, calculer la valeur du $\cos \varphi_{1o}$ (déphasage entre I_{1o} et V_s)
- Q.B.3.** Pour le fonctionnement nominal (puissance utile = 1500kW), calculer la valeur efficace du courant statorique I_1 , sachant que pour ce schéma simplifié $\cos \varphi_1 = 0,9507$
- Q.B.4.** Pour le fonctionnement nominal, calculer la valeur efficace de la tension V_x
- Q.B.5.** Pour le fonctionnement nominal, calculer la valeur de g
- Q.B.6.** Pour le fonctionnement nominal, en déduire la vitesse de rotation de la génératrice (t/mn)
- Q.B.7.** En déduire la plage de vitesse de rotation du rotor de l'éolienne lorsque la valeur du glissement varie de $g=0$ à la valeur de g nominal
- Q.B.8.** Calculer le couple au niveau du rotor de l'éolienne lorsque la puissance électrique est nominale ($P_{UN}=1500kW$)

Fonctionnement en double alimentation

Le rotor de la machine asynchrone est maintenant connecté à une source triphasée (convertisseur statique AC – AC) qui permet d'imposer une amplitude de tension et une fréquence (f_r) aux enroulements du rotor. Le schéma de principe est donné par la figure B.2.

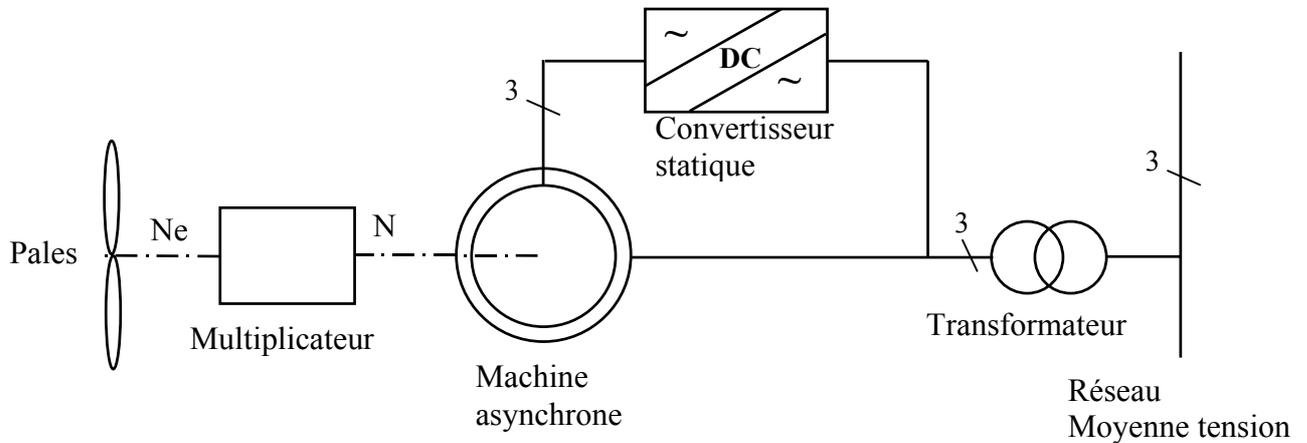


Figure B.2

Pour l'étude de la machine asynchrone, la figure B.3 donne un schéma simplifié, valable en régime permanent, d'un enroulement statorique (couplage étoile) et d'un enroulement rotorique (couplage étoile). La puissance mécanique n'est pas représentée dans ce schéma.

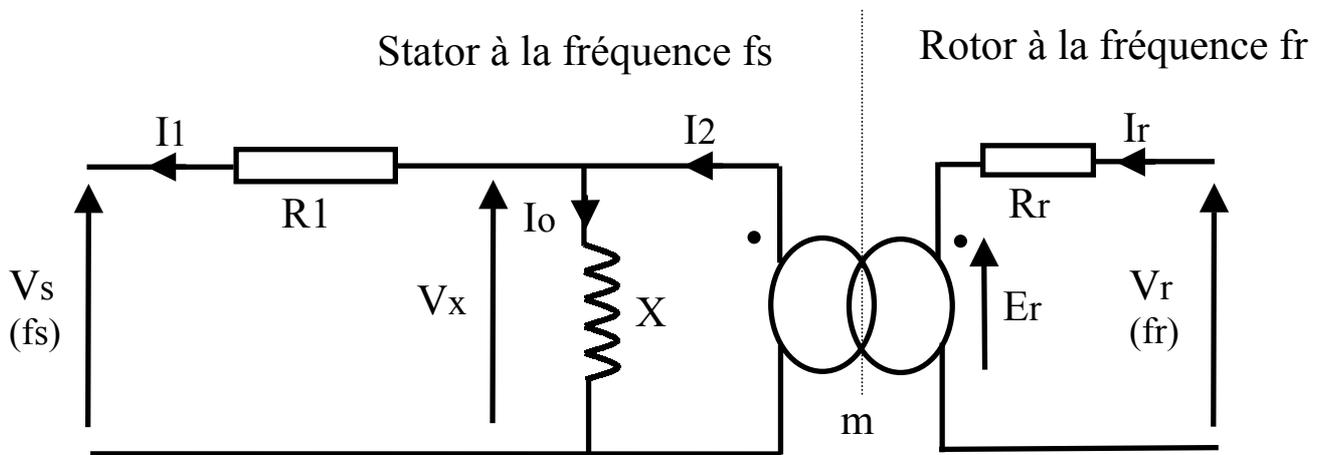


Figure B.3 : Schéma électrique simplifié par enroulement de la machine asynchrone en fonctionnement génératrice en régime permanent ($g < 0$) avec une double alimentation.

Avec

- $R_1 = 0,0031\Omega$: résistance d'un enroulement statorique
- $X = 1\Omega$: inductance magnétisante
- R_r : résistance d'un enroulement rotorique

 : circuit magnétique couplé entre les enroulements statoriques et rotoriques avec un rapport de nombre de spires m (nombre de spires rotoriques par enroulement / nombre de spires statoriques par enroulement)

$$V_s = 400V - 50 Hz$$

Etude générale

Attention aux signes, sachant que les valeurs efficaces et les fréquences sont toujours positives.

- Q.B.9.** Pour un fonctionnement à vitesse lentement variable de la machine asynchrone, donner l'expression littérale de la valeur efficace de E_r en fonction de V_x , m et g
- Q.B.10.** Calculer le rapport m tel que $E_r = V_x$ pour une vitesse de 900 t/mn
- Q.B.11.** Pour un fonctionnement à vitesse lentement variable de la machine asynchrone entre 1000 et 1800t/mn, tracer sur le document réponse **REP.B.1**, la tension efficace E_r en fonction de la vitesse de la machine asynchrone (on supposera la chute de tension dans R_1 négligeable et donc $V_x=400V$)
- Q.B.12.** Pour un fonctionnement à vitesse lentement variable de la machine asynchrone, donner l'expression littérale de f_r en fonction de f_s et g
- Q.B.13.** Pour un fonctionnement à vitesse variable de la machine asynchrone entre 1000 et 1800t/mn, tracer sur le document réponse **REP.B.1**, la valeur numérique de la fréquence rotorique f_r en fonction de la vitesse de la machine asynchrone
- Q.B.14.** Pour les vitesses 1200 et 1800 t/mn, la valeur efficace de E_r et la fréquence f_r sont identiques. Quelle différence peut-on noter sur les tensions délivrées par le convertisseur statique permettant de distinguer ces deux fonctionnements
- Q.B.15.** Sachant que R_2 est la valeur de R_r ramenée au stator, calculer R_r

Pour la suite du problème, indépendamment des réponses aux questions **Q.B.10** et **Q.B.15**, prendre $m = 2,6$ et $R_r = 0,02 \Omega$.

Pour réduire l'amplitude du courant dans le transformateur et dans la ligne moyenne tension, on magnétise la machine asynchrone par l'alimentation du rotor.

- Q.B.16.** Pour le fonctionnement sans échange de puissance statorique ($I_1 = 0$), calculer le courant I_r
- Q.B.17.** Pour le fonctionnement sans échange de puissance statorique ($I_1 = 0$) et pour une vitesse de 1000t/mn, calculer la valeur numérique de V_r

Fonctionnement nominal :

Puissance mécanique fournie par l'éolienne au niveau de l'arbre de la génératrice vaut $P_m = 1572kW$, pour une vitesse de 1800t/mn.

- Q.B.18.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer le couple électromagnétique de la machine asynchrone
- Q.B.19.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance transmise par le champ tournant
- Q.B.20.** Pour ce fonctionnement nominal, avec $\cos \phi_1 = 1$, calculer la valeur numérique de I_1
- Q.B.21.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance électrique P_s au stator
- Q.B.22.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer les pertes Joule statoriques
- Q.B.23.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la tension V_x
- Q.B.24.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la valeur numérique de I_2
- Q.B.25.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer les pertes Joule rotoriques

- Q.B.26.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?
- Q.B.27.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance à l'entrée du transformateur (coté basse tension), en considérant le rendement du convertisseur AC-AC égal à 99%
- Q.B.28.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la fréquence de l'alimentation rotorique
- Q.B.29.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la valeur numérique de E_r
- Q.B.30.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la puissance réactive mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?
- Q.B.31.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer le $\cos \varphi_r$ entre V_r et I_r
- Q.B.32.** Pour ce fonctionnement nominal, calculer la valeur numérique de V_r

Fonctionnement à puissance réduite :

Puissance mécanique fournie par l'éolienne au niveau de l'arbre de la génératrice vaut $P_m = 250\text{kW}$, pour une vitesse de 1200t/mn.

- Q.B.33.** Pour ce fonctionnement, calculer le couple électromagnétique de la machine asynchrone
- Q.B.34.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance transmise par le champ tournant
- Q.B.35.** Pour ce fonctionnement, avec $\cos \varphi_1 = 1$, calculer la valeur numérique de I_1
- Q.B.36.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance électrique P_s au stator
- Q.B.37.** Pour ce fonctionnement, calculer les pertes Joule statoriques
- Q.B.38.** Pour ce fonctionnement, calculer la tension V_x
- Q.B.39.** Pour ce fonctionnement, calculer la valeur numérique de I_2
- Q.B.40.** Pour ce fonctionnement, calculer les pertes Joule rotoriques
- Q.B.41.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?
- Q.B.42.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance à l'entrée du transformateur (en considérant le rendement du convertisseur AC-AC égal à 99%)
- Q.B.43.** Pour ce fonctionnement, calculer la valeur numérique de E_r
- Q.B.44.** Pour ce fonctionnement, calculer la puissance réactive mise en jeu avec l'alimentation du rotor. Est-elle fournie ou absorbée par le convertisseur statique ?
- Q.B.45.** Pour ce fonctionnement, calculer le $\cos \varphi_r$ entre V_r et I_r
- Q.B.46.** Pour ce fonctionnement, calculer la valeur numérique de V_r

Partie C : Le convertisseur statique AC-AC

Le convertisseur statique est constitué de 2 onduleurs à MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) AC-DC avec la partie DC commune (tension continue $2.V_0$). Le schéma du convertisseur est donné par la figure C.1 où les notations et conventions de signe sont définies (*lettre minuscule : valeur électrique instantanée*).

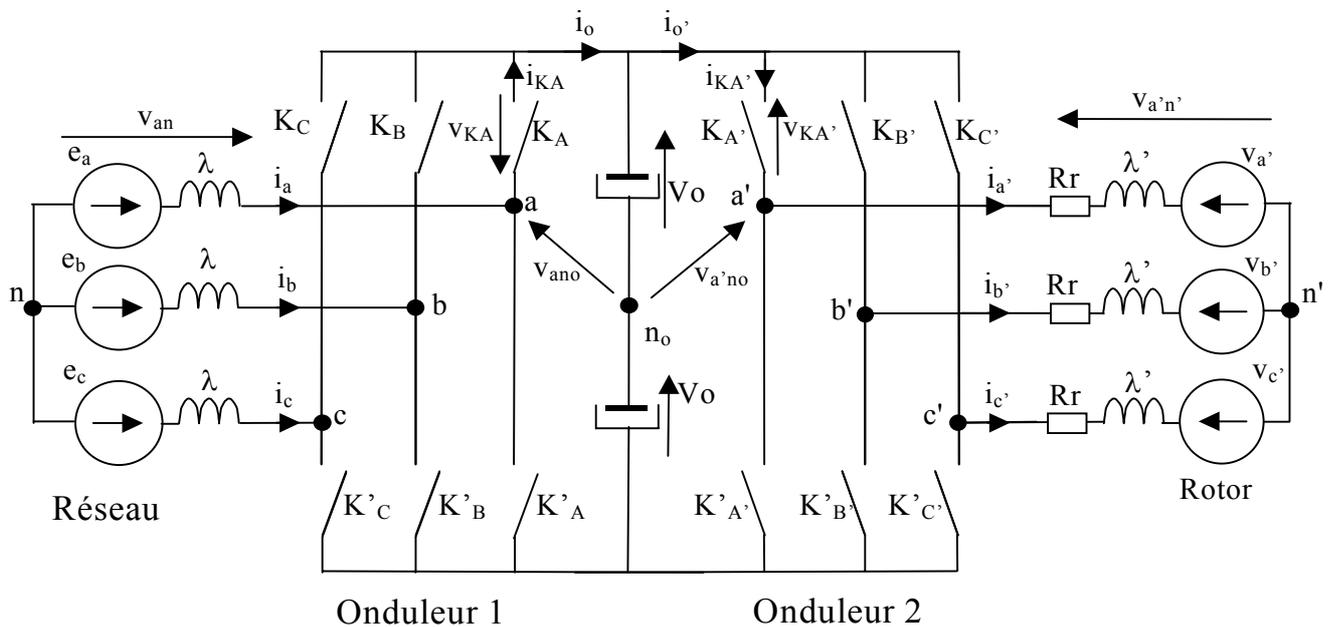


figure C.1

Ce convertisseur comprend 6 bras dont chaque interrupteur est composé d'un IGBT avec une diode de roue libre.

Pour l'étude qui suit, on considérera que :

- Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.
- les courants (i_a, i_b, i_c) et (i_a', i_b', i_c') sont parfaitement sinusoïdaux et d'amplitude crête \hat{I} et \hat{I}' .

- le système triphasé (e_a, e_b, e_c) représente le réseau avec une valeur efficace constante égale à 400V (tension simple) et une fréquence de 50Hz.
- le système triphasé $(e_{a'}, e_{b'}, e_{c'})$ représente la tension aux bornes du rotor avec une valeur efficace et une fréquence variables. Les courants rotoriques $(i_{a'}, i_{b'}, i_{c'})$ varient, en valeur efficace, entre 150 et 430A, avec un déphasage variable tel que le $\cos \varphi'$ peut être positif ou négatif selon le fonctionnement de l'éolienne.
- Les sources (e_a, e_b, e_c) (liées à l'onduleur 1) sont représentées avec la convention générateur et les sources $(e_{a'}, e_{b'}, e_{c'})$ (liées à l'onduleur 2) sont représentées avec la convention récepteur.
- λ inductances de fuites du transformateur et λ' inductances de fuites du rotor de la machine asynchrone.
- R_r résistances des enroulements rotoriques de la machine asynchrone.

Etude du convertisseur

Chaque interrupteur électronique est repéré par un symbole (K_A, K'_A, K_B, \dots), le même symbole désigne aussi sa variable logique de commande ($K_A=1$ signifie que l'interrupteur K_A est fermé et $K_A=0$ signifie que l'interrupteur K_A est ouvert). On a toujours une commande complémentaire pour chaque bras ($K_A \neq K'_A, K_B \neq K'_B, \dots$).

La commande MLI (à Modulation de Largeur d'Impulsions) permet de délivrer une tension (v_{ino}) (ou $v_{i'no}$) entre le point i (a, b, c) (ou i' (a', b', c')) et no (potentiel milieu des sources continues) ayant la forme représentée par la figure C.2.

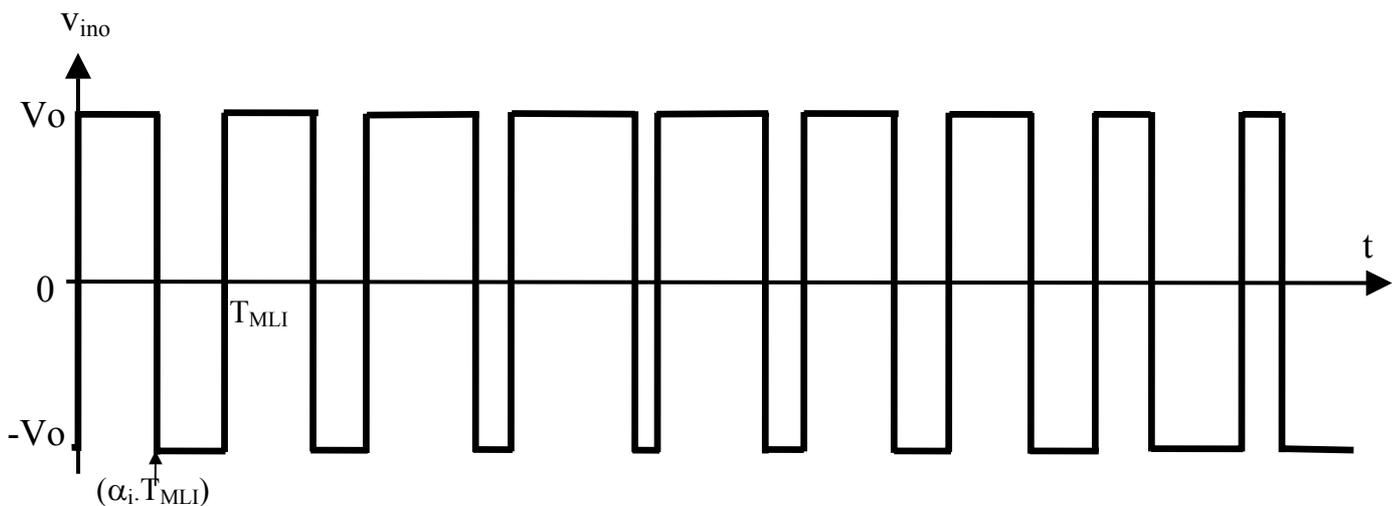


Figure C.2

- *Notation* : $\langle x \rangle$ désigne la valeur moyenne de la variable x (temporelle) sur une période de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions).

La façon d'obtenir la commande des interrupteurs ne sera pas abordée dans ce sujet.

On considère, pour les premières questions, que c'est la stratégie de **commande à MLI simple** qui est utilisée pour les deux onduleurs. C'est à dire la tension $\langle v_{nno} \rangle$ (et $\langle v_{n'no} \rangle$) vis à vis de T_{MLI} vaut zéro.

Pour les 8 premières questions, les résistances R_r sont négligées ($R_r = 0$).

Q.C.1. Pour l'onduleur 1, exprimer de façon littérale la relation entre V_{ino} , V_{in} et V_{nno} ($i=a, b$ ou c)

- Q.C.2.** Sachant que $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, exprimer de façon littérale la relation de v_{nno} en fonction de v_{ano} , v_{bno} , v_{cno}
- Q.C.3.** Exprimer de façon littérale les relations de v_{an} , v_{bn} , v_{cn} en fonction de v_{ano} , v_{bno} , v_{cno}
- Q.C.4.** Exprimer $\langle v_{ino} \rangle$ en fonction de α_i et de V_o
- Q.C.5.** A partir de Q.C.1 et sachant que $\langle v_{nno} \rangle = 0$, donner la relation entre $\langle v_{in} \rangle$ et $\langle v_{ino} \rangle$
- Q.C.6.** On désire que $\langle v_{in} \rangle$ varie de façon sinusoïdale à la fréquence 50 Hz, c'est à dire $\langle v_{in} \rangle(\omega t) = v \cdot \sin(\omega t)$. Exprimer de façon littérale la relation de α_i en fonction de v et de V_o
- Q.C.7.** Calculer la valeur de V_o , lorsque que α_{i_max} vaut 1 et que V_{in} ($\langle v_{in} \rangle(\omega t)$ efficace) vaut 400V (en négligeant la chute de tension aux bornes des inductances λ pour la fréquence de 50 Hz),
- Q.C.8.** Quelle est l'utilité des inductances λ et λ' ?

En pratique, c'est la commande MLI avec $\langle v_{nno} \rangle \neq 0$ qui est utilisée, ce qui correspond à une tension continue valant la tension composée crête du réseau $\sqrt{3} \cdot 400 \cdot \sqrt{2} = 2V_o = 980V$ (en négligeant la chute de tension aux bornes des inductances λ pour la fréquence de 50 Hz).
 les courants (i_a, i_b, i_c) dans le secteur ont une amplitude crête \hat{I} de 280 A avec un $\cos \varphi = -1$ pour le fonctionnement nominal de l'éolienne.
 les courants (i_a', i_b', i_c') dans le rotor de la machine asynchrone ont une amplitude crête \hat{I}' de 600 A avec un $\cos \varphi = -0,94$ pour le fonctionnement nominal de l'éolienne.

Définitions des composants de puissance

- Q.C.9.** Pour l'onduleur 1, définir pour l'interrupteur K_A le sens de l'IGBT et de la diode en respectant les notations
- Q.C.10.** Pour l'onduleur 2, définir pour l'interrupteur $K_{A'}$ le sens de l'IGBT et de la diode en respectant les notations
- Q.C.11.** A partir des données numériques, donner les contraintes maximales que subissent la diode et l'IGBT (courant et tension instantanés) de l'interrupteur K_A
- Q.C.12.** A partir des données numériques, donner les contraintes maximales que subissent la diode et l'IGBT (courant et tension instantanés) de l'interrupteur $K_{A'}$
- Q.C.13.** Calculer le courant moyen dans l'IGBT de l'interrupteur K_A , en considérant qu'une alternance complète du courant i_i passe dans l'IGBT (pour maximiser le courant dans l'IGBT)
- Q.C.14.** Calculer le courant moyen dans l'IGBT de l'interrupteur $K_{A'}$, en considérant qu'une alternance complète du courant i_i' passe dans l'IGBT (pour maximiser le courant dans l'IGBT)
- Q.C.15.** A l'aide des questions **Q.C.11** et **Q.C.13**, choisir dans la documentation jointe, **en annexe**, le module IGBT adapté pour l'onduleur 1 en expliquant les critères de choix et en prenant un IGBT ayant un calibre de courant 50% plus important que le courant moyen calculé dans la question **Q.C.13** pour prendre en compte que le courant n'est pas continu en permanence. Avec :
- V_{CES} : tenue en tension directe collecteur-émetteur avec la tension grille-émetteur nulle
 - I_c : courant continu dans le collecteur
 - V_{CESat} : tension directe collecteur-émetteur à l'état saturé
 - R_{thjc} : résistance thermique jonction-boîtier
 - T_{case} : température du boîtier
- Q.C.16.** A l'aide des questions **Q.C.12** et **Q.C.14**, choisir dans la documentation jointe, **en annexe**, le module IGBT adapté pour l'onduleur 2 en expliquant les critères de choix et en

prenant un IGBT ayant un calibre de courant 50% plus important que le courant moyen calculé dans la question **Q.C.14** pour prendre en compte que le courant n'est pas continu en permanence.

Q.C.17. Préciser les origines des pertes dans le convertisseur en précisant les facteurs influants sur ces pertes

Partie D : La commande du convertisseur statique

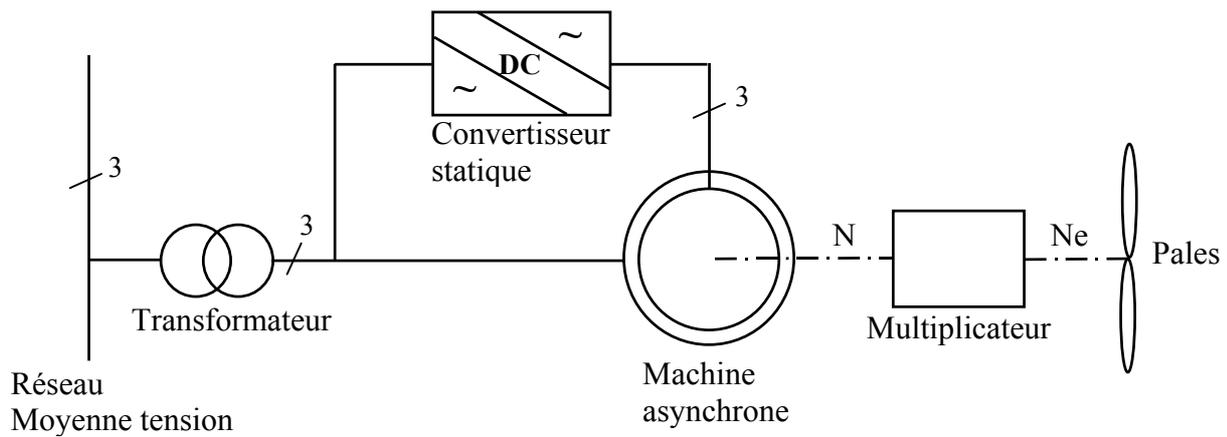


Figure D.1

Le convertisseur statique est constitué de 2 onduleurs à MLI : Onduleur 1 coté réseau et onduleur 2 coté rotor. Dans cette partie on s'intéresse à la commande des deux onduleurs.

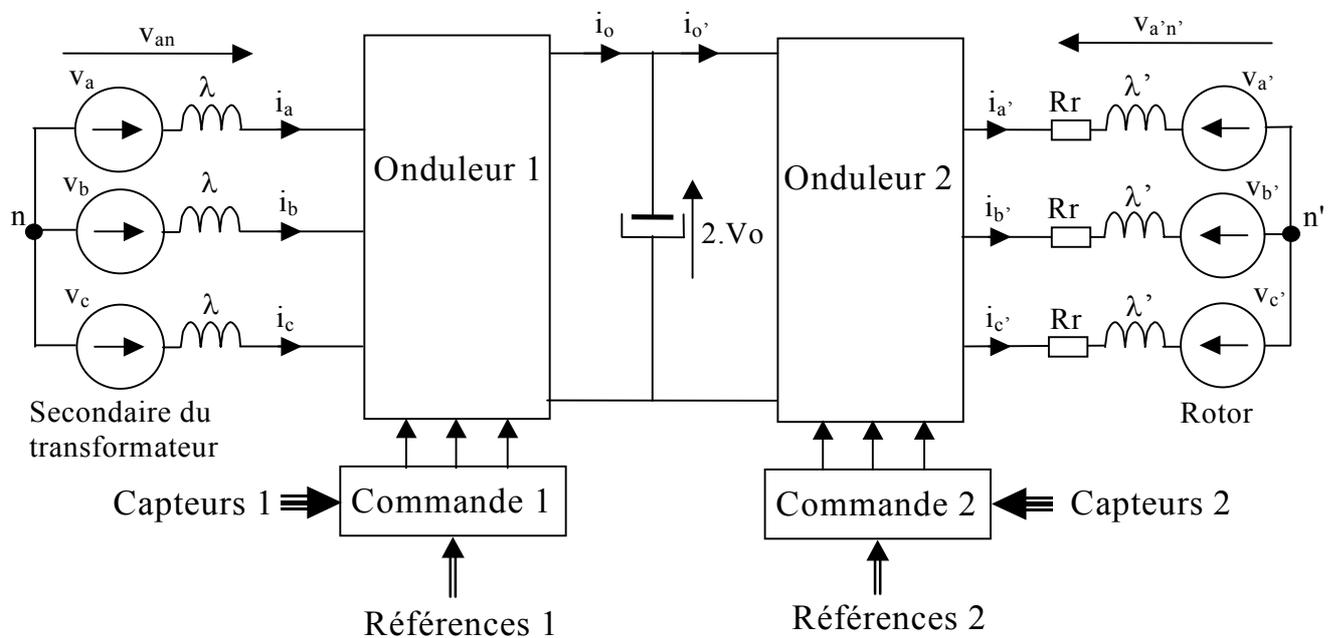


Figure D.2

l'onduleur 1

La stratégie de commande de l'onduleur 1 est multiple. Sa première fonction est d'assurer le transfert de l'énergie entre le rotor de la machine asynchrone et le réseau. Ce transfert est bidirectionnel (du réseau vers le rotor ou l'inverse) avec des courants de forme sinusoïdale et avec aucun échange de puissance réactive avec le réseau pour minimiser l'amplitude des courants (i_a, i_b, i_c). Sa deuxième fonction est de réguler la tension du bus continu à $2V_o$ égale à 980V.

La commande de cet onduleur est donc organisée en deux boucles de régulation cascade. La première boucle (boucle la plus interne) assure la forme sinusoïdale des courants (i_a, i_b, i_c) avec aucun échange de puissance réactive avec le réseau. La deuxième boucle assure la régulation de la tension du bus continu à $2V_o$.

- Q.D.1.** Proposer un schéma de régulation de la deuxième boucle d'asservissement (régulation de la tension du bus continu) en spécifiant bien la nature et le lieu du capteur à utiliser. Préciser comment est générée la référence (la définition et le calcul du correcteur ne sont pas à définir)
- Q.D.2.** Quelle est la grandeur physique représentée par la sortie du régulateur ?
- Q.D.3.** Le capteur utilisé nécessite-t-il une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie ? justifier votre réponse
- Q.D.4.** Proposer un schéma de régulation de la première boucle d'asservissement (forme sinusoïdale des courants) en spécifiant bien la nature et le lieu des capteurs à utiliser, sans ce préoccuper, pour cette question, de la génération des références (la définition et le calcul des correcteurs ne sont pas à définir)
- Q.D.5.** Quelle est la grandeur physique représentée par la sortie des régulateurs ?
- Q.D.6.** Les capteurs utilisés nécessitent-ils une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie ? justifier votre réponse
- Q.D.7.** Décrire le principe de fonctionnement d'un des capteurs le plus couramment utilisé pour ce genre d'application
- Q.D.8.** Proposer un schéma pour relier les deux boucles de régulation, en se préoccupant, pour cette question, de la génération des références de la boucle la plus interne

l'onduleur 2

La stratégie de commande de l'onduleur 2 est différente. Sa fonction est de délivrer un système de tensions triphasées avec une amplitude et une fréquence qui dépendent du fonctionnement de l'éolienne, avec des courants (i_a , i_b , i_c) de forme sinusoïdale et un $\cos \varphi$ qui est variable (>0 ou <0). L'onduleur 2 fournit la totalité du courant magnétisant de la machine asynchrone (magnétisation de la machine asynchrone par les bobinages du rotor) et fait transiter de la puissance active entre le réseau et les bobinages du rotor.

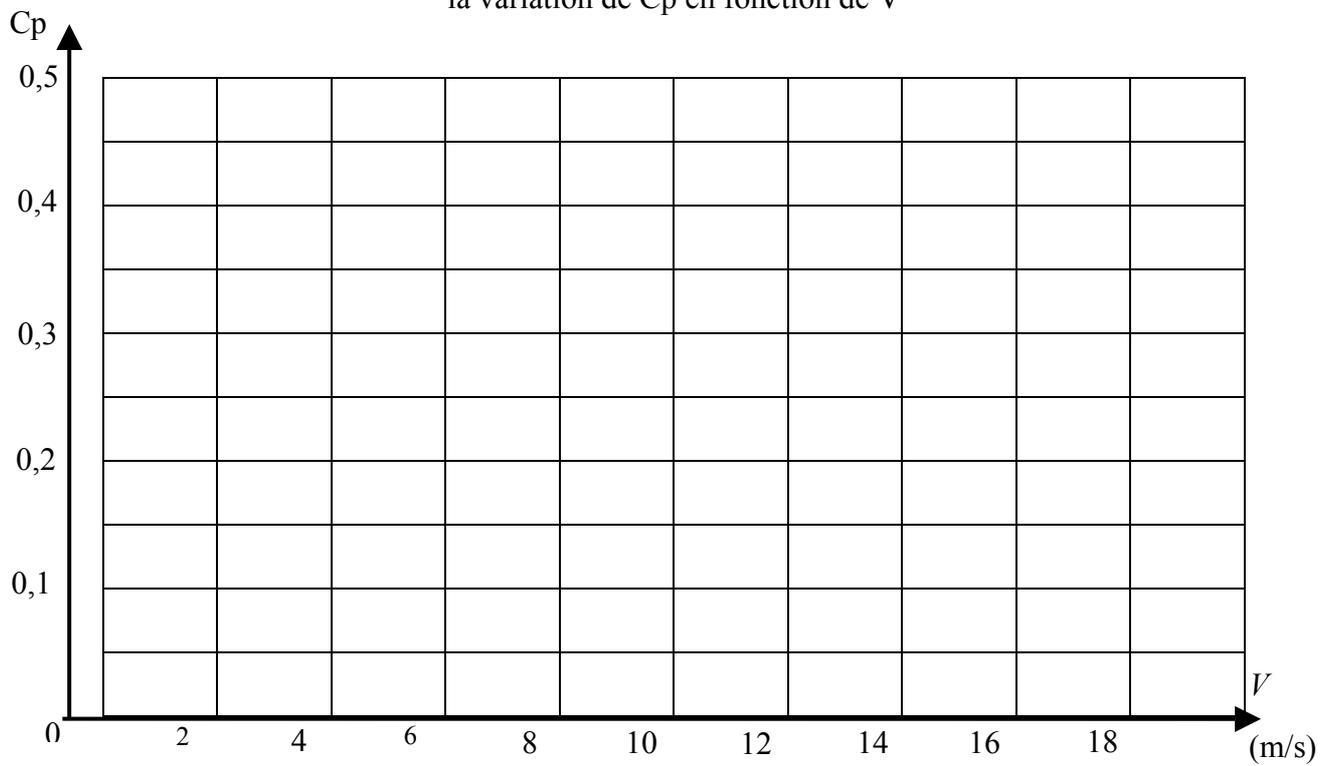
- Q.D.9.** Pour une vitesse de rotation donnée, quelle grandeur électrique agit directement sur l'amplitude du courant magnétisant au rotor de la machine.
- Q.D.10.** Que se passe-t-il si cette grandeur a une amplitude trop petite ?
- Q.D.11.** Que se passe-t-il si cette grandeur a une amplitude trop grande ?
- Q.D.12.** On désire que la magnétisation de la machine asynchrone se fasse uniquement par le rotor. Proposer un schéma de régulation en spécifiant bien la référence et la nature et le lieu du capteur (la définition et le calcul du correcteur ne sont pas à définir). La grandeur électrique de la question **Q.D.9** représente la sortie de ce régulateur
- Q.D.13.** La sortie du régulateur de la question **Q.D.12** est-elle modifiée lors d'un changement de vitesse de l'éolienne ? Justifier votre réponse
- Q.D.14.** Quelle grandeur de réglage permet d'agir directement sur la vitesse de l'éolienne ?

Fin du problème

Document réponse REP.A.1

Question Q.A.4

la variation de C_p en fonction de V

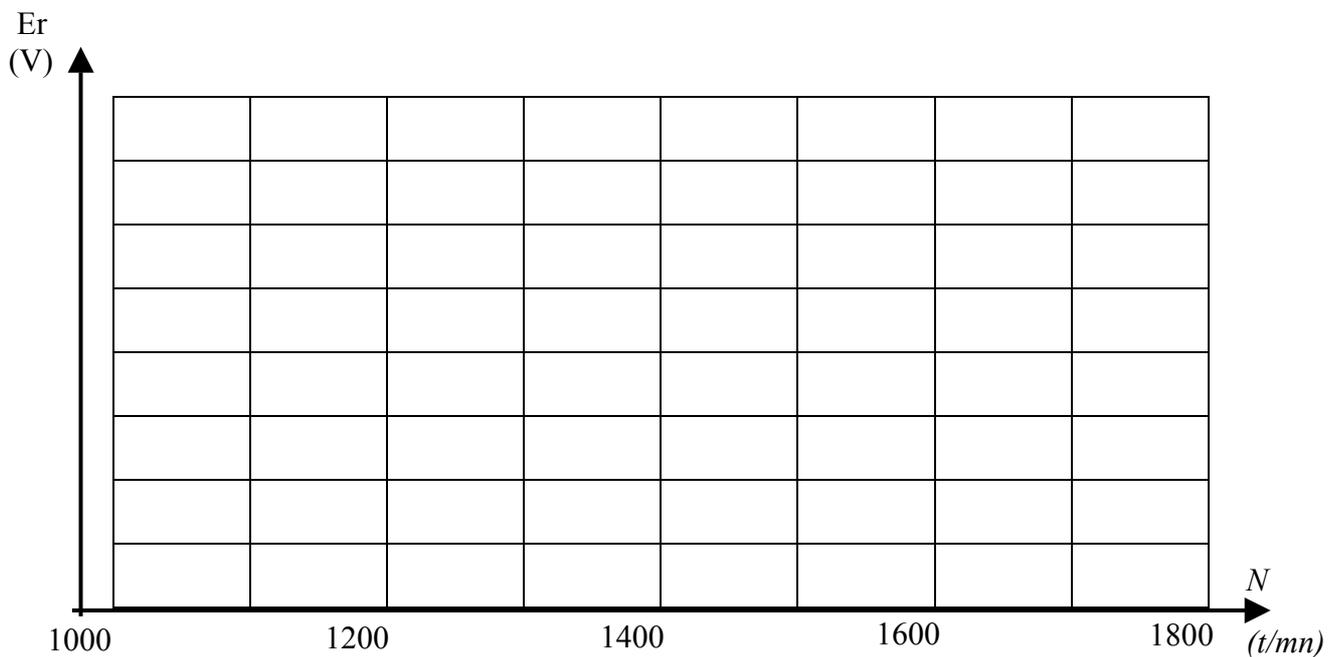


Vitesse du vent V (m/s)	4	6	8	10	12	14	16	18
Puissance P_r (kW)	47	257	636	1177	1570	1605	1605	1605
Puissance P_p (kW)								
C_p								

Document réponse REP.B.1

Question O.B.11

la tension efficace E_r en fonction de la vitesse



Question O.B.13

fréquence rotorique f_r en fonction de la vitesse

