

Éléments de correction de l'option A

Partie A : Etude de l'éolienne

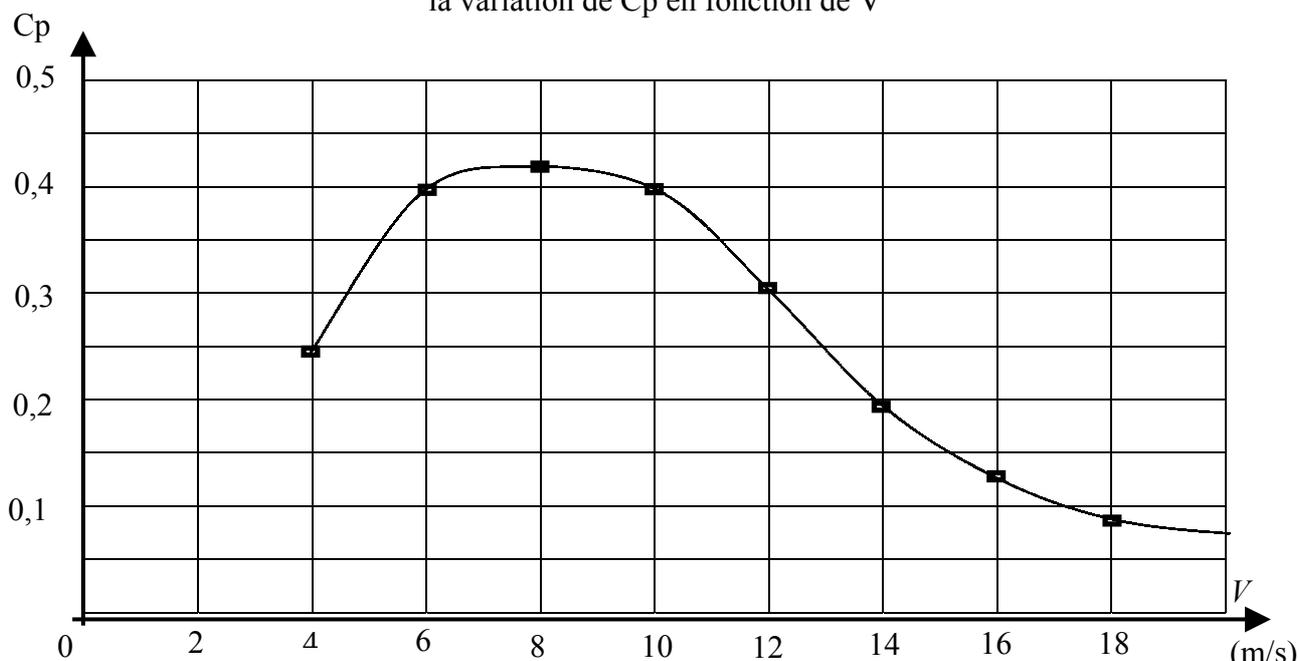
Q.A.1. $m_a = \delta S V t$

Q.A.2. $E = \frac{1}{2} m_a V^2 = \frac{1}{2} \delta S V^3 t$

Q.A.3. $P_p = E/t = \frac{1}{2} \delta S V^3$

Q.A.4. $P_r = C_p P_p = C_p \frac{1}{2} \delta S V^3 = C_p 2852 V^3$ avec $S = 77^2 \pi/4 = 4656,6 \text{ m}^2$

la variation de C_p en fonction de V



Vitesse du vent V (m/s)	4	6	8	10	12	14	16	18
Puissance Pr (kW)	47	257	636	1177	1570	1605	1605	1605
Puissance Pp (kW)	182,5	616	1460	2852	4928	7826	11682	16634
Cp	0,241	0,391	0,407	0,386	0,3	0,192	0,128	0,09

Q.A.5 Nombre totale d'heure pour une année = $365 \times 24 = 8760\text{h}$

V (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Puissance (kW)	47	138	257	424	636	905	1177	1410	1570	1605	1605	1605
% du temps	8,2	8	7,8	7	6,8	6,6	5	4,1	2,9	2,5	1,7	1
Temps / 1an (Heures)	718,3	700,8	683,3	613,2	595,68	578,16	438	359,1 6	254	219	148,92	87,6
Energie (MW.h)	33,8	96,7	175,6	260	378,9	523	515,5	506,4	398,8	731		

La somme d'énergie pour une année vaut : 3620MW.h

Le potentiel maximum serait de $8760 \times 1,6 = 14000\text{MW.h}$ (soit 26% d'utilisation)

(équivalent à 3h de production d'une centrale nucléaire de 1200MW)

Partie B : Etude du fonctionnement de la génératrice

Fonctionnement à rotor en court – circuit (simple alimentation)

$$\text{Q.B.1. } I_{10} = I_{10} \frac{V_s}{\sqrt{R1^2 + X^2}} = \frac{400}{\sqrt{0,0031^2 + 1^2}} = I_{10} = 400 \text{ A}$$

$$\text{Q.B.2. } \cos \varphi_{10} = P/S = \frac{-3.R1.I_{10}^2}{3.V_s.I_{10}} = \frac{-R1.I_{10}}{V_s} = \cos \varphi_{10} = -0,0031$$

$$\text{Q.B.3. } I_1 = \frac{P_{uN}}{3.V_s.\cos \varphi_{10}} = \frac{1500000}{3*400*0,9507} = I_1 = 1314,82 \text{ A}$$

$$\text{Q.B.4. } 3.V_x.I_1 = \sqrt{(P_{uN} + 3.R1.I_1^2)^2 + (3.V_s.I_1.\sin \varphi_{10})^2}$$

$$\text{d'où } V_x = \frac{\sqrt{(1500000 + 3*0,0031*1314,82^2)^2 + (3*400*1314,82*\sin(\arccos 0,9507))^2}}{3*1314,82} = 403,88 \text{ V}$$

$$\text{Q.B.5. } P_{tr} = P_{uN} + 3.R1.I_1^2 = 3.V_x^2/(R2/g) = 1516077,4 \text{ W}$$

$$g = -3.V_x^2/(R2) = -1516077,4 * R2/(3.V_x^2) = g = -0,93\%$$

$$\text{Q.B.6. } N = N_s(1-g) = 1500 * 1,0093 = N = 1514 \text{ t/mn}$$

$$\text{Q.B.7. } N_s/104,2 < N_e < N_N/104,2 \text{ d'où } N_e \text{ compris entre } 14,39 \text{ t/mn et } 14,53 \text{ t/mn}$$

Q.B.8.

$$\text{Protor} = P_{tr}(1-g)/0,98 = 1516077,4*1,0093/0,98 = 1561405 \text{ W et } \Omega_e = 14,53*\pi/30 = 1,5215 \text{ rd/s}$$

$$\text{Couple rotor} = \text{Protor}/\Omega_e = 1561405/1,5215 = 1026 \text{ kNm}$$

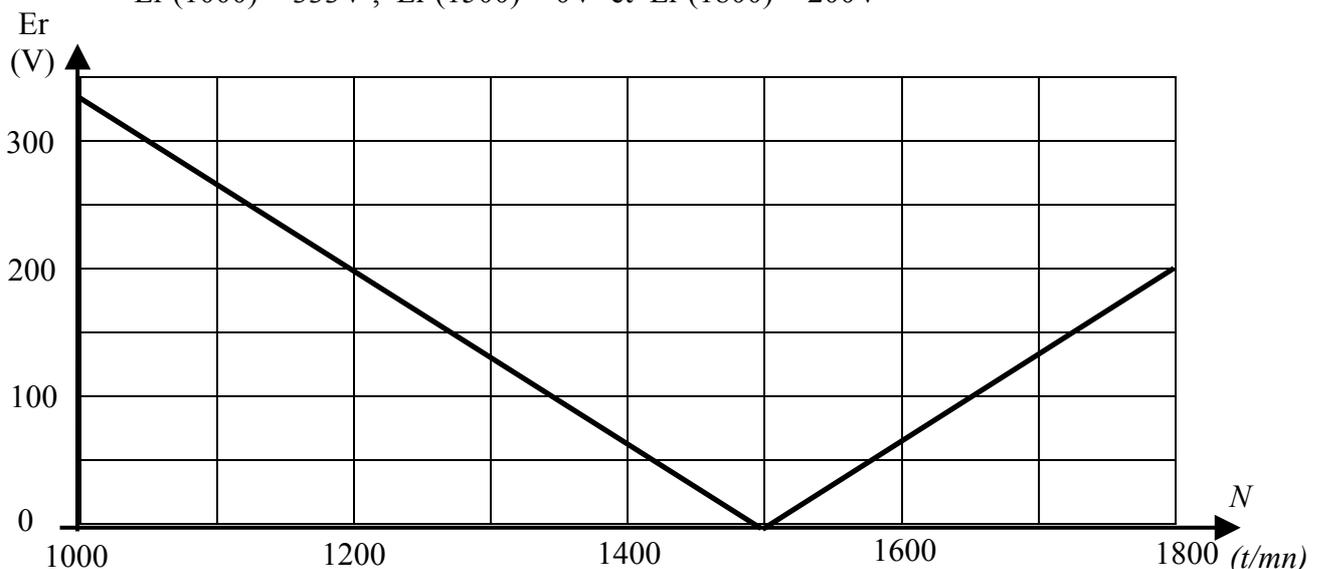
Fonctionnement en double alimentation

$$\text{Q.B.9. } E_r = V_x.m.|g|$$

$$\text{Q.B.10. } m = E_r/(V_x.|g|) \text{ et } g = (1500-900)/1500 = 40\% \text{ d'où } m = 1/(1*0,4) = m = 2,5$$

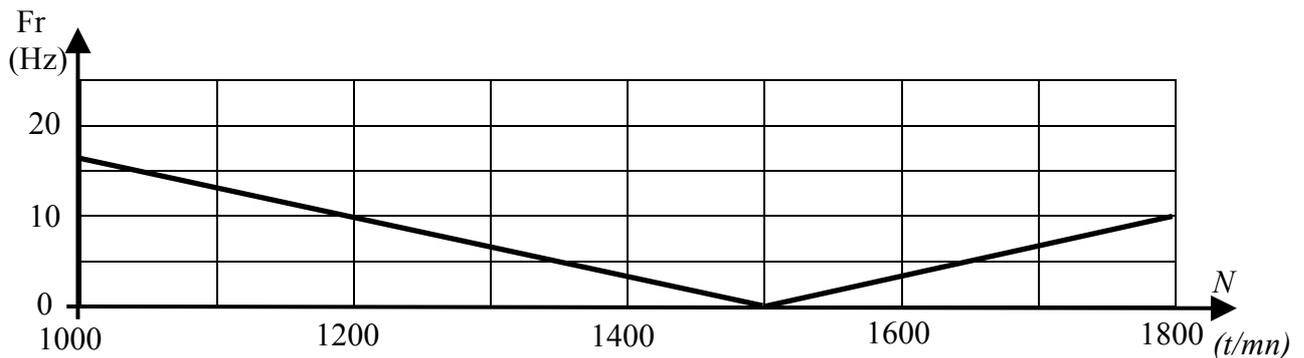
$$\text{Q.B.11. } E_r = 400*2,5 | 1500-N | /1500 = 2/3 * | 1500-N |$$

$$E_r(1000) = 333 \text{ V}, E_r(1500) = 0 \text{ V et } E_r(1800) = 200 \text{ V}$$



$$\text{Q.B.12. } f_r = |g|.f_s$$

Q.B.13. $f_r = |g|.f_s = (|1500-N|/1500) * 50 = |1500-N|/30$
 $f_r(1000) = 16,7\text{Hz}$, $f_r(1500) = 0\text{Hz}$ et $f_r(1800) = 10\text{Hz}$



Q.B.14. Pour les vitesses 1200 et 1800 t/mn, la valeur efficace de E_r et la fréquence f_r sont identiques. La différence se fait par le sens du système de tensions délivrées par le convertisseur statique qui change de sens (direct – inverse) pour la vitesse de 1500t/mn.

Q.B.15. $R_2 = R_r/m^2$ d'où $R_r = R_2.m^2 = 0,003*2,5^2 = \underline{R_r = 0,01875 \Omega}$

Q.B.16. $I_2 = m.I_r$ et $I_2 = I_o = 400 \text{ A}$ (réponse de la question B1) d'où $I_r = 400/2,6 = \underline{I_r = 154 \text{ A}}$

Q.B.17. $E_r = 333\text{V}$ (tension V_x (aux bornes d'une inductance) ramenée au rotor)

D'où $V_r = \sqrt{E_r^2 + (R_r.I_r)^2} = \sqrt{333^2 + (0,02*154)^2} = \underline{V_r \approx 333\text{V}}$

Fonctionnement nominal :

Q.B.18. Couple électromagnétique = $P_{méca} / \Omega = 1572000/60.\pi = \underline{C_{elm} = 8340 \text{ Nm}}$

Q.B.19. $P_{tr} = C_{elm}.\Omega_s = 8340 * 50.\pi = \underline{P_{tr} = 1310 \text{ kW}}$

Q.B.20. $P_s = P_{tr} - 3.R_1.I_1^2 = 3.V_s.I_1$ où $3.R_1.I_1^2 + 3.V_s.I_1 - P_{tr} = 0$

$0,0093I_1^2 + 1200I_1 - 1310000 = 0$ donc $\underline{I_1 = 1083 \text{ A}}$

Q.B.21. $P_s = 3.V_s.I_1 = \underline{P_s = 1299 \text{ kW}}$

Q.B.22. $P_{js} = 3.R_1.I_1^2 = 3*0,0031*1083^2 = \underline{P_{js} = 10,9 \text{ kW}}$

Q.B.23. $3.V_x.I_1 = P_{tr}$ d'où $V_x = P_{tr}/(3.I_1) = 1310000/(3*1083) = \underline{V_x = 403,2\text{V}}$

Q.B.24. $\bar{I}_2 = \bar{I}_0 + \bar{I}_1$ d'où $I_2 = \sqrt{I_0^2 + I_1^2}$ avec $I_0 = V_x/X = 403,2/1 = 403,2 \text{ A}$

d'où $I_2 = \sqrt{403,2^2 + 1083^2} = \underline{I_2 = 1156 \text{ A}}$

Q.B.25. $P_{jr} = 3.R_r.I_r^2 = 3.R_r.(I_2/m)^2 = 3*0,02*(1156/2,6)^2 = \underline{P_{jr} = 11,86 \text{ kW}}$ et $I_r = 444,6\text{A}$

Q.B.26. Le rotor fournit de la puissance qui est absorbée par le convertisseur statique.

$g = (1500-1800)/1500 = -0,2$

Le rotor fournit $P_{rot} = g.P_{tr} + P_{jr} = -0,2*1310\text{k} + 11,86\text{k} = \underline{P_{rot} = -250,14 \text{ kW}}$ (convention Récept)

Q.B.27. $P_{transfo} = P_s - 0,99 P_{rot} = 1299\text{k} + 0,99*250,14\text{k} = \underline{P_{transfo} = 1546,6 \text{ kW}}$

Q.B.28. $f_r = |g|.f_s = \underline{f_r = 10 \text{ Hz}}$

Q.B.29. $E_r = V_x.m.|g| = 403,2*2,6*0,2 = \underline{E_r = 209,66\text{V}}$

Q.B.30. $Q_{rot} = 3.V_x.I_o.(f_r/f_s) = 3*403,2*403,2/5 = \underline{Q_{rot} = 97510 \text{ VAR}}$

Cette puissance réactive est fournie par le convertisseur statique

Q.B.31. $\text{tg } \varphi_r = Q_{rot}/P_{rot} = 97,51/-250,14 = -0,39$ d'où $\varphi_r = 201,3^\circ$ et $\underline{\cos \varphi_r = -0.932}$

$$\text{Q.B.32. } V_r = S_{rot}/3.I_r = \frac{\sqrt{P_{rot}^2 + Q_{rot}^2}}{3.I_r} = \frac{\sqrt{250,14k^2 + 97510^2}}{3*444,6} = \underline{V_r = 201,3V}$$

Fonctionnement à puissance réduite :

$$\text{Q.B.33. } \text{Couple électromagnétique} = P_{méca} / \Omega = 250000/40.\pi = \underline{C_{elm} = 1989 Nm}$$

$$\text{Q.B.34. } P_{tr} = C_{elm}.\Omega_s = 1989 * 50.\pi = \underline{P_{tr} = 312,5 kW}$$

$$\text{Q.B.35. } P_s = P_{tr} - 3.R1.I_1^2 = 3.V_s.I_1 \text{ où } 3.R1.I_1^2 + 3.V_s.I_1 - P_{tr} = 0$$

$$0,0093I_1^2 + 1200I_1 - 312500 = 0 \text{ donc } \underline{I_1 = 259,9 A}$$

$$\text{Q.B.36. } P_s = 3.V_s.I_1 = \underline{P_s = 311,9 kW}$$

$$\text{Q.B.37. } P_{js} = 3.R1.I_1^2 = 3*0.0031*259,9^2 = \underline{P_{js} = 628 W}$$

$$\text{Q.B.38. } 3.V_x.I_1 = P_{tr} \text{ d'où } V_x = P_{tr}/(3.I_1) = 312500/(3*259,9) = \underline{V_x = 400,8V}$$

$$\text{Q.B.39. } \bar{I}_2 = \bar{I}_0 + \bar{I}_1 \text{ d'où } I_2 = \sqrt{I_0^2 + I_1^2} \text{ avec } I_0 = V_x/X = 400,8/1 = 400,8 A$$

$$\text{d'où } I_2 = \sqrt{400,8^2 + 259,9^2} = \underline{I_2 = 477,7 A}$$

$$\text{Q.B.40. } P_{jr} = 3.R_r.I_r^2 = 3.R_r.(I_2/m)^2 = 3*0,02*(477,7/2,6)^2 = \underline{P_{jr} = 2025 W} \text{ et } I_r = 183,7A$$

Q.B.41. Le rotor absorbe de la puissance qui est fournie par le convertisseur statique.

$$g = (1500-1200)/1500 = 0,2$$

Le rotor fournit $P_{rot} = g.P_{tr} + P_{jr} = 0,2*312,5k + 2025 = \underline{P_{rot} = 64525 W}$ (convention Récept)

$$\text{Q.B.42. } P_{transfo} = P_s - P_{rot} / 0,99 = 311,9k - 64525/0,99 = \underline{P_{transfo} = 246,7 kW}$$

$$\text{Q.B.43. } E_r = V_x.m.|g| = 400,8*2,6*0,2 = \underline{E_r = 208,4V}$$

$$\text{Q.B.44. } Q_{rot} = 3.V_x.I_0.(f_r/f_s) = 3*400,8*400,8/5 = \underline{Q_{rot} = 96,38 kVAR}$$

Cette puissance réactive est fournie par le convertisseur statique

$$\text{Q.B.45. } \text{tg } \varphi_r = Q_{rot}/P_{rot} = 96380/64525 = 1,49 \text{ d'où } \varphi_r = 86,2^\circ \text{ et } \underline{\cos \varphi_r = 0,556}$$

$$\text{Q.B.46. } V_r = S_{rot}/3.I_r = \frac{\sqrt{P_{rot}^2 + Q_{rot}^2}}{3.I_r} = \frac{\sqrt{64525^2 + 96,38k^2}}{3*183,7} = \underline{V_r = 210,5V}$$

Partie C : Le convertisseur statique AC-AC

Q.C.1. $v_{ino} = v_{in} + v_{nno}$ ($i = a, b$ ou c)

Q.C.2. $v_{nno} = (v_{ano} + v_{bno} + v_{cno})/3$

Q.C.3. $v_{an} = (2/3)v_{ano} - (1/3)v_{bno} - (1/3)v_{cno}$
 $v_{bn} = -(1/3)v_{ano} + (2/3)v_{bno} - (1/3)v_{cno}$
 $v_{cn} = -(1/3)v_{ano} - (1/3)v_{bno} + (2/3)v_{cno}$

Q.C.4. $\langle v_{ino} \rangle = (2 \alpha_i - 1)V_o$

Q.C.5. $\langle v_{in} \rangle = \langle v_{ino} \rangle$

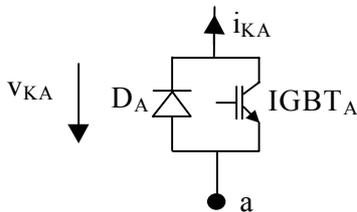
Q.C.6. $\langle v_{in} \rangle(\omega t) = v \cdot \sin(\omega t) = (2 \alpha_i - 1)V_o$ d'où $\alpha_i = 1/2 + (v/2V_o) \sin(\omega t)$

Q.C.7. $V_o = v = 400 \sqrt{2} = 566V$

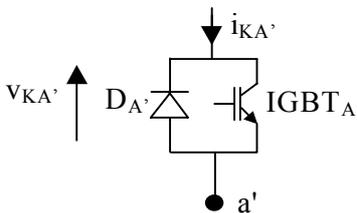
Q.C.8. Les inductances λ et λ' servent à donner une nature courant aux sources triphasées d'entrée et de sortie de façon à respecter les lois de connexion des convertisseurs directs (liaison directe entre deux sources de nom différent) vis-à-vis de la nature tension de la source $2V_o$.

Définition des composants de puissance

Q.C.9.



Q.C.10.



Q.C.11. l'interrupteur K_A

$V_{DA} = 2V_o = 980V$

$I_{DA} = I_{i_{crête}} = 200 \cdot \sqrt{2} = 283 A$

$V_{IGBT_A} = 2V_o = 980V$

$I_{IGBT_A} = I_{i_{crête}} = 200 \cdot \sqrt{2} = 283 A$

Q.C.12. l'interrupteur K_A'

$V_{DA'} = 2V_o = 980V$

$I_{DA'} = I_{i'_{crête}} = 427 \cdot \sqrt{2} = 604 A$

$V_{IGBT_{A'}} = 2V_o = 980V$

$I_{IGBT_{A'}} = I_{i'_{crête}} = 427 \cdot \sqrt{2} = 604 A$

Q.C.13. $\langle I_{IGBT_A} \rangle = I_{i_{crête}}/\pi = 283/\pi = 90 A$

Q.C.14. $\langle I_{IGBT_{A'}} \rangle = I_{i'_{crête}}/\pi = 604/\pi = 192 A$

Q.C.15. IGBT_A : avec $I_c > 1,5 \cdot 90 = 135 A$, $V_{CES} > 980V$ et V_{CEsat} minimum

Choix : 1200V Low Loss IGBT ref : SKM 100GB124D

Q.C.16. IGBT_{A'} : avec $I_c > 1,5 \cdot 192 = 288 A$, $V_{CES} > 980V$ et V_{CEsat} minimum

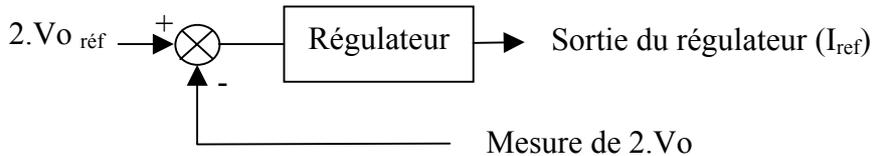
Choix : 1200V Low Loss IGBT ref : SKM 200GB124D

Q.C.17. Les pertes dans le convertisseur sont les pertes par conduction et les pertes par commutation. les pertes par conduction dépendent de l'amplitude du courant conduit et les pertes par commutation dépendent de l'amplitude du courant commuté, de l'amplitude de la tension aux bornes du composant à l'état bloqué et de la fréquence de commutation.

Partie D : La commande du convertisseur statique

Onduleur 1

Q.D.1. Régulation de la tension du bus



$2.Vo_{réf}$: Référence d'amplitude constante

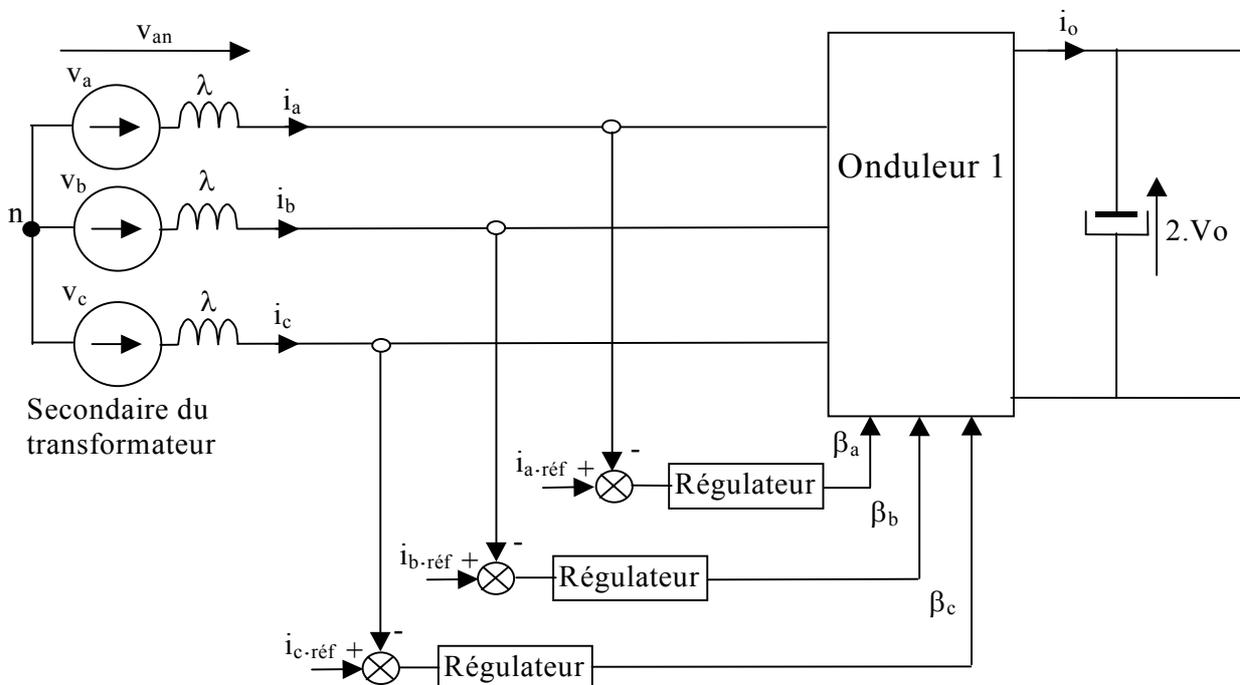
Mesure de $2.Vo$ avec un capteur de tension aux bornes de la somme des condensateurs

La sortie du régulateur sert de référence des boucles internes

Q.D.2. La sortie du régulateur représente l'amplitude ($I_{réf}$) des courants (i_a, i_b, i_c).

Q.D.3. Le capteur utilisé nécessite une isolation galvanique entre la tension mesurée et la sortie, pour isoler galvaniquement le circuit de commande du circuit de puissance.

Q.D.4.



Nature des capteurs : 3 Capteurs de courant

Q.D.5. Les sorties des régulateurs ($\beta_a, \beta_b, \beta_c$) représentent les tensions délivrées par chaque bras de l'onduleur 1.

Q.D.6. Les capteurs utilisés nécessitent une isolation galvanique entre chaque courant mesuré et les circuits de commande, pour isoler galvaniquement les circuits de commande de la puissance et aussi chaque capteur entre eux pour éviter le court-circuit entre phase (car tous les circuits de commande sont référencés au même potentiel).

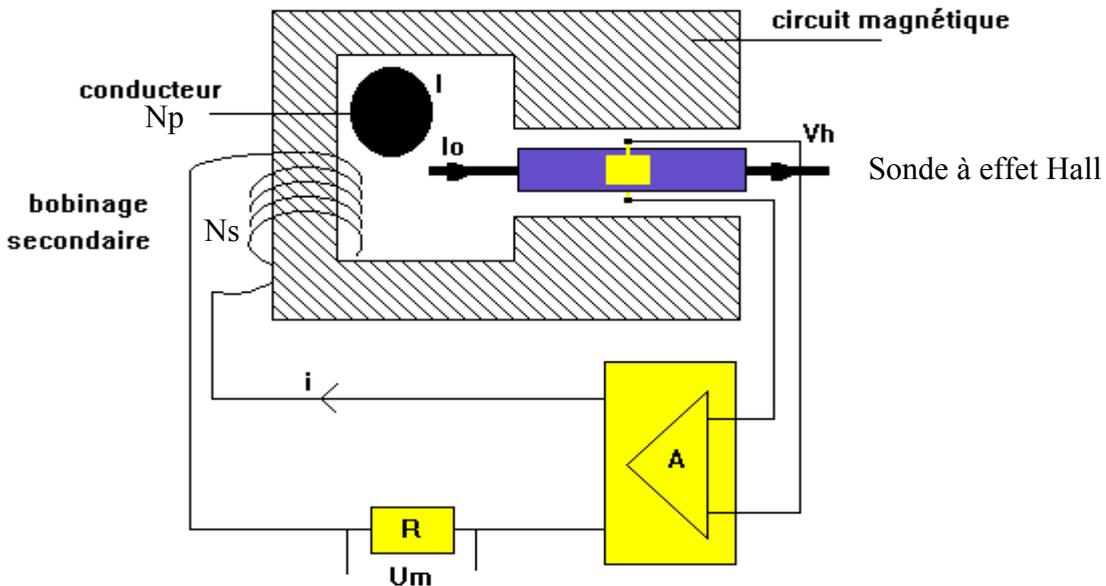
Q.D.7. Classiquement on utilise des capteurs à effet Hall.

Principe des capteurs à effet Hall :

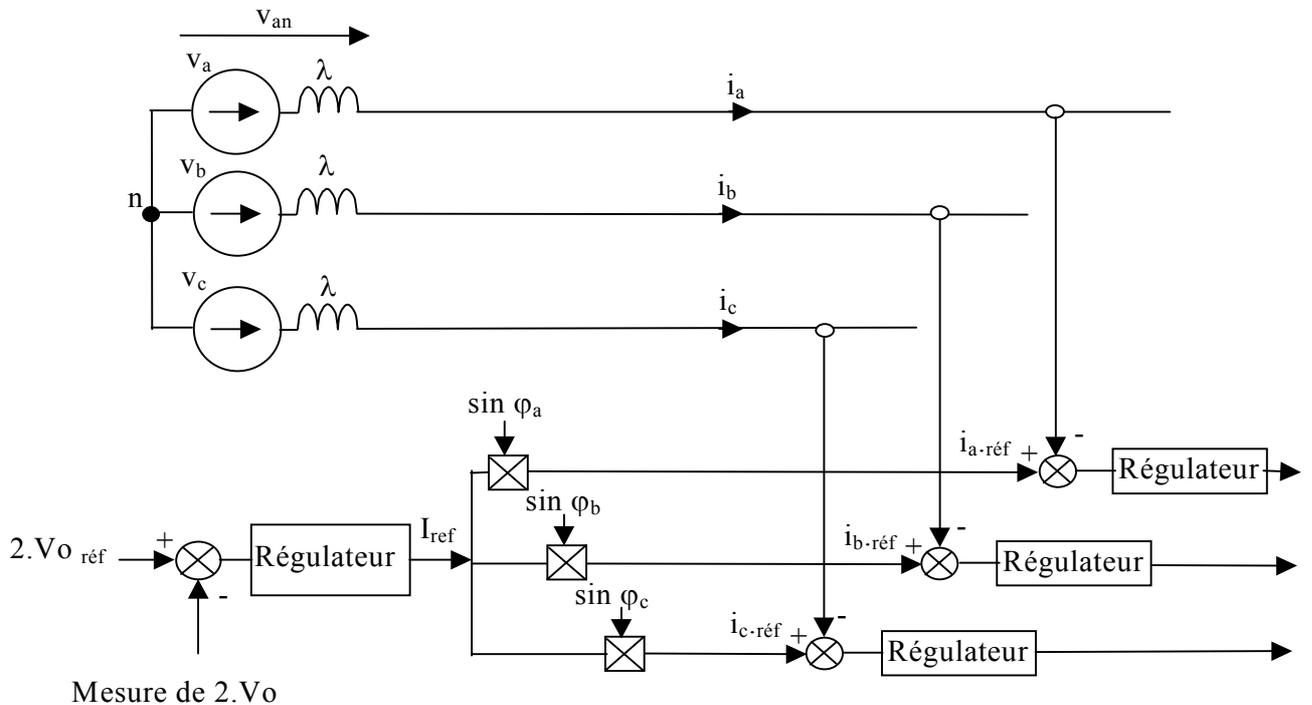
I : courant à mesurer

Um : tension de sortie proportionnelle à I ; $Um = R.i = R.(Np/Ns).I$

avec Ns : nombre de spires du circuit secondaire et Np : nombre de spires du circuit primaire



<http://pedagogie.ac-aix-marseille.fr/disciplines/sti/genelec/cours/abati/hall.htm> de Patrick ABATI



Q.D.8. Schéma pour relier les deux boucles de régulation

On a $I_{a.ref} = I_{ref} \cdot \sin \phi_a$ avec $\sin \phi_a = V_{an}/V$ et V amplitude de (V_{an}, V_{bn}, V_{cn})
 $I_{b.ref} = I_{ref} \cdot \sin \phi_b$ avec $\sin \phi_b = V_{bn}/V$
 $I_{c.ref} = I_{ref} \cdot \sin \phi_c$ avec $\sin \phi_c = V_{cn}/V$

Ainsi les références de courant sont en phase avec les tensions ; $\cos \phi = 1$ (ou -1 si I_{ref} est <0)

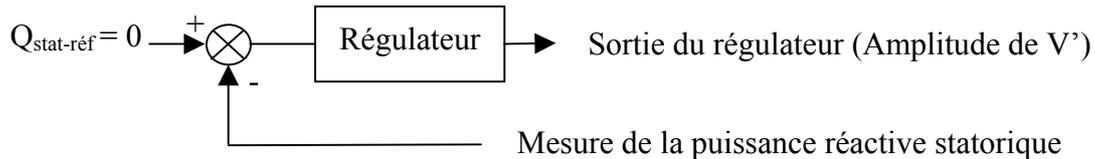
Onduleur 2

Q.D.9. Pour une vitesse de rotation donnée, L'amplitude de la tension (V') qui alimente le rotor agit directement sur l'amplitude du courant magnétisant de la machine.

Q.D.10. Si le courant magnétisant rotor est trop petit, la machine complétera ses ampères-tours manquants en absorbant de la puissance réactive au stator. Car, la machine travaille à flux constant du fait que son stator soit relié directement au secteur.

Q.D.11. Si le courant magnétisant rotor est trop grand, la machine diminuera ses ampères-tours en fournissant de la puissance réactive au réseau par son stator. Car, la machine travaille à flux constant du fait que son stator soit relié directement au secteur.

Q.D.12.



Q.D.13. La sortie du régulateur est modifiée lors d'un changement de vitesse de l'éolienne, car lorsque la machine fonctionne à flux constant, la tension de magnétisation (V') est proportionnelle à la fréquence de cette tension, et la fréquence de $V' = |g| \cdot f_s$ est lié à la vitesse de l'éolienne.

Q.D.14. C'est la fréquence de V' qui permet de fixer g ; donc la vitesse de l'éolienne.