

Éléments de réponse de la partie A

Q.A.1. $P_{mr} = C_m \cdot \Omega_r = 950 \cdot 300 \cdot \frac{\pi}{30} = \underline{29\,845\text{ W}}$

Q.A.2. $P_{nr} = C_n \cdot \Omega_r = 475 \cdot 300 \cdot \frac{\pi}{30} = \underline{14\,922\text{ W}}$

Q.A.3. $N_r = 300\text{ t/mn} \rightarrow n_r = 5\text{ t/s} \rightarrow V_v = \pi \cdot D \cdot n_r = \pi \cdot 0,52 \cdot 5 = \underline{8,168\text{ m/s}} \rightarrow \underline{29,4\text{ km/h}}$

Q.A.4. $N_r = 300/29,4 \cdot 50 = \underline{510\text{ t/mn}} \rightarrow 2 \cdot \pi \cdot 510/60 = 53,4\text{ rd/s}$

Q.A.5. $C_m (50\text{ km/h}) = 29845/53,4 = \underline{558,8\text{ Nm}}$

Q.A.6. $M \cdot \frac{dV_v}{dt} = C_m/R_r - S_{cx} \cdot V_v$

Q.A.7. on a $M \cdot \frac{dV_v}{dt} = C_m/R_r$

a. de 0 à 300t/mn, $C_m = 950\text{ Nm}$ (constant)

d'où $V_v = C_m/(M \cdot R_r) \cdot t \rightarrow t_{a1} = V_v \cdot (M \cdot R_r)/C_m$ avec $V_v = \pi \cdot D \cdot n_r = \pi \cdot 2 \cdot R_r \cdot N_r/60$

$\rightarrow t_{a1} = 2 \cdot \pi \cdot R_r \cdot N_r/60 \cdot (M \cdot R_r)/C_m = 2 \cdot \pi \cdot R_r^2 \cdot N_r/60 \cdot M/C_m = 2 \cdot \pi \cdot 0,26^2 \cdot (300/60) \cdot 1200/950$

$\underline{t_{a1} = 2,68\text{ s}}$

b. de 300t/mn (29,4 km/h ou 8,168 m/s) à 510 t/mn (50km/h ou 13,89 m/s), on a

$C_m = 950 \cdot 8,168/V_v = 7759,6/V_v$ (inverse proportionnel à V_v) et avec $M \cdot \frac{dV_v}{dt} = C_m/R_r$

d'où $\int_{8,168}^{13,89} V_v \cdot dV_v = 7759,6/(M \cdot R_r) \int_0^{t_{a2}} dt \rightarrow [(13,89)^2/2 - (8,168)^2/2] = 7759,6/(M \cdot R_r) \cdot t_{a2}$

$\rightarrow \underline{t_{a2} = 2,537\text{ s}}$

c. $\underline{t_{a1} + t_{a2} = 2,68 + 2,54 = 5,22\text{ s}}$

Q.A.8. de 50km/h (ou 13,89 m/s) à 80km/h (ou 22,22 m/s) **on a** $M \cdot \frac{dV_v}{dt} = C_m/R_r - S_{cx} \cdot V_v$ (sans négliger $S_{cx} \cdot V_v$) avec $C_m = 7759,6/V_v$ **on obtient** $M \cdot \frac{dV_v}{dt} = (7759,6/R_r - S_{cx} \cdot V_v^2)/V_v$

d'où $\int_{13,89}^{22,22} \frac{M \cdot V_v \cdot R_r}{7759,6 - R_r \cdot S_{cx} \cdot V_v^2} \cdot dV_v = \int_0^{t_{a3}} dt$

$\rightarrow t_{a3} = \frac{M}{S_{cx}} \int_{13,89}^{22,22} \frac{V_v}{7759,6/R_r \cdot S_{cx} - V_v^2} \cdot dV_v = \frac{M}{S_{cx}} \int_{13,89}^{22,22} \frac{V_v}{A - V_v^2} \cdot dV_v$ avec $A = \frac{7759,6}{R_r \cdot S_{cx}}$

$\rightarrow t_{a3} = \frac{M}{2 \cdot S_{cx}} \left[-\log(A - V_v^2) \right]_{13,89}^{22,22} = \frac{M}{2 \cdot S_{cx}} \left(-\log(A - 22,22^2) + \log(A - 13,89^2) \right)$

$\rightarrow t_{a3} = \frac{1200}{2 \cdot 15} \left(-\log(1989,6 - 22,22^2) + \log(1989,6 - 13,89^2) \right)$ avec $A = 1989,6$

$\rightarrow \underline{t_{a3} = 7,33\text{ s}}$

Q.A.9.

a. de 0 à 300t/mn, $C_m = 950 \text{ Nm}$ (constant), et $V_v = C_m / (M \cdot R_r) \cdot t$ et $t_{a1} = 2,68 \text{ s}$

$$\rightarrow d1 = \int_0^{t_{a1}} V_v \cdot dt = \frac{C_m}{M \cdot R_r} \int_0^{t_{a1}} t \cdot dt = \frac{C_m}{M \cdot R_r} \cdot \frac{t_{a1}^2}{2} = 950 / (2 \cdot 1200 \cdot 0,26) \cdot 2,68^2$$

$$\rightarrow d1 = 10,93 \text{ m}$$

b. de 300t/mn (29,4 km/h ou 8,168 m/s) à 510 t/mn (50km/h ou 13,89 m/s), on a

$$C_m = 7759,6 / V_v, \quad t_{a2} = 2,537 \text{ s} \text{ et avec } \int_{V_v(t_{a1})}^{V_v(t)} V_v \cdot dV_v = 7759,6 / (M \cdot R_r) \cdot t$$

$$\rightarrow V_v^2 = 2 \cdot 7759,6 / (M \cdot R_r) \cdot t + V_v^2(t_{a1}) \text{ d'où } V_v^2 = B \cdot t + V_v^2(t_{a1}) \text{ avec } B = 2 \cdot 7759,6 / (M \cdot R_r) = 49,74$$

$$\rightarrow d2 = \int_0^{t_{a2}} V_v \cdot dt = \int_0^{t_{a2}} (B \cdot t + V_v^2(t_{a1}))^{0,5} \cdot dt = \frac{2}{3 \cdot B} \left((B \cdot t_{a2} + V_v^2(t_{a1}))^{1,5} - (V_v^2(t_{a1}))^{1,5} \right)$$

$$d2 = 28,61 \text{ m}$$

$$c. \quad d1 + d2 = 10,93 + 28,61 = 39,54 \text{ m}$$

Q.A.10. $V_{v_{\max}} = P_{\max} / F_{\max} = P_{\max} / Scx \cdot V_{v_{\max}} \rightarrow V_{v_{\max}}^2 = P_{n_{\max}} / Scx \rightarrow V_{v_{\max}} = (P_{n_{\max}} / Scx)^{0,5}$
 $V_{v_{\max}} = (14922 / 15)^{0,5} = 31,54 \text{ m/s (113,54 km/h)}$

Q.A.11. $V_{v_{\max}} = P_{\max} / F_{\max} = P_{\max} / (Scx \cdot V_{v_{\max}} + 0,15 \text{ g} \cdot m) \rightarrow Scx \cdot V_{v_{\max}}^2 + 0,15 \text{ g} \cdot M \cdot V_v = P_{n_{\max}}$

$$\rightarrow 15 V_{v_{\max}}^2 + 0,15 \cdot 9,81 \cdot 1200 V_v - 14922 = 0 \rightarrow 15 V_{v_{\max}}^2 + 1765,8 V_v - 14922 = 0$$

$$\rightarrow V_{v_{\max}} = 7,9 \text{ m/s (28,4 km/h)}$$

Eléments de réponse de la partie B

		4000 t/mn	5000 t/mn	6000 t/mn	7000 t/mn	8000 t/mn	Formules
Q.B.1	Vv (km/h)	54,45	68	81,68	95,29	108,91	$\frac{N \cdot 108,9}{8000}$
Q.B.1	Vv (m/s)	15,12	18,89	22,69	26,47	30,25	$V_{v(\text{km/h})} / 3,6$
Q.B.2	Ptc (W)	3 762	5 768	8 222	11 092	14 391	$Scx \cdot V_v^2 + 22 V_v$
	Rendement Batterie-Roue	74,4 %	74,1 %	73,6 %	72,9 %	72 %	
Q.B.5	Pbat (W)	5 076	7 784	11 171	15 215	19 988	Ptc/rendement
Q.B.6	Energie Batterie (Wh)	27 660	26 700	25 750	24 850	24 200	Sur la courbe Energie=f(Pbat)
Q.B.7	Autonomie (km)	298	233	188	155	132	$\frac{\text{Energie}}{\text{Pbat}} \cdot V_v(\text{km/h})$

Q.B.3. Nombre d'éléments = $6 \cdot 30 = 180$ éléments

Q.B.4. Capacité d'un élément = $25 200 / (3,5 \cdot 180) = 40 \text{ Ah}$

Q.B.8. Vitesse pour une autonomie de 200 km.

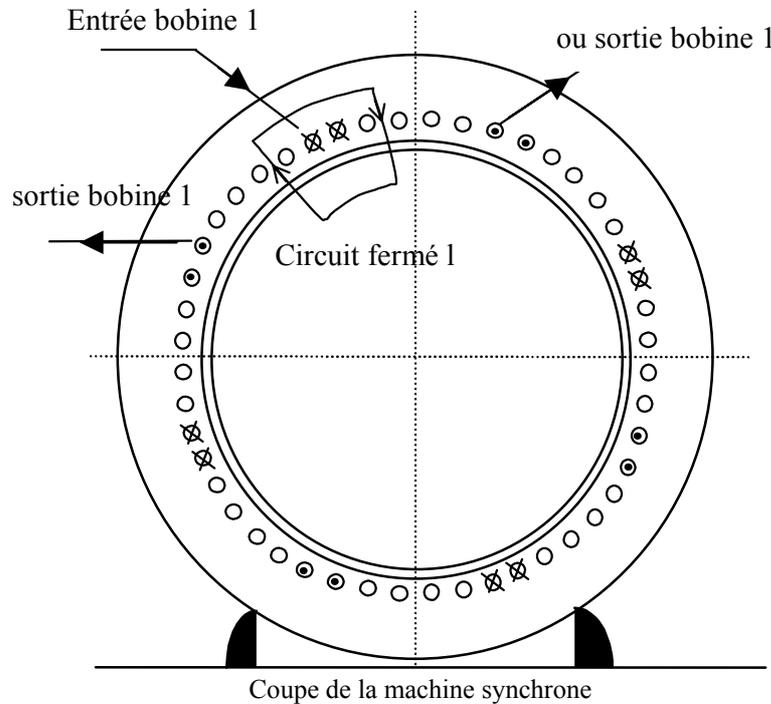
233 km pour 68 km/h et 188 km pour 81,68 km/h en linéarisant
 $V_v = 68 + (81,68 - 68) / (233 - 188) * (233 - 200) = 68 + 0,304(233 - 200) = \underline{78 \text{ km/h}}$ (calcul exact : 77 km/h)

Éléments de réponse de la partie C

Q.C.1. 48 encoches, 8 pôles et 3 phases font $48 / (3 * 8) = \underline{2}$ encoches par pôle et par phase

Q.C.2. et Q.C.3. Document réponse REP.C.1

Pour une phase complète, désigner les conducteurs aller \otimes et les conducteurs retour \odot



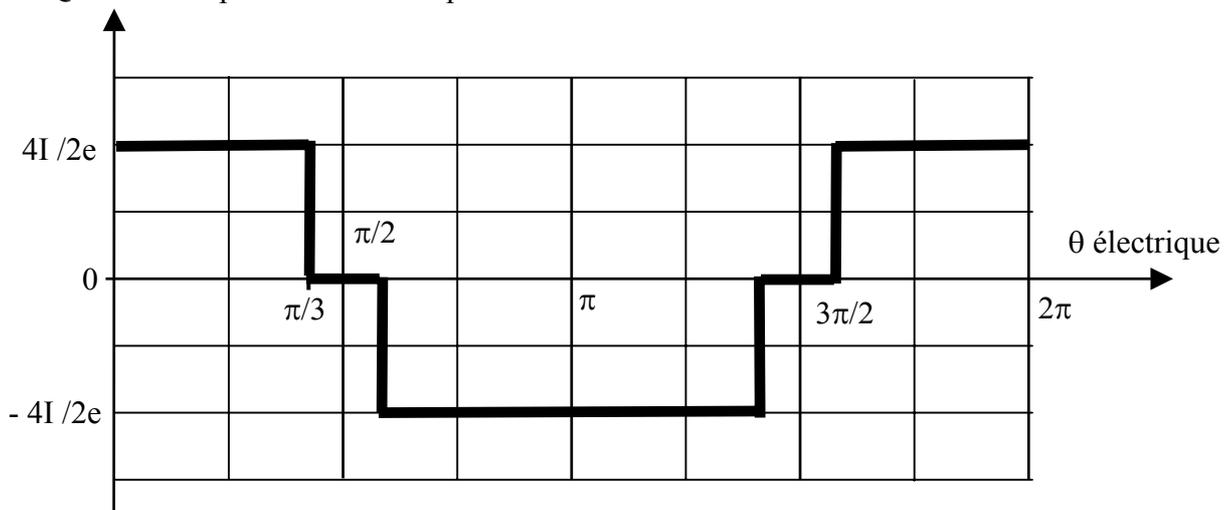
Q.C.4. Comme il y a 4 bobines par phase ($p=4$) et toutes les bobines sont en parallèle, alors l'intensité par conducteur = $185 / 4 = \underline{46,25 \text{ A}}$

Q.C.5. La section d'un conducteur vaut $46,25 / 15 = \underline{3,08 \text{ mm}^2}$

Q.C.6. section d'une encoche (2 conducteurs par encoche) vaut $2 * (3,08 / 0,8) = \underline{7,7 \text{ mm}^2}$

Q.C.7. Le pas dentaire électrique $\beta_e = p \cdot \beta_m$ et $\beta_m = 360^\circ / 48 = 7,5^\circ$ d'où $\beta_e = \underline{30 \text{ degrés}}$

Q.C.8. Répartition du champ dans l'entrefer



Q.C.9. Sur le circuit 1 fermé du document réponse REP.C.1 on applique le théorème d'Ampère

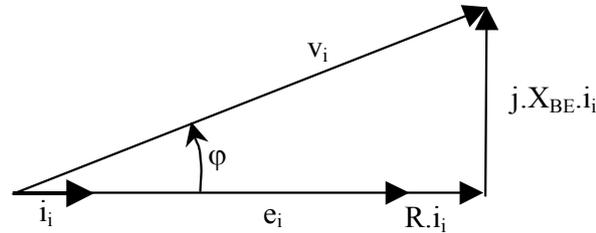
$$\oint_1 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_1 \mathbf{N} \cdot \mathbf{I} \quad \text{alors} \quad \oint_1 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 4I = H_{\text{fer}} \cdot l_{\text{fer}} + H_e \cdot 2e \quad \text{comme } H_{\text{fer}} \text{ est négligeable alors}$$

$$\underline{H_{e_{\max}}} = 2I/e$$

Éléments de réponse de la partie D

Q.D.1. $f = p.n$, $p = 4$ et $n = 8000/60$ (t/s) donc $\underline{f} = 4 * 8000/60 = \underline{533 \text{ Hz}}$

Q.D.2. Diagramme de Behn Eschenburg pour $v = 0$ et avec $\underline{v}_i = \underline{e}_i + R.\underline{i}_i + j.X_{BE}.\underline{i}_i$



Q.D.3. $V_{ieff} = \frac{L_{BE} \cdot \omega \cdot I_{eff}}{\sin \varphi}$

Q.D.4. $L_{BE} = \frac{V_{ieff} \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot I_{eff}} = \frac{19,39 * \sin 24,67}{4 * \pi * \frac{500}{30} * 185} = \underline{L_{BE} = 0,209 \text{ mH}}$

Q.D.5. $V_{ieff} = \frac{E_{eff} + R.I_{eff}}{\cos \varphi}$

Q.D.6. $V_{ieff} = \frac{\frac{K\Phi \cdot p \cdot \Omega}{\sqrt{2}} + R.I_{eff}}{\cos \varphi}$

Q.D.7. Prendre deux essais

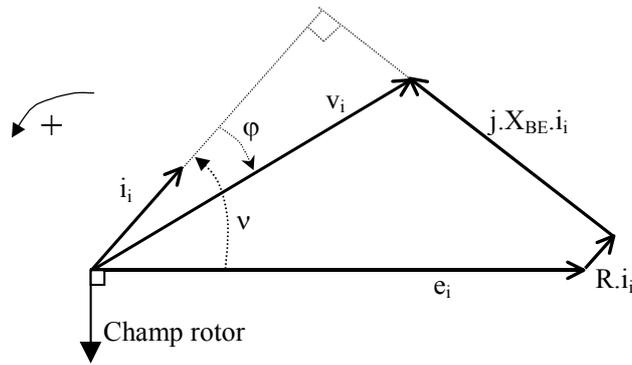
$$V_{1ieff} \cdot \cos \varphi_1 - V_{2ieff} \cdot \cos \varphi_2 = \frac{K\Phi \cdot p \cdot \Omega_1}{\sqrt{2}} - \frac{K\Phi \cdot p \cdot \Omega_2}{\sqrt{2}} = \frac{K\Phi \cdot p}{\sqrt{2}} (\Omega_1 - \Omega_2)$$

$$48,94 * \cos 29,74 - 19,39 * \cos 24,67 = \frac{4 * K\Phi}{\sqrt{2}} (1500 - 500) * \frac{\pi}{30}$$

24,874 = 296,2KΦ d'ou $\underline{K\Phi = 0,084 \text{ V/rd/s}}$

et $R = \frac{V_{ieff} \cdot \cos \varphi - \frac{K\Phi \cdot p \cdot \Omega}{\sqrt{2}}}{I_{eff}} = \frac{19,39 \cdot \cos 24,67 - \frac{0,084 * 4 * 500 * \frac{\pi}{30}}{\sqrt{2}}}{185} = \underline{R = 0,028 \Omega}$

Q.D.8. Diagramme de Behn Eschenburg pour $v = 58,5^\circ$ et avec $\underline{v}_i = \underline{e}_i + R.\underline{i}_i + j.X_{BE}.\underline{i}_i$



Q.D.9. $V_{ieff} \cdot \cos \varphi = E_{ieff} \cdot \cos v + R \cdot I_{ieff} = \frac{0,08 \cdot 4 \cdot 5000 \cdot \pi / 30}{\sqrt{2}} \cos 58,5 + 0,03 \cdot 155 = 66,554 \text{ V}$

$$V_{ieff} \cdot \sin \varphi = E_{ieff} \cdot \sin v - X_{BE} \cdot I_{ieff} = \frac{0,08 \cdot 4 \cdot 5000 \cdot \pi / 30}{\sqrt{2}} \sin 58,5 - 0,0002 \cdot (4 \cdot 5000 \cdot \pi / 30) \cdot 155$$

$$V_{ieff} \cdot \sin \varphi = 36,092 \text{ V}$$

$$V_{ieff} \cdot \cos \varphi = 66,554 \text{ V} \text{ alors } V_{ieff} = \sqrt{(66,554)^2 + (36,092)^2} = \underline{V_{ieff} = 75,7 \text{ V}}$$

Document réponse REP.D.1

Caractérisation du moteur avec son alimentation et sa stratégie de commande

		Formules	3000 t/mn	4000 t/mn	5000 t/mn	6000 t/mn	7000 t/mn	8000 t/mn
Q.D.10	Puissance utile max (W)	$C_u \cdot \Omega$	30159,3	30159,3	30159,3	30159,3	27855,4	20944
Q.D.11	Rendement moteur (%)	P_u / P_{abs}	90,94	87,3	86,8	86,14	85	82,1
Q.D.12	Rendement global (%)	P_u / P_o	86	83,73	83,3	82,7	81,4	78
Q.D.13	Pertes Joule moteur (W)	$3 \cdot R \cdot I_{eff}^2$	2218	2162	2162	2162	2052	1616
Q.D.14	Autres pertes moteur (W)	$P_{abs} - P_{Joule} - P_u$	785,7	2227,7	2423,7	2688,7	2844,6	2944
Q.D.16	Pertes onduleur (W)	$P_o - P_{abs}$	1917	1471	1460	1458	1455	1329

Q.D.15. Les 2 autres principales pertes dans le moteur sont :

- les pertes fer (dépendantes de la vitesse et du flux) = Pertes Hystérésis (P_H) et par courant de Foucaud (P_F) avec $P_H = k_1 \cdot \Phi^2 \cdot \Omega$ et $P_F = k_2 \cdot \Phi^2 \cdot \Omega^2$
- les pertes mécaniques (dépendantes de la vitesse) = Pertes par frottements visqueux (P_v) et sec (P_s) avec $P_v = f \cdot \Omega^2$ et $P_s = C_s \cdot \Omega$

Q.D.17. Les 2 principales pertes dans l'onduleur sont :

- les pertes par conduction (dépendantes de l'amplitude du courant) présentes dans les composants actifs et passifs.
- les pertes de commutation (dépendantes de la fréquence de commutation) présentes dans les composants actifs et circuits d'aide à la commutation.

Q.D.18. $V_{ino} = V_i + V_{nno}$ avec ($i = a, b$ ou c)

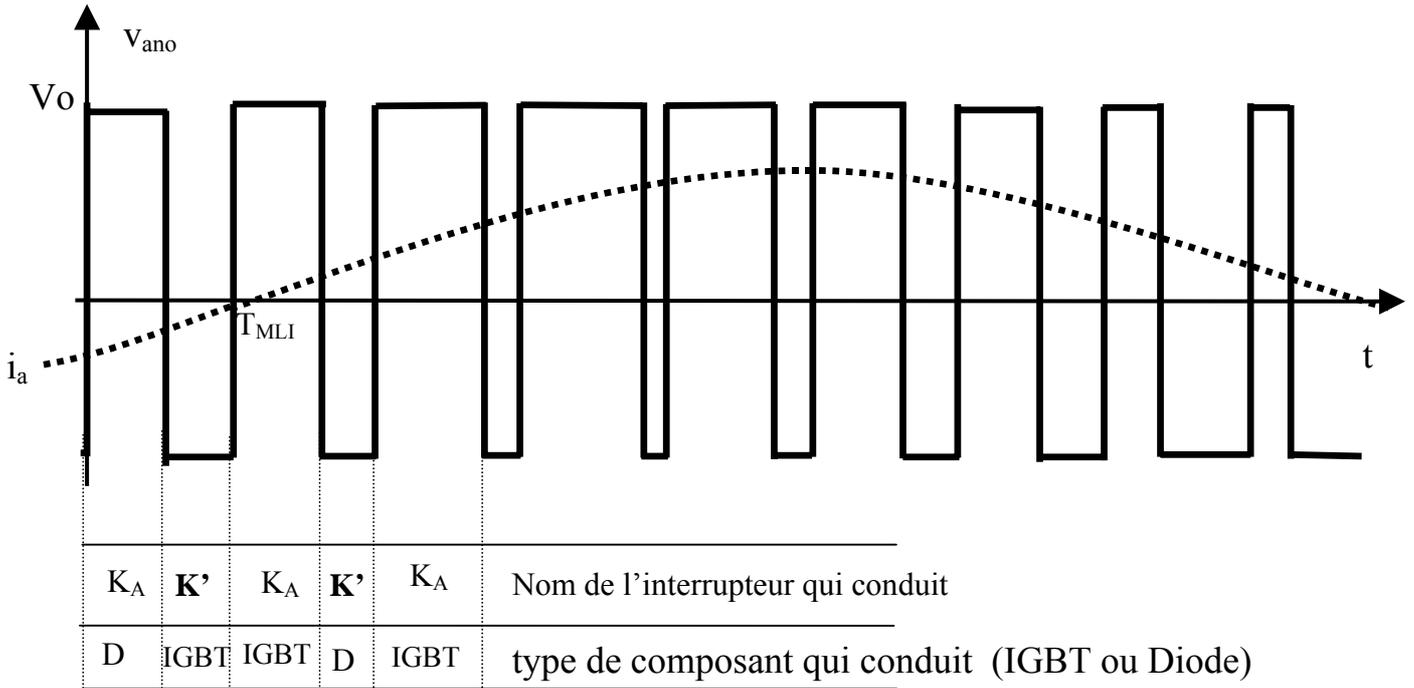
Q.D.19. $\underline{V_{nno}} = 1/3 (V_{ano} + V_{bno} + V_{cno})$

Q.D.20.
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ano} \\ V_{bno} \\ V_{cno} \end{bmatrix}$$

Q.D.21. $\underline{\langle \hat{V}_i \rangle} = V_0$ pour $\alpha_{TMLI} = 1 \rightarrow \langle V_{i \text{ eff}} \rangle = V_0/\sqrt{2} = \underline{\underline{\langle V_{i \text{ eff}} \rangle = 0,707 V_0}}$

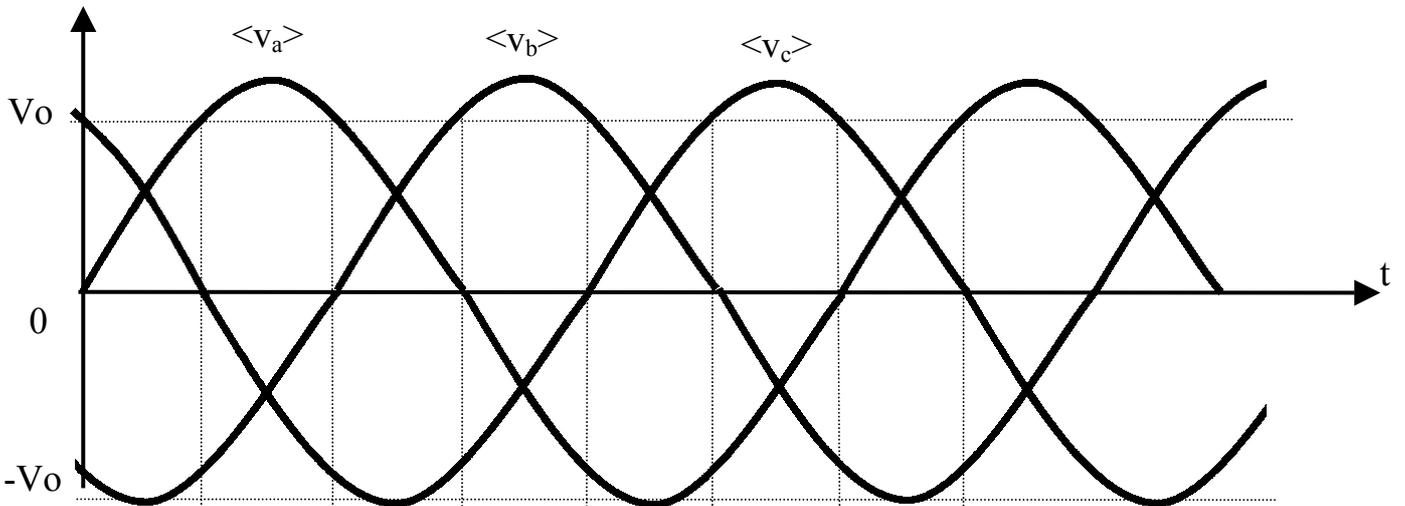
Q.D.22. $\underline{\langle \hat{U}_{ij} \rangle} = \sqrt{3} * V_0 = \underline{\underline{\langle \hat{U}_{ij} \rangle = 1,732 V_0}}$

Q.D.23.

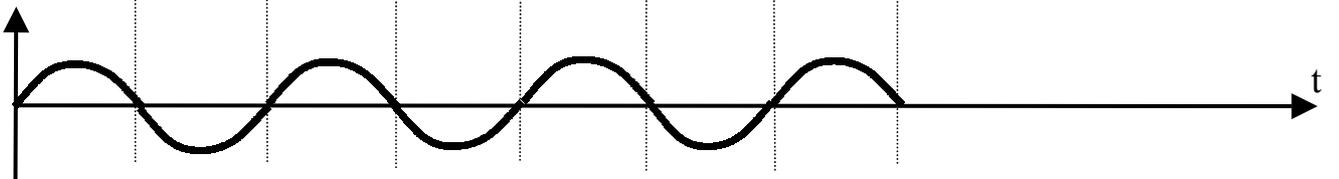


Q.D.24. $\langle \hat{V}_i \rangle = (2/\sqrt{3}) \cdot V_o = \langle \hat{V}_i \rangle = 1,15 \cdot V_o \rightarrow \langle V_{i\text{eff}} \rangle = 2 \cdot V_o / \sqrt{6} = \langle V_{i\text{eff}} \rangle = 0,816 V_o$

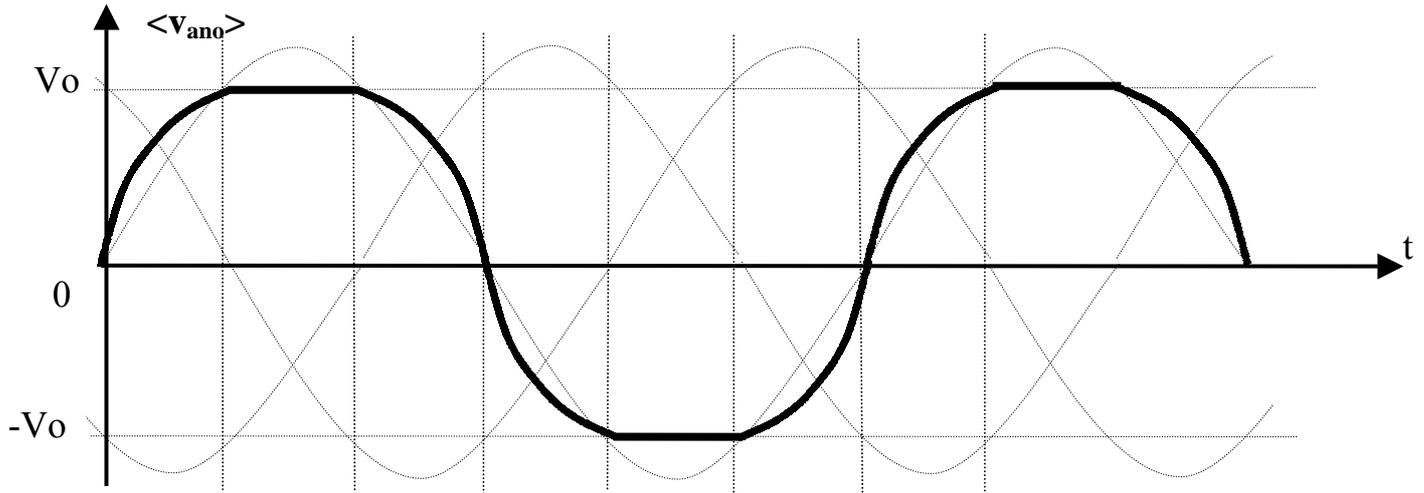
Q.D.25. $\langle v_{ino} \rangle = \langle \hat{V}_{ino} \rangle = V_o$



Q.D.26.

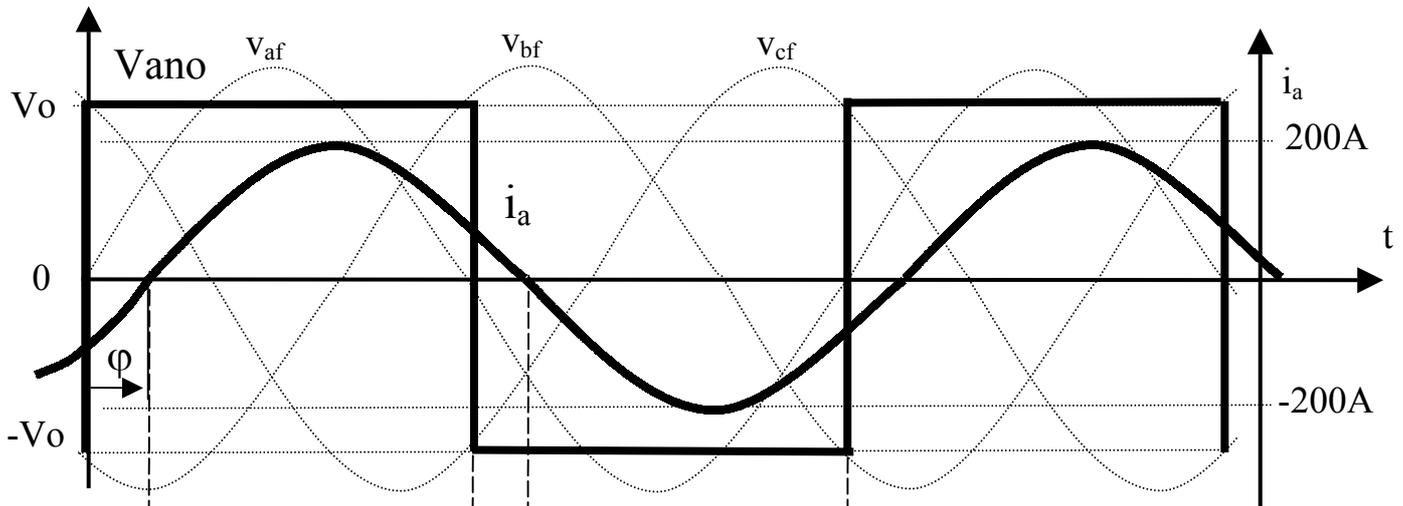


Q.D.27.



Q.D.28. Voir Vano tracer sur la figure suivante en phase avec v_{af}

Q.D.29. Voir i_a tracer sur la figure suivante avec un déphasage de φ de 30° en retard sur la tension fondamentale v_{af} ($\cos \varphi = 0,866$ AR)



Q.D.31.

K_A	K_A	K'_A	K'_A	Nom de l'interrupteur qui conduit K_A ou K'_A
D	IGBT	D	IGBT	

Q.D.30. $\hat{V}_{if} = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi V_0 \sin \theta d\theta = \frac{2 \cdot V_0}{\pi} [-\cos \theta]_0^\pi = \frac{4 \cdot V_0}{\pi} = 1,27V_0 \rightarrow \hat{V}_{if\text{eff}} = \frac{4 \cdot V_0}{\pi \cdot \sqrt{2}} = 0,9V_0$

Q.D.32. Chaque diode conduit 30° sur 360° , ce qui correspond à $30/360 = 8,33\%$
 Chaque IGBT conduit 150° sur 360° , ce qui correspond à $150/360 = 41,67\%$

Q.D.33. Les diodes s'ouvrent au zéro de courant et les IGBT se ferment au zéro de courant

Les IGBT s'ouvrent lorsque le courant vaut $200 \cdot \sin 30^\circ = 100A$ et les diodes se ferment pour le même courant : $100A$.

	IGBT	Diode
Ouverture	100 A	0 A
Fermeture	0 A	100 A

Q.D.34. Sur la courbe $I_c = f(V_{CE})$ de l'annexe, on a pour 100 A : $V_{CE} = 1,5$ V pour $V_{GE} = 15$ V

→ la chute de tension aux bornes de l'IGBT vaut donc 1,5 V

Q.D.35. Calculer de façon littérale la puissance perdue par conduction (P_{dl}) dans un IGBT en prenant :

$$P_{dl} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi} (V_{oI} + R_d \cdot I \cdot \sin(\theta - \pi/6)) \cdot I \cdot \sin(\theta - \pi/6) d\theta = \frac{V_{oI} \cdot I}{2\pi} \left[-\cos(\theta - \pi/6) \right]_{\pi/6}^{\pi} + \frac{R_d \cdot I^2}{4\pi} \left[\theta - \frac{\sin 2(\theta - \pi/6)}{2} \right]_{\pi/6}^{\pi}$$

$$P_{dl} = \frac{V_{oI} \cdot I}{2\pi} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right] + \frac{R_d \cdot I^2}{4\pi} \left[\pi - \frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right] \Rightarrow \underline{P_{dl} = 0,297 V_{oI} \cdot I + 0,243 R_d \cdot I^2}$$

Q.D.36. Application numérique : $P_{dl} = 95$ W

Q.D.37. Sur la courbe $I_F = f(V_F)$ de l'annexe, on a pour 100 A : $V_F = 1,2$ V pour $V_{GE} = 0$ V

→ la chute de tension aux bornes des diodes vaut donc 1,2 V

Q.D.38. Calculer de façon littérale la puissance perdue par conduction (P_{dd}) dans une diode en prenant :

$$P_{dd} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/6} (V_{od} + R_{dd} \cdot I \cdot \sin(\pi/6 - \theta)) \cdot I \cdot \sin(\pi/6 - \theta) d\theta = \frac{V_{od} \cdot I}{2\pi} \left[\cos(\pi/6 - \theta) \right]_0^{\pi/6} + \frac{R_{dd} \cdot I^2}{4\pi} \left[\theta + \frac{\sin 2(\pi/6 - \theta)}{2} \right]_0^{\pi/6}$$

$$P_{dd} = \frac{V_{od} \cdot I}{2\pi} \left[1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] + \frac{R_{dd} \cdot I^2}{4\pi} \left[\frac{\pi}{6} - \frac{\sqrt{3}}{4} \right] \Rightarrow \underline{P_{dd} = 0,0213 V_{od} \cdot I + 0,00721 R_{dd} \cdot I^2}$$

Q.D.39. Application numérique : $P_{dl} = 4,5$ W

Q.D.40. Dans la documentation du module 2MBI 400N-060 (annexe), pour $V_{GE} = \pm 15$ V, $V_{cc} = 300$ V, $R_G = 4,7 \Omega$ et pour une température de jonction de 125 degrés, la valeur de l'énergie perdue par cycle dans un IGBT lors de l'ouverture est de 7 mJ lorsque $I_{IGBT} = 100$ A.

Q.D.41. $P_{ci} = 500 \cdot 0,007 = 3,5$ W de pertes de commutation de l'IGBT à l'ouverture.

Q.D.42. Pertes totales dans un module composé de 2 diodes et de 2 IGBT vaut :

$$P_{module} = 2 \cdot 95 + 2 \cdot 3,5 + 2 \cdot 4,5 = 206 \text{ W}$$

Éléments de réponse de la partie E

Q.E.1. La température la plus élevée du circuit est θ_3 , et elle vaut 95°C

Q.E.2. Q.E.2. $\frac{\theta_3 + \theta_4}{2} - \theta_{\text{ambiante}} = R_{\text{th}(w-a)} \cdot P_{\text{totale}}$ avec $\theta_{\text{ambiante}} = 45^\circ\text{C}$, $R_{\text{th}(w-a)} = 0,0093^\circ\text{C/W}$

et $P_{\text{totale}} = P_o - P_u = 18581 - 14572 = 4009 \text{ W} \rightarrow \theta_4 = \underline{69,56^\circ\text{C}}$

Q.E.3. la différence entre θ_4 et θ_3 est de $95 - 69,56 = 25,44^\circ\text{C}$ et la masse d'eau doit évacuer 4009 W soit 4009 J par seconde $\rightarrow 4009/4.184 = 958,17 \text{ cal/s}$

Il faut $958,17/25,44$ gramme d'eau par seconde de débit = 37,66 g/s $\rightarrow 37,66 \cdot 3600/1000 = \underline{135 \text{ l/h}}$

Q.E.4. L'onduleur a $P_o - P_{\text{abs}}$ de pertes = $18581 - 17603 = 978 \text{ W} \rightarrow 233,75 \text{ J/s}$ avec un débit de 37,66g/s alors la température de l'eau s'élève de $233,75/37,66 = 6,2^\circ\text{C}$

D'où $\theta_2 = \theta_4 + 6,2 = \underline{\theta_2 = 75,8^\circ\text{C}}$

Q.E.5. Les pertes de l'onduleur valent 978 W

\rightarrow pertes dans 1 diode vaut $978/(3 \cdot 6) = P_d = 54,33 \text{ W}$ et $P_I = 108,66 \text{ W}$ dans 1 IGBT.

Comme la température du boîtier (θ_C) est commune au 2 composants

donc $(\theta_{J_I} - \theta_{J_D}) = R_{\text{th}(j-c)} \cdot P_I - R_{\text{th}(j-c)} \cdot P_d$ avec $R_{\text{th}(j-c)} = 0,085^\circ\text{C/W}$ et $R_{\text{th}(j-c)} = 0,15^\circ\text{C/W}$ (Doc)

$(\theta_{J_I} - \theta_{J_D}) = 0,085 \cdot 108,66 - 0,15 \cdot 54,33 = \underline{(\theta_{J_I} - \theta_{J_D}) = 1,08^\circ\text{C}}$

Q.E.6. c'est la jonction de l'IGBT la plus élevée, $\theta_C = \theta_{J_I} - R_{\text{th}(j-c)} \cdot P_I = 125 - 0,085 \cdot 108,66$

$\theta_C = \underline{115,8^\circ\text{C}}$

Q.E.7. $\theta_{P_f} = \theta_C - R_{\text{th}(c-f)} \cdot 2 \cdot (P_I + P_d) = 115,8 - 0,025 \cdot 2 \cdot (108,66 + 54,33) = \underline{\theta_{P_f} = 107,6^\circ\text{C}}$

Q.E.8. $(\theta_1 + \theta_2)/2 = \theta_{P_f} - R_{\text{th}(pf-w)} \cdot P_{\text{tOnd}} = (69 + 75)/2 = 72^\circ\text{C}$

D'où $R_{\text{th}(pf-w)} = (\theta_{P_f} - (\theta_1 + \theta_2)/2) / P_{\text{tOnd}} = (107,6 - 72) / 978 = \underline{R_{\text{th}(pf-w)} = 0,0364^\circ\text{C/W}}$

Q.E.9. $(\theta_2 + \theta_3)/2 = \theta_{C_m} - R_{\text{th}(m-w)} \cdot P_{\text{tMot}} = (75 + 94)/2 = 84,5^\circ\text{C}$ et $P_{\text{tMot}} = P_{\text{abs}} - P_u = 3031 \text{ W}$

D'où $R_{\text{th}(m-w)} = (\theta_{C_m} - (\theta_2 + \theta_3)/2) / P_{\text{tMot}} = (120 - 84,5) / 3031 = \underline{R_{\text{th}(m-w)} = 0,0117^\circ\text{C/W}}$

Éléments de réponse de la partie F

Q.F.1. $i_{a\text{ref}} = -I_{\text{ref}} \sin(\theta + v_{\text{ref}})$ et $i_{b\text{ref}} = -I_{\text{ref}} \sin(\theta + v_{\text{ref}} - 2\pi/3)$

Q.F.2. $\theta = p.\Omega.t$ donc $i_{a\text{ref}} = -I_{\text{ref}} \sin(p.\Omega.t + v_{\text{ref}})$ et $i_{b\text{ref}} = -I_{\text{ref}} \sin(p.\Omega.t + v_{\text{ref}} - 2\pi/3)$

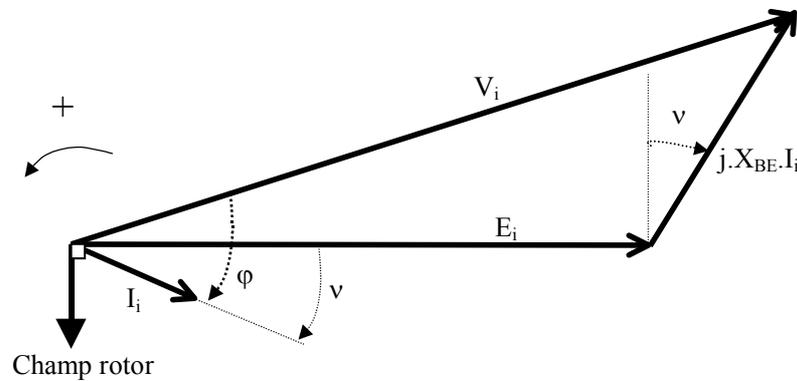
Q.F.3. $f = p.\Omega_{\text{max}} / 2\pi = p.N_{\text{max}} / 60 = 4*8000/60 = \underline{f = 533 \text{ Hz}}$

Q.F.4. $C_{\text{el}}.\Omega = 3.E_{i\text{eff}}.I_{\text{ref}}\text{eff}.\cos v_{\text{ref}} = (3/2).K.\Phi.p.\Omega.I_{\text{ref}}.\cos v_{\text{ref}}$

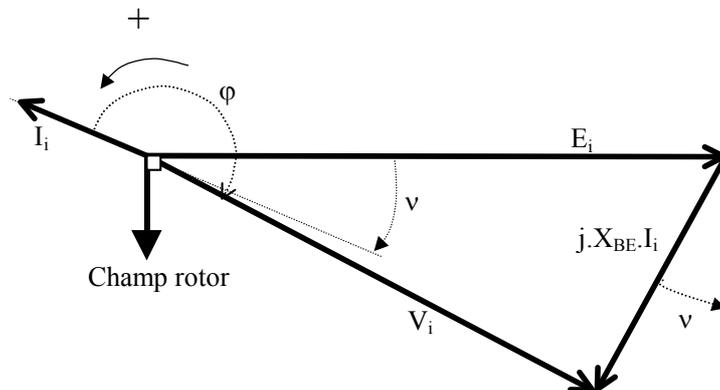
D'où $C_{\text{el}} = (3/2).K.\Phi.p.I_{\text{ref}}.\cos v_{\text{ref}}$

Q.F.5. A.N. $C_{\text{el}} = 83,13 \text{ Nm}$ pour $p = 4$, $K.\Phi = 0,08 \text{ Nm/A}$, $I_{\text{ref}} = 200\text{A}$ et $v_{\text{ref}} = -30^\circ$

Q.F.6. $L_{\text{BE}} = 0,2\text{mH}$, $p\Omega = \omega = 1000 \text{ rd/s}$ d'où $X_{\text{BE}}.I_{\text{ref}} = 0,0002*1000*200 = 40\text{V}$
et $E = K.\Phi.p.\Omega = 0,08*1000 = 80 \text{ V}$ avec $v = -30^\circ$ et $\underline{V_i} = \underline{E_i} + \underline{R.I_i} + \underline{j.X_{\text{BE}}.I_i}$



Q.F.7. $I_{\text{ref}} = -200 \text{ A}$. Le mode de fonctionnement de la machine est Alternateur



Q.F.8. Si $i_a + i_b + i_c = 0$, on a $\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P_r^{-1}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}$ alors

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}(i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - 2\pi/3) + i_c \cos(\theta - 4\pi/3)) \quad \text{et } i_c = -(i_a + i_b)$$

$$\rightarrow i_d = \sqrt{2}(i_a \cos(\theta - \pi/6) + i_b \sin\theta)$$

$$i_q = -\sqrt{\frac{2}{3}}(i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 2\pi/3) + i_c \sin(\theta - 4\pi/3)) \quad \text{et } i_c = -(i_a + i_b)$$

$$\rightarrow i_q = \sqrt{2}(i_a \sin(\theta + 5\pi/6) + i_b \cos \theta)$$

d'où $P_r^{-1}(\theta) = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \sin \theta \\ \sin(\theta + \frac{5\pi}{6}) & \cos \theta \end{bmatrix}$ d'autres valeurs sont possibles

Q.F.9. $\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = P_r^{-1}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \frac{\pi}{6}) & \sin \theta \\ \sin(\theta + \frac{5\pi}{6}) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \end{bmatrix}$

Et avec $i_{aref} = -I_{ref} \sin(\theta + v_{ref})$ et $i_{bref} = -I_{ref} \sin(\theta + v_{ref} - 2\pi/3)$

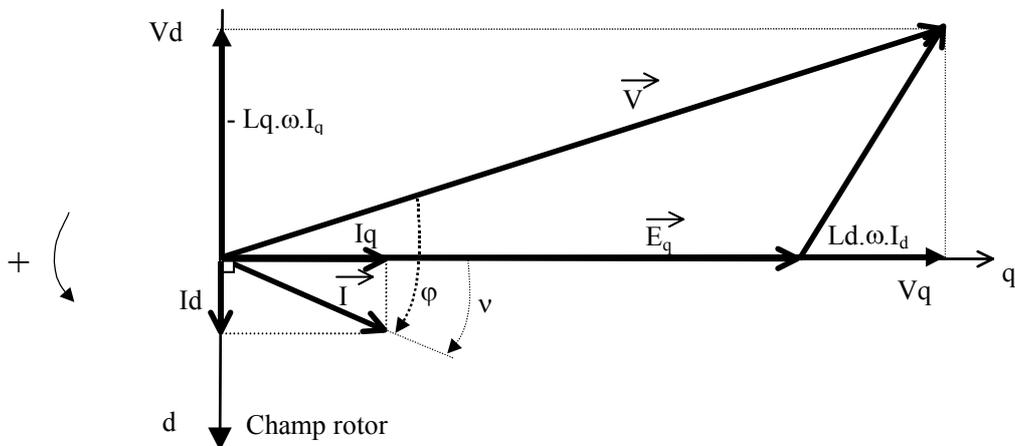
Après calcul on a $i_{dref} = -\sqrt{\frac{3}{2}} I_{ref} \sin(v_{ref})$ et $i_{qref} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{ref} \cos(v_{ref})$

Q.F.10. On a les vecteurs de tensions et de courants : $\vec{V} = \vec{V}_d + \vec{V}_q$ et $\vec{I} = \vec{I}_d + \vec{I}_q$

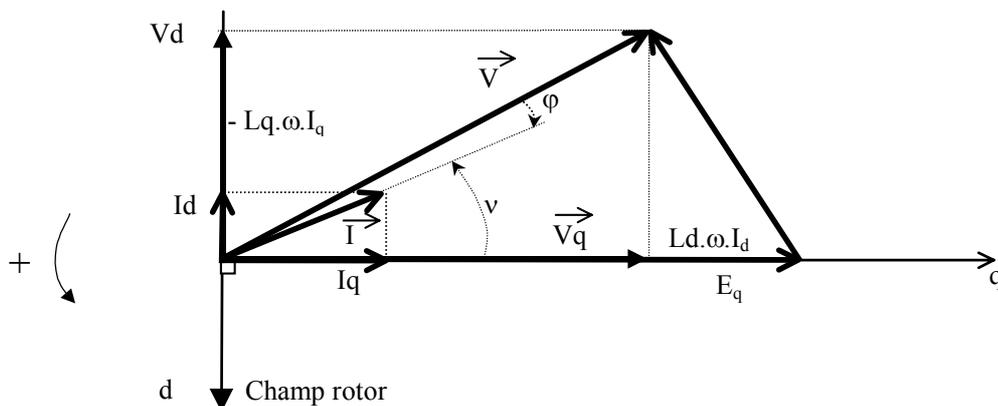
Pour $p = 4$, $K \cdot \Phi = 0,08 \text{ Nm/A}$, $I_{ref} = 200 \text{ A}$, $v_{ref} = -30^\circ$, $L_d = L_q = 0,2 \text{ mH}$, $\omega = 1000 \text{ rd/s}$

d'où $L_d \cdot \omega = L_q \cdot \omega = 0,0002 * 1000 = 0,2 \Omega$ et $E_q = \sqrt{\frac{3}{2}} K \cdot \Phi \cdot \omega = \sqrt{\frac{3}{2}} 0,08 * 1000 = 98 \text{ V}$

- $V_q = E_q + L_d \cdot \omega \cdot I_d$
- $V_d = -L_q \cdot \omega \cdot I_q$



Q.F.11. Avec $v_{ref} = +30^\circ$.



Q.F.12. Vitesse < 2000 t/mn → $i_{dref} = 0$ et $v_{ref} = 0$

Q.F.13. Vitesse > 2000 t/mn, → signes de $i_{dref} < 0$ et l'angle $v_{ref} > 0$

Le courant I_d négatif permet de défluxer la machine avec les courants statoriques (A.tour négatif dans l'axe d) et provoque une diminution de V (image du flux total ; rotor + stator)

$$\mathbf{Q.F.14.} \quad P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Q.F.15. En régime permanent, la fréquence des courants i_{dref} et i_{qref} est nulle (composantes continues)

Q.F.16. Pour la commande « ab », les régulateurs doivent avoir une bande passante supérieure à la fréquence des courants régulés, c'est à dire supérieur à 533 Hz même en régime permanent. En régime transitoire, la bande passante est suffisante avec celle nécessaire en régime permanent (> 533Hz)

Pour la commande « dq », les régulateurs pourraient avoir une bande passante très faible pour le régime permanent car les courants régulés sont continus. Par contre, en régime transitoire, la bande passante est imposée par la dynamique du couple (> 30Hz). En conclusion, la bande passante des régulateurs des courants I_d et I_q doivent avoir une bande passante supérieur à 30 Hz.

Pour l'implantation dans un calculateur, la deuxième commande nécessite un calculateur bien moins performant même si il doit réaliser les transformées directes et inverses (mais ces transformées peuvent aussi facilement être réalisées par des circuits spécialisées extérieurs au calculateur : FPGA,...)