

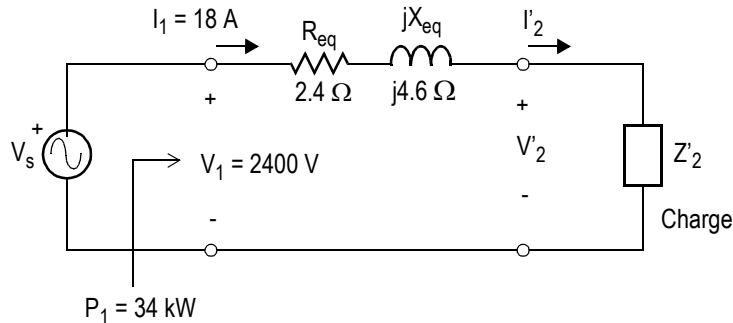
Problème no. 1 (25 points)

a)

- **Calculer** la tension V_2 (valeur efficace) au secondaire et le facteur de puissance à la charge (6 points)

(Pour cette question, on néglige la branche parallèle du circuit équivalent)

Le circuit équivalent réfléchi au primaire simplifié (la branche parallèle est négligée) est montré dans la figure suivante:

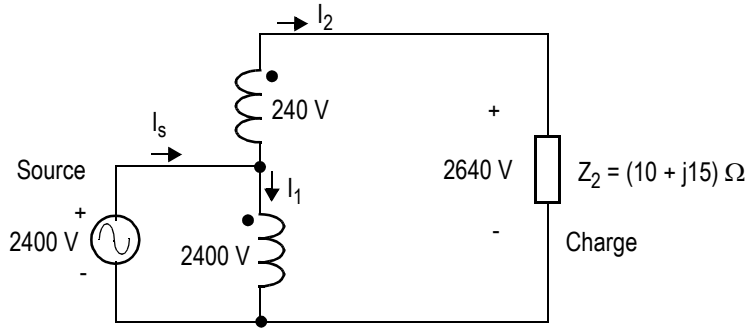
Le rapport de transformation est égal à: $a = 2400/240 = 10$ La puissance apparente au primaire est: $S_1 = V_1 \times I_1 = 2400 \times 18 = 43200 \text{ VA}$ La puissance réactive au primaire est égale à: $Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{(43200)^2 - (34000)^2} = 26650 \text{ VAR}$ La puissance active dans la charge est: $P_2 = P_1 - R_{eq} I_1^2 = 34000 - 2.4 \times 18^2 = 33222 \text{ W}$ La puissance réactive dans la charge est: $Q_2 = Q_1 - X_{eq} I_1^2 = 26650 - 4.6 \times 18^2 = 25160 \text{ VAR}$ La puissance apparente de la charge est: $S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{33222^2 + 25160^2} = 41674 \text{ VA}$ La valeur efficace de la tension V_2' est: $|V_2'| = \frac{S_2}{|I_2'|} = \frac{41674}{18} = 2315.24 \text{ V}$ La tension V_2 au secondaire est: $|V_2| = \frac{|V_2'|}{a} = \frac{2315.24}{10} = 231.52 \text{ V}$ Le facteur de puissance de la charge est: $\text{fp}_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{33222}{41674} = 0.797 \text{ AR}$ - **Calculer** les pertes Fer et les pertes Cuivre dans le transformateur (6 points)Les pertes Fer dans le transformateur: $P_{\text{Fer}} = \frac{V_1^2}{R_c} = \frac{2400^2}{12000} = 480 \text{ W}$ Les pertes Cuivre dans le transformateur: $P_{\text{Cu}} = R_{eq} \times I_1^2 = 2.4 \times 18^2 = 777.6 \text{ W}$ - **Calculer** le rendement du transformateur dans ces conditions de fonctionnement (3 points)

Le rendement du transformateur dans ces conditions de fonctionnement:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fer}} + P_{\text{Cu}}} = \frac{33222}{33222 + 480 + 777.6} = 0.9635$$

Remarque: Dans la partie précédente, en négligeant la branche parallèle, on a commis une erreur de 480 W (pertes Fer qu'on a négligée) dans le calcul de P_2 et une certaine erreur sur le calcul de V_2 .

b)

- Tracer le schéma de câblage de l'autotransformateur. (5 points)- Calculer la valeur efficace du courant I_s débité par la source et la puissance active P_s fournie par la source. (5 points)

La valeur efficace du courant I_2 est: $|I_2| = \frac{|V_2|}{|Z_2|} = \frac{2640}{\sqrt{10^2 + 15^2}} = 146.44 \text{ A}$

La valeur efficace du courant I_1 est: $|I_1| = |I_2| \times \frac{240}{2400} = 146.44 \times \frac{240}{2400} = 14.64 \text{ A}$

La valeur efficace du courant I_s est: $|I_s| = |I_1| + |I_2| = 146.44 + 14.64 = 161.08 \text{ A}$

La puissance active fournie par la source est égale à la puissance active dans la charge car il n'y pas de pertes dans le transformateur (supposé idéal):

$$P_s = P_2 = R_2 |I_2|^2 = 10 \times (146.44)^2 = 214.45 \text{ kW}$$

Remarque:

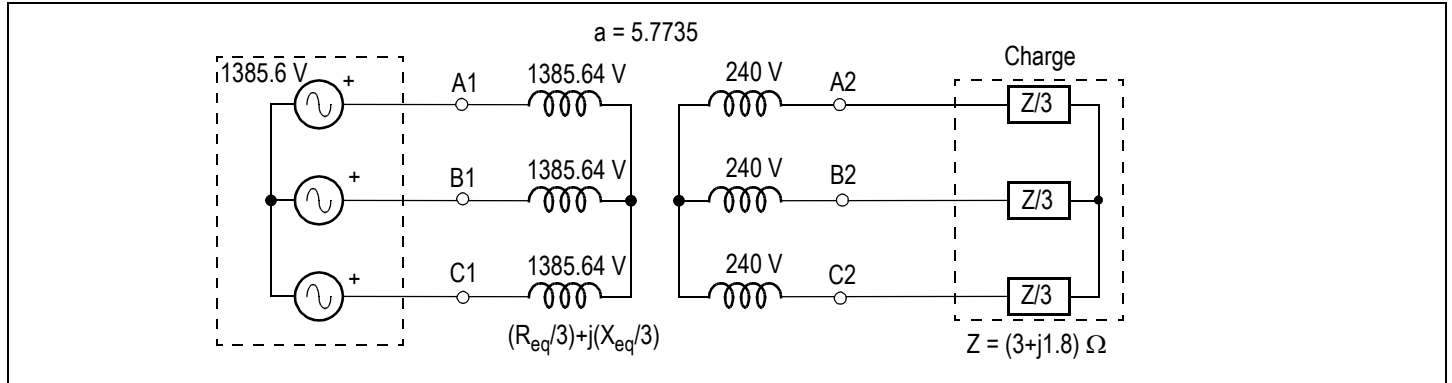
Ici, on a pu obtenir la valeur efficace de I_s en additionnant les valeurs efficaces de I_1 et I_2 parce que ces deux courants sont en phase.

Problème no. 2 (25 points)

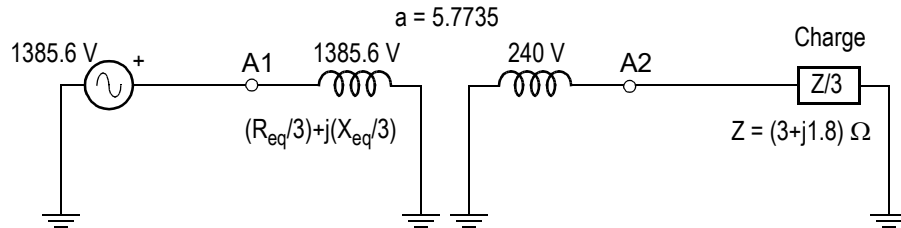
a)

- **Tracer** le circuit monophasé équivalent du système. (Bien indiquer les valeurs des éléments) (6 points)

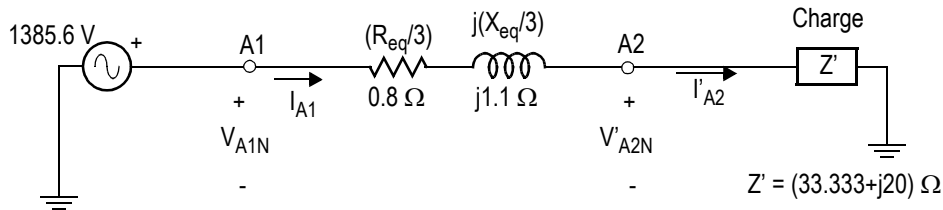
Le circuit équivalent Y-Y du système est montré dans la figure suivante:



Le circuit monophasé équivalent:



Le circuit monophasé équivalent réfléchi au primaire:

- **Calculer:**

- . le courant de ligne au primaire (valeur efficace) (4 points)
- . la tension ligne-ligne au secondaire (valeur efficace) (4 points)
- . le rendement du transformateur triphasé dans ces conditions de fonctionnement (4 points)

Le courant de ligne au primaire est égal à:

$$I_{A1} = \frac{V_{A1N}}{\left(\frac{R_{eq}}{3} + \frac{jX_{eq}}{3}\right) + Z'} = \frac{1385.6 \angle 0^\circ}{(0.8 + j1.1) + (33.333 + j20)} = 34.530 \angle -31.7^\circ \text{ A}$$

La valeur efficace du courant de ligne au primaire est donc 34.530 A.

La tension ligne-neutre secondaire réfléchi au primaire est:

$$V_{A2N}' = Z' \times I_{A1} = (33.333 + j20)(34.530 \angle -31.7^\circ) = 1342.29 \angle -0.8^\circ \text{ V}$$

La valeur efficace de la tension ligne-ligne au secondaire est:

$$|V_{A2B2}| = \sqrt{3} \times \frac{|V_{A2N}'|}{5.7735} = \sqrt{3} \times \frac{1342.29}{5.7735} = 402.69 \text{ V}$$

On calcule **pour une phase**:

$$\text{. Puissance active délivrée à la charge} \quad P_2 = 33.333 \times 34.530^2 = 39744 \text{ W}$$

$$\text{. Pertes Cuivre} \quad P_{Cu} = 0.8 \times 34.530^2 = 953.9 \text{ W}$$

. Pertes Fer $P_{\text{Fer}} = \frac{1385.6^2}{R_c/3} = \frac{1385.6^2}{(15\text{k}\Omega)/3} = 384 \text{ W}$

Le rendement du transformateur dans ces conditions de fonctionnement est:

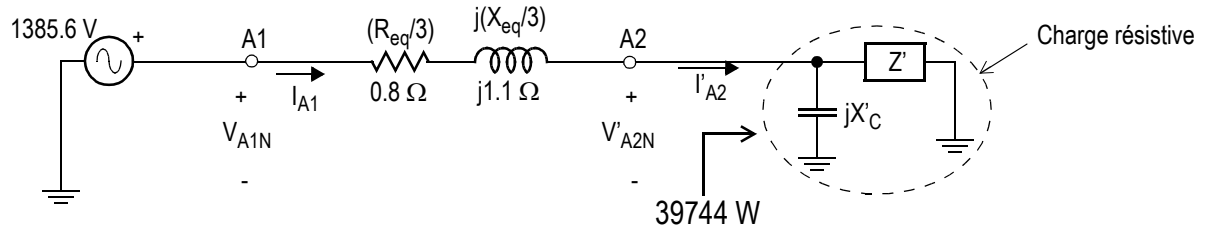
$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}}} = \frac{39744}{39744 + 953.9 + 384} = 0.967$$

b) Un banc de condensateurs triphasé est connecté en parallèle avec la charge pour amener le facteur de puissance de la charge à 1.0.

- **Calculer** le courant de ligne au primaire (valeur efficace). (7 points)

La charge devient alors résistive et dissipe la même puissance active qu'avant la connexion des condensateurs.

Le circuit monophasé équivalent réfléchi au primaire:



Pour une phase, la puissance active dans la charge est 39744 W.

On suppose que la tension V'_{A2N} demeure la même après la connexion du condensateur: $|V_{A2N}'| = 1342.29 \text{ V}$

Le courant I'_{A2} (qui est égal à I_{A1}) sera donc: $I_{A2}' = I_{A1} = \frac{39744}{1342.29} = 29.609 \text{ A}$

Problème no. 3 (25 points)a) Calculer la valeur moyenne de V_{cc} lorsque la charge est déconnectée. (6 points)La valeur moyenne de V_{cc} lorsque la charge est connectée est égale à:

$$v_{cc}(\text{moy}) = V_d = R \times I_{cc} = 12\Omega \times 18.7\text{A} = 224.4\text{V}$$

La résistance interne équivalente est égale à: $R_d = \frac{3L_s\omega}{\pi} = \frac{3 \times 3 \times 10^{-3} \times 120\pi}{\pi} = 1.08\Omega$ La valeur moyenne de V_{cc} lorsque la charge est déconnectée (c'est à dire lorsque $I_d = 0$) est égale à:

$$v_{cc}(\text{moy})|_{\text{sans charge}} = V_{d0} \cos \alpha = v_{cc}(\text{moy}) + R_d I_d = 224.4\text{V} + 1.08\Omega \times 18.7\text{A} = 244.60\text{V}$$

b)

Déterminer l'angle d'amorçage α (en degré). (4 points)La tension V_{d0} est égale à:
$$V_{d0} = \frac{3(\sqrt{3}V_m - 2 \times 1.5\text{V})}{\pi} = \frac{3\left(\sqrt{3}\frac{240\sqrt{2}}{\sqrt{3}} - 2 \times 1.5\text{V}\right)}{\pi} = 321.25\text{V}$$
L'angle d'amorçage est égal à:
$$\alpha = \arccos\left(\frac{V_{d0} \cos \alpha}{V_{d0}}\right) = \arccos\left(\frac{244.60\text{V}}{321.25\text{V}}\right) = 40.4^\circ$$
Déterminer l'angle de commutation μ (en degré). (4 points)L'angle de commutation est donné par la relation suivante:
$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu) = \left(\frac{2L_s\omega}{\sqrt{3}V_m}\right) I_d$$
On écrit:
$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha + \left(\frac{2L_s\omega}{\sqrt{3}V_m}\right) I_d = \cos(40.4^\circ) - \frac{2 \times 3 \times 10^{-3} \times 120\pi}{\sqrt{3}\frac{240\sqrt{2}}{\sqrt{3}}} \times 18.7 = 0.6368$$
Alors:
$$(\alpha + \mu) = \arccos(0.6368) = 50.4^\circ$$
L'angle de commutation est donc égal à:
$$\mu = (\alpha + \mu) - \alpha = 50.4^\circ - 40.4^\circ = 10^\circ$$
c) Calculer les quantités suivantes:

- la puissance P_{cc} dissipée dans la charge (3 points)
- les pertes par conduction dans les six thyristors (3 points)
- le facteur de la puissance à l'entrée du convertisseur (5 points)

La puissance P_{cc} dissipée dans la charge est égale à:
$$P_{cc} = V_d \times I_d = 224.4\text{V} \times 18.7\text{A} = 4196.28\text{W}$$
(On peut utiliser cette expression parce que le courant I_d est pratiquement une constante)

La puissance dissipée dans les six thyristors est donnée par la relation suivante:

$$P_{TH} = 6 \times \left(\frac{1}{3} \times V_F \times I_d\right) = 6 \times \left(\frac{1}{3} \times 1.5\text{V} \times 18.7\text{A}\right) = 56.1\text{W}$$

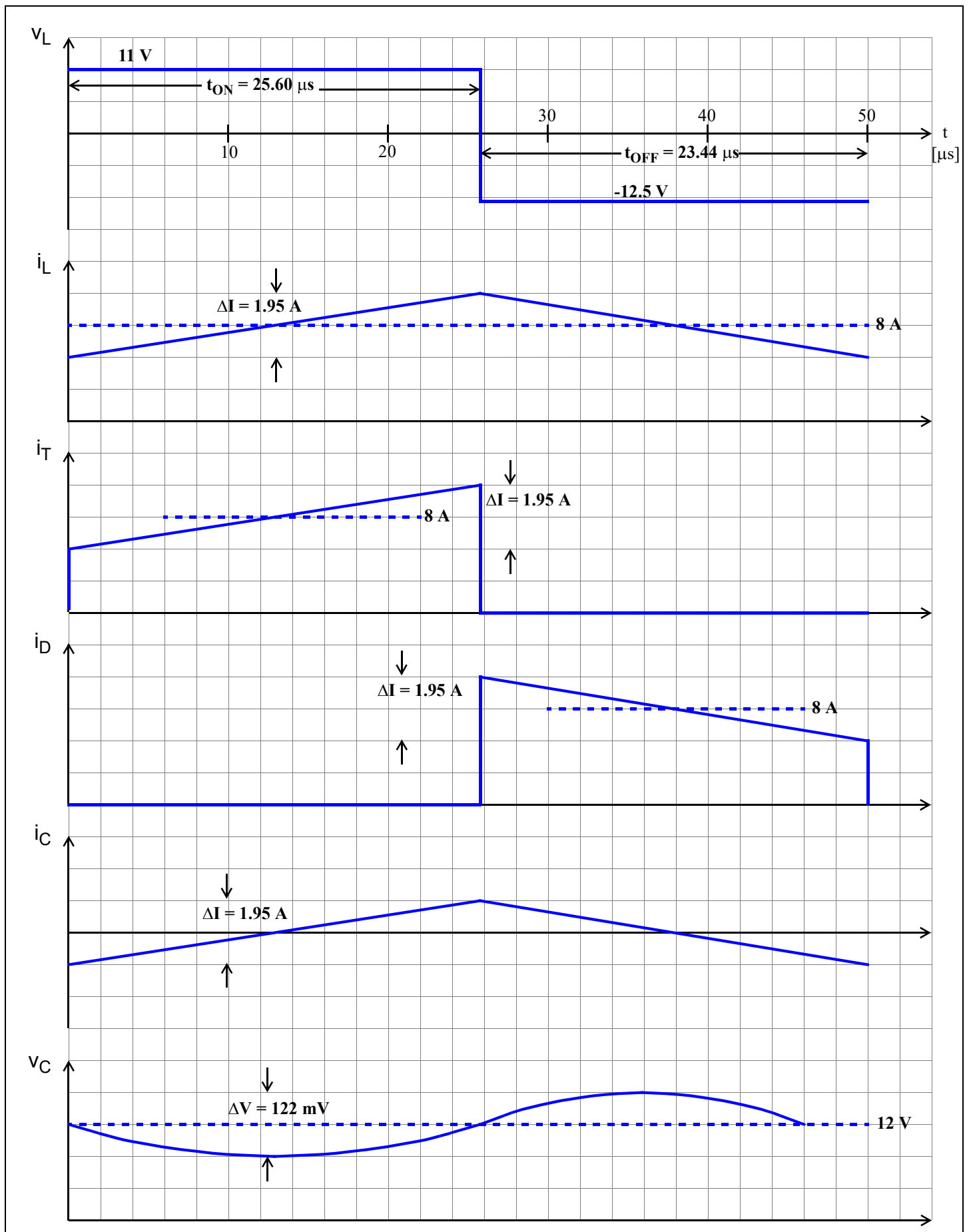
La puissance active à l'entrée du redresseur est:
$$P_{src} = P_{cc} + P_{TH} = 4196.28\text{W} + 56.1\text{W} = 4252.38\text{W}$$
La valeur efficace du courant I_A est égale à:
$$I_A = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 18.7\text{A} = 15.2685\text{A}$$

La puissance apparente à l'entrée du redresseur est:

$$S_{src} = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_A = \sqrt{3} \times 240 \times 15.2685 = 6347\text{VA}$$

Le facteur de puissance à l'entrée du convertisseur est:
$$\text{fp} = \frac{P_{src}}{S_{src}} = \frac{4252.38}{6347} = 0.67$$

Problème no. 4 (25 points)a) **Déterminer** le rapport cyclique α du hacheur. (4 points)La tension v_L lorsque le transistor est en conduction est égale à: $v_L(t_{ON}) = 24V - 1V - 12V = 11V$ La tension v_L lorsque le transistor est bloqué est égale à: $v_L(t_{OFF}) = -0.5V - 12V = -12.5V$ La valeur moyenne de v_L doit être égale à 0 en régime permanent.En conséquence, on doit avoir la condition suivante: $v_L(t_{ON}) \times t_{ON} + v_L(t_{OFF}) \times t_{OFF} = 0$ On a donc: $11t_{ON} = 12.5t_{OFF}$ On déduit:
$$\alpha = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{1}{1 + \frac{11}{12.5}} = \frac{12.5}{23.5} = 0.5319$$
On calcule: $t_{ON} = \alpha \times 50\mu s = 0.5319 \times 50\mu s = 26.596\mu s$ $t_{OFF} = 50\mu s - 26.596\mu s = 23.404\mu s$ b) **Tracer** en fonction du temps la tension v_L aux bornes de l'inductance, le courant i_L dans l'inductance, le courants i_T dans l'IGBT, le courants i_D dans la diode D, le courant i_C dans le condensateur C et la tension v_C aux bornes du condensateur C. (9 points)



c) **Calculer** l'ondulation du courant i_L et l'ondulation de la tension v_C . (5 points)

L'ondulation du courant i_L est donnée par la relation suivante:

$$\Delta I = \frac{1}{L} \times v_L(t_{ON}) \times t_{ON} = \frac{1}{150\mu H} \times 11V \times 26.596\mu s = 1.95A$$

L'ondulation de la tension v_C est donnée par la relation suivante:

$$\Delta V = \frac{\Delta q}{C} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{\Delta I}{2}\right) \times \left(\frac{T_s}{2}\right)}{C} = \frac{1}{8} \times \frac{1}{C} \times \Delta I \times T_s = \frac{1}{8} \times \frac{1}{100\mu F} \times 1.95A \times 50\mu s = 122mV$$

d) **Calculer** les pertes par conduction et les pertes par commutation dans l'IGBT et dans la diode. (5 points)

Les pertes par conduction dans le transistor:

$$P_T(\text{cond}) = \alpha \times V_{CE(\text{on})} \times I_T = 0.5319 \times 1V \times 8A = 4.255W$$

Les pertes par conduction dans la diode:

$$P_D(\text{cond}) = (1 - \alpha) \times V_F \times I_D = 0.4681 \times 0.5V \times 8A = 1.872W$$

Les pertes par commutation dans le transistor:

$$P_T(\text{com}) = \frac{V_s I_s}{3} \times \frac{t_c}{T_s} = \frac{23.5V \times 8A}{3} \times \frac{1\mu s}{50\mu s} = 1.253W$$

Les pertes par commutation dans la diode:

$$P_D(\text{com}) = \frac{V_s I_s}{3} \times \frac{t_c}{T_s} = \frac{23V \times 8A}{3} \times \frac{1\mu s}{50\mu s} = 1.227W$$

Déduire le rendement du hacheur (2 points).

Le rendement du hacheur est donné par la relation suivante:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + \text{Pertes}}$$

où $P_o = 12V \times 8A = 96W$

$$\text{Pertes} = 4.255W + 1.872W + 1.253W + 1.227W = 8.607W$$

Finalement: $\eta = \frac{96W}{96W + 8.607W} = 0.918$