

Réseau de distribution multi-énergies (thermique, hydraulique, éolien, solaire)



Un système de production d'énergie hybride ou système multi-énergie est un système qui intègre dans sa production des énergies de natures différentes. On exclut dans cette notion les grands réseaux interconnectés où bien souvent les énergies sont de natures différentes.

A l'île de la Réunion, l'objectif est de devenir autonome à l'horizon 2025. Les moyens de production classiques, à l'aide d'alternateurs représentent 550 MW. Cette production est issue principalement des centrales thermiques mixte charbon-bagasse, fioul et des centrales hydrauliques. Par ailleurs la croissance de la consommation d'énergie est de 8 % par an environ.

La réunion a un gisement solaire intéressant, jusqu'à $5,6 \text{ kWh.m}^{-2}$ de moyenne par jour (moyenne calculée sur un an). Le potentiel éolien est important du aux Alizés.

La recherche et l'atteinte de l'autonomie énergétique passe par l'intégration dans le réseau électrique des moyens de production à base d'énergies renouvelables. Cependant la "petitesse" du réseau électrique et son isolement contraint à un taux limite d'injection des énergies alternatives.

De plus la nature fluctuante et intermittente de ces énergies et la non-corrélation de la production à la consommation rend difficile leur intégration dans le réseau.

La part d'hybridation de chaque énergie est donc problématique dans ce réseau.

On souhaite montrer à travers ce TD les principes physiques mis en jeu pour la conversion de l'énergie primaire, les adaptations de la chaîne de conversion et les réglages des transferts de puissance au réseau ainsi que l'architecture d'un tel réseau de distribution multi-énergie ou système de génération hybride SGH.

Partie1 : principe de conversion mis en jeu dans un panneau photovoltaïque

Dans cette partie on s'intéresse à la conversion de l'énergie de la lumière. L'énergie des photons est convertie en électricité par la cellule photovoltaïque. On cherche à répondre à la question suivante : **comment l'énergie de la lumière est-elle convertie en courant électrique ?**

Le potentiel solaire : puissance rayonnée par le soleil

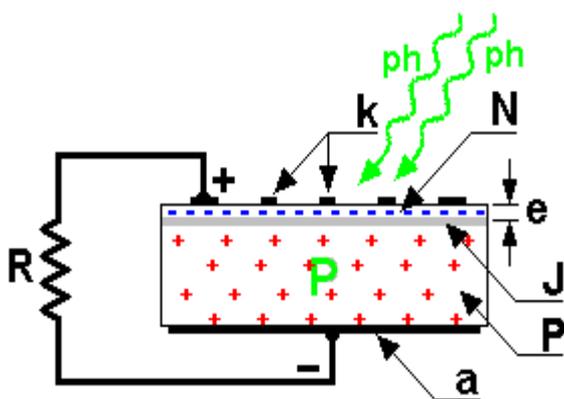
On considère l'émittance M (W.m^{-2}) du soleil (théorie du corps noir) :

La loi de Stefan nous donne : $M = \sigma.T^4$, où $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$.

La température de surface du soleil est de 5770 K, et le rayon du soleil R_s est de 696000 km.

1. **Exprimer** puis **calculer** la puissance totale rayonnée par le soleil.

Principe d'une cellule photovoltaïque :



Un cristal semi-conducteur dopé **P** est recouvert d'une zone très mince dopée **N** et d'épaisseur **e** égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction **J**.

La zone **N** est couverte par une grille métallique qui sert de cathode **k** tandis qu'une plaque métallique **a** recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm.

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode et si une charge est connectée à la cellule, elle peut provoquer la circulation d'un courant électrique (photo-courant).

2. **Calculer** l'énergie E d'un photon si $\lambda = 400 \text{ nm}$ et $\lambda = 700 \text{ nm}$.

On rappelle que $E = h \cdot \nu$ et $\lambda = c \cdot T$ avec $T = \frac{1}{\nu}$.

Où h constante de Planck, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; c la célérité de la lumière $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

La lumière visible contient des photons dont l'énergie varie entre 1,8 et 3,1 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

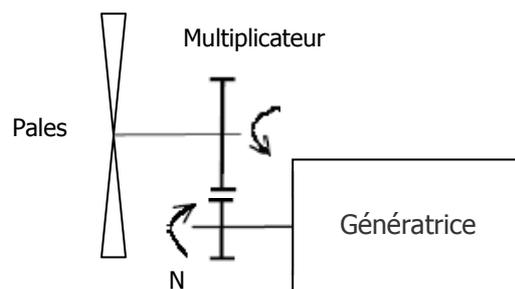
L'intensité de la lumière solaire à la surface terrestre (hors atmosphère) est d'environ 1369 W.m^{-2} . Si l'énergie moyenne d'un photon est de 2 eV ($\lambda = 600 \text{ nm}$).

3. **Calculer** le nombre de photons frappant une surface de 1 cm^2 à chaque seconde.

4. Si on considère que chaque photon délivre un électron **calculer** la densité de courant en A.cm^{-2} .

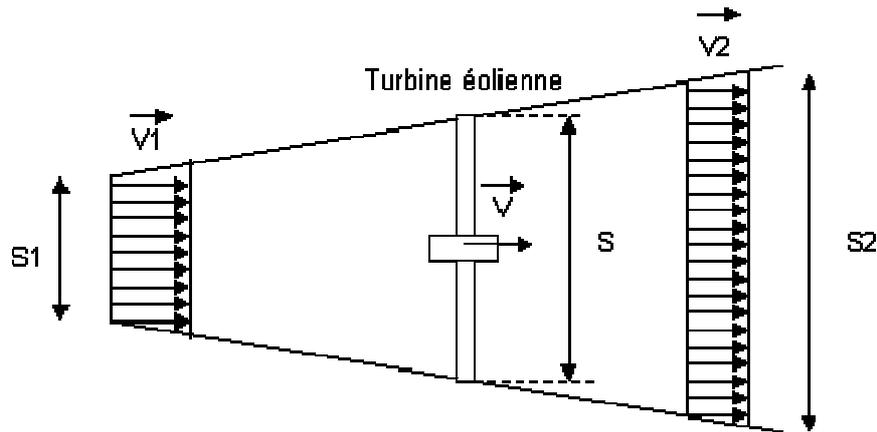
Partie 2 : principe de conversion dans l'éolienne

Dans cette partie on répond à la question suivante : **comment l'énergie du vent est-elle convertie en énergie électrique ?**



L'énergie du vent est convertie en énergie mécanique de rotation puis en électricité par des génératrices conformément à la figure ci-dessus.

On modélise le passage du vent, dans le rotor de l'hélice par un tube de courant d'air, avec V_1 , V et V_2 , respectivement les vitesses du vent avant les pales, au niveau des pales, et après les pales. L'air est caractérisé par sa masse volumique ρ (kg.m^{-3}), la surface balayée par les pales est S (m^2).



Rappel : l'énergie cinétique W_c (J) d'une masse m (kg) en translation à la vitesse V (m.s^{-1}) est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} . m . V^2 .$$

5. Quelle est la variation d'énergie cinétique dw_c de la masse d'air dm qui passe pendant un temps dt de la vitesse V_1 à la vitesse V_2 ?

6. La masse d'air $dm = \rho . dl . S$ où dl est la distance parcourue pendant dt . **En déduire** l'expression de la puissance de cette masse d'air.

7. On montre que $V = \frac{dl}{dt} = \frac{V_1 + V_2}{2}$. On posera $k . V_1 = V_2$. **Exprimer** P en fonction de V_1 , k , S et ρ .

8. **En déduire** la valeur de k qui rend la puissance maximale. Cette valeur maximale est appelée limite de Betz.

9. On donne $\rho = 1,25 \text{ kg.m}^{-3}$ et $V_1 = 10 \text{ m.s}^{-1}$. **Calculer** alors la puissance maximale théorique pour une éolienne dont les pales atteignent un diamètre $d = 77 \text{ m}$.

Cette énergie mécanique est ensuite convertie en énergie électrique grâce à l'emploi de génératrice.

Partie 3 : principe de l'échange d'énergie dans un réseau hybride

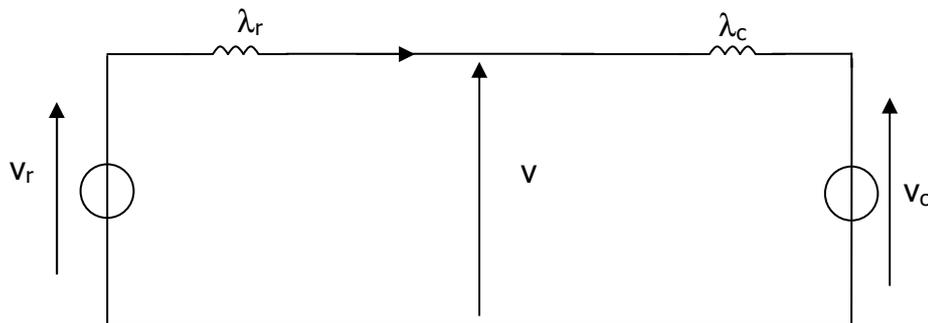
Dans cette partie on répond à la question suivante : **comment contrôler le transfert de la puissance au réseau électrique ?**

Le réseau électrique sera modélisé par une source de tension $v_r(t)$ avec en série une inductance λ_r .

$$v_r(t) = V_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t).$$

On connecte à travers une inductance λ_c une source de tension que l'on peut contrôler en fréquence, en amplitude et en phase. On suppose que cette tension est parfaitement sinusoïdale de telle sorte qu'elle obéit à la loi suivante :

$$v_c(t) = V_c \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_c \cdot t - \beta).$$



10. **Exprimer** l'intensité du courant qui circule entre les deux sources de tension. **Représenter** l'allure de i pour $F_r = 50$ Hz, $F_c = 52,5$ Hz et $\beta = 60^\circ$ sur une durée de 0,6 seconde. On prendra $\lambda_r = 0,005$ H, $\lambda_c = 0,001$ H et $V_c = V_r = 230$ V.

11. **Exprimer** la puissance instantanée de la source v_r du réseau électrique.

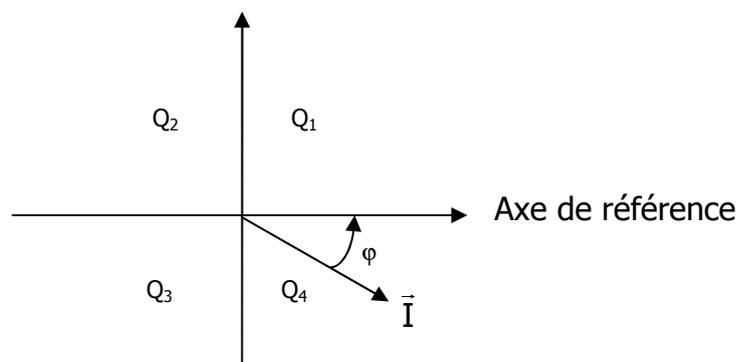
12. **Exprimer** la puissance moyenne de la source v_r lorsque $\omega_c = \omega_r$.

13. **Commenter** le signe de la puissance moyenne en fonction de β .

On peut utiliser les notations complexes et en particulier les diagrammes de Fresnel.

On considère que $i_c(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t - \varphi)$. La tension du réseau est prise comme référence.

On définit les quadrants de fonctionnement suivants :



On affecte le plan complexe à cette représentation et on considère un point d'affixe $a+jb$

Le quadrant Q_1 est caractérisé par $a > 0$ et $b > 0$, le quadrant Q_2 par $a < 0$ et $b > 0$, le quadrant Q_3 par $a < 0$ et $b < 0$ et le quadrant Q_4 par $a > 0$ et $b < 0$.

Ainsi le vecteur \vec{I} sera associé au complexe $\underline{I} = I.e^{-j\varphi} = I.\cos\varphi - jI.\sin\varphi = a - jb$ (Q_4).

14. La puissance apparente est donnée par $\underline{S} = \underline{V}_c.\underline{I}^*$. **Donner** le signe de la puissance active et réactive dans chaque cas.

Partie 4 : étude de l'impact au point de livraison.

Dans cette partie on répond à la question : **comment est influencée la tension délivrée en fonction des grandeurs qui caractérisent la source v_c ?**

Pour rendre compte de l'impact des grandeurs caractéristiques de v_c sur la tension au point de livraison on considère qu'aucune charge n'est connectée au réseau.

Les grandeurs qui caractérisent v_c sont la pulsation ω_r , sa valeur efficace, et son déphasage β .

15. **Ecrire** les deux équations différentielles qui régissent le circuit.

16. **Montrer** que $v = \frac{1}{\lambda_r + \lambda_c} . (\lambda_r . v_c + \lambda_c . v_r)$.

Incidence d'une variation de la fréquence de la source v_c .

On réalise $\beta = 0$ et $V_c = V_r$.

17. **Représenter** alors pour $\omega_c = 1,05.\omega_r$ la tension délivrée v pour une durée de 0,6 seconde. **Conclure**.

Incidence d'une variation d'amplitude : On réalise $\beta = 0$ et $\omega_c = \omega_r$.

si $v_c = 1,5.v_r$.

18. **Représenter** la tension v sur une durée de 0,1 seconde. **Préciser** la valeur efficace et son amplitude maximale. **Conclure**.

19. **Expliquer** en quelques mots la problématique de connexion d'une source contrôlable issue des énergies renouvelables que sont le vent et le soleil.

Partie 5 : réglage de la puissance transférée

On a vu au paragraphe 3, que pour transférer de la puissance au réseau électrique il faut maîtriser v_c à travers sa fréquence, son amplitude et son déphasage avec le réseau.

On se place dans le cas où l'injection au réseau est le plus proche de la production et donc $\lambda_c = 0$.

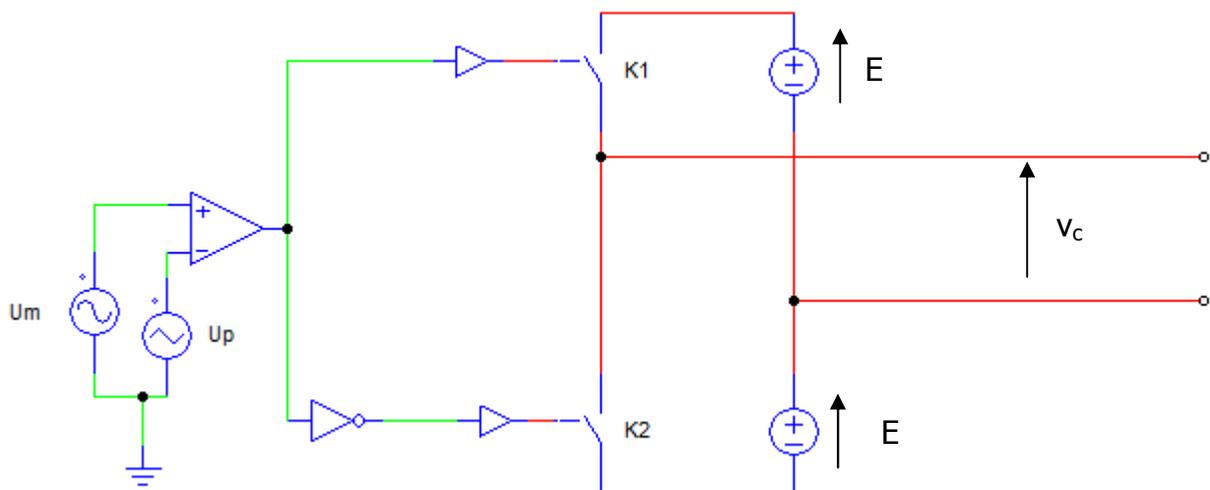
Dans ce paragraphe on répond à la question : **comment construire la tension v_c ?**

La tension v_c est obtenue grâce à l'emploi d'onduleur MLI. Le schéma de principe est le suivant :

On compare un signal sinusoïdal u_m de pulsation ω_r (modulante) avec un signal triangulaire (porteuse) de pulsation ω_p tel que $\omega_r \ll \omega_p$. Le signal délivré par le comparateur commande les interrupteurs k_1 et k_2 .

Le fonctionnement est le suivant : lorsque $u_m > u_p$ K_1 est fermé. Lorsque $u_m < u_p$ K_1 est ouvert. K_1 et k_2 ont un fonctionnement complémentaire.

T_p et T sont respectivement la période de la porteuse et la modulante.



20. **Préciser** la valeur de v_c lorsque K_1 est fermé, puis lorsque k_1 est ouvert.

u_m obéit à l'équation suivante : $u_m(t) = U_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t - \beta)$

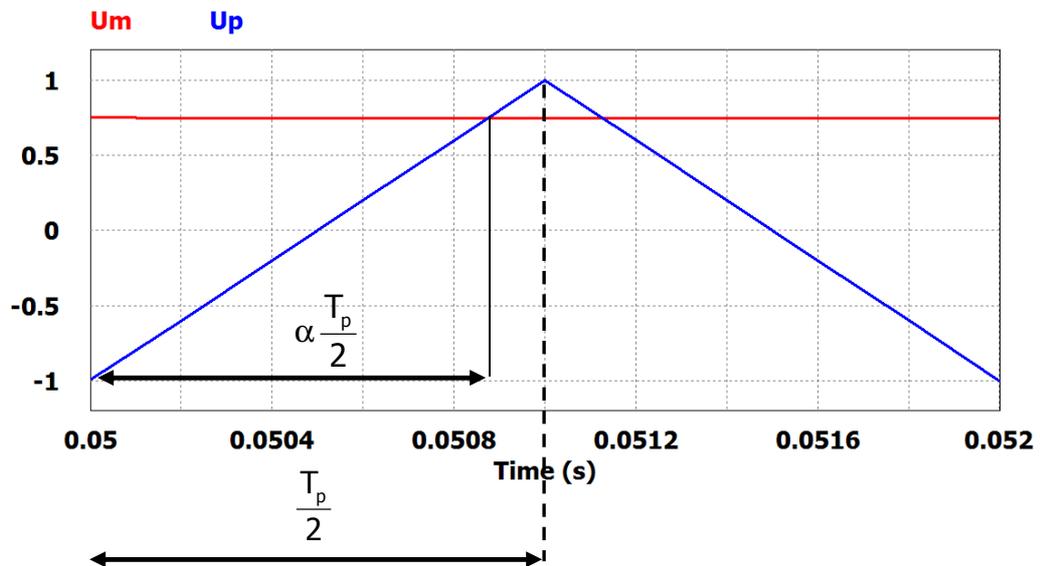
u_p est un signal triangulaire symétrique de pulsation $m \cdot \omega_r$ avec $m \gg 1$.

De telle sorte que sur une période du signal u_p on peut écrire :

$$u_m(t_k) = U_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot (t_k + T_p) - \beta) \Rightarrow u_m(k) \approx U_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot (k+1) \cdot T_p - \beta) \Rightarrow$$

$$\approx U_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot k \cdot T_p - \beta)$$

Avec $t_k = k \cdot T_p$. Autrement dit sur une période T_p on considère que la tension u_m est constante.



21. **Représenter** l'allure de v_c . **Exprimer** $\overline{v_c}$ en fonction de α le rapport cyclique du signal délivré en sortie du comparateur, sur une période T_p .

22. **Donner** l'équation de u_p de 0 à $\frac{T_p}{2}$. **Exprimer** alors α en fonction de u_m .

23. **Exprimer** $\overline{v_c}(t)$ puis **conclure**.

Partie 6 : architectures et topologies d'installation et connexion au réseau

Dans cette partie on s'intéresse à la chaîne de conversion et plus particulièrement aux fonctions qui concourent au transfert de puissance.

Les générateurs photovoltaïques génèrent une tension et un courant continu.

Leurs connexions au réseau électrique ne peuvent se faire qu'à travers des convertisseurs de l'électronique de puissance.

On montre qu'il est nécessaire de réaliser une adaptation d'impédance afin de prélever la puissance maximale et ce quelque soit le flux incident.

Pour ce faire une stratégie de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est mise en œuvre. On considère que l'algorithme destiné à trouver le MPP remplit parfaitement son rôle et que l'on connaît en toutes circonstances la puissance maximale extractible P_M .

On cherche à réaliser un courant en opposition de phase avec la tension du réseau.

Autrement dit $i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t - \pi)$.

24. **Donner** le diagramme vectoriel impliquant \bar{I} , \bar{V}_r et \bar{V}_c .

25. **Donner** la relation entre V_c , V_r , X et I . On posera $X = \lambda \cdot \omega_r$.

26. **Exprimer** alors V_c en fonction de V_r , X et P_M . **En déduire** l'expression de U_m .

27. **En déduire** l'expression de u_m . Pour $P_M = 3 \text{ kW}$, $\omega_r = 100 \cdot \pi$, $X = 1,88 \Omega$, $V_r = 230 \text{ V}$ et $E = 600 \text{ V}$. **Donner** l'expression numérique de u_m .

Dans la pratique, les caractéristiques du réseau et de la liaison des deux sources ne sont pas connues avec grande précision. De surcroît elles varient dans le temps en fonction de nombreux paramètres ou perturbations. On ne peut donc se satisfaire de l'équation de u_m précédente et donc d'un contrôle en boucle ouverte pour imposer la puissance P_M .

On réalise une boucle d'asservissement dont le rôle est d'imposer le courant i .

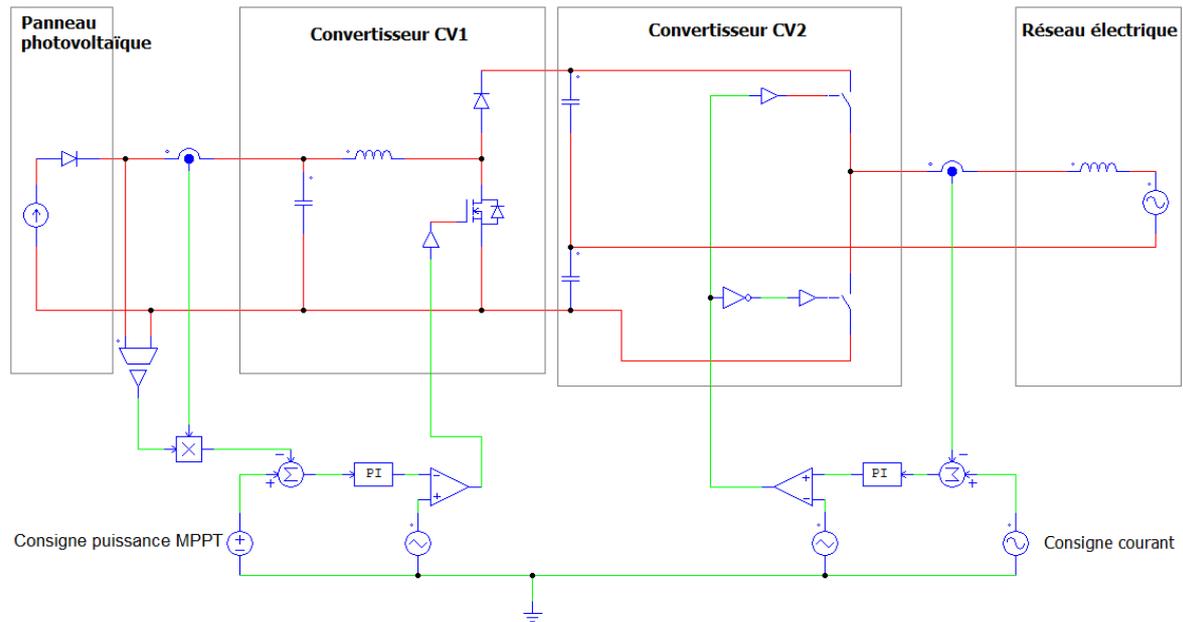
La chaîne de conversion complète est représentée ci-dessous. On note la présence de deux boucles d'asservissement, l'une affectée au convertisseur CV1 et l'autre à CV2.

28. **Donner** le nom et le rôle de CV1, et CV2. **Procéder** à une simulation avec le fichier **centrale solaire connecté réseau.psimsch**.

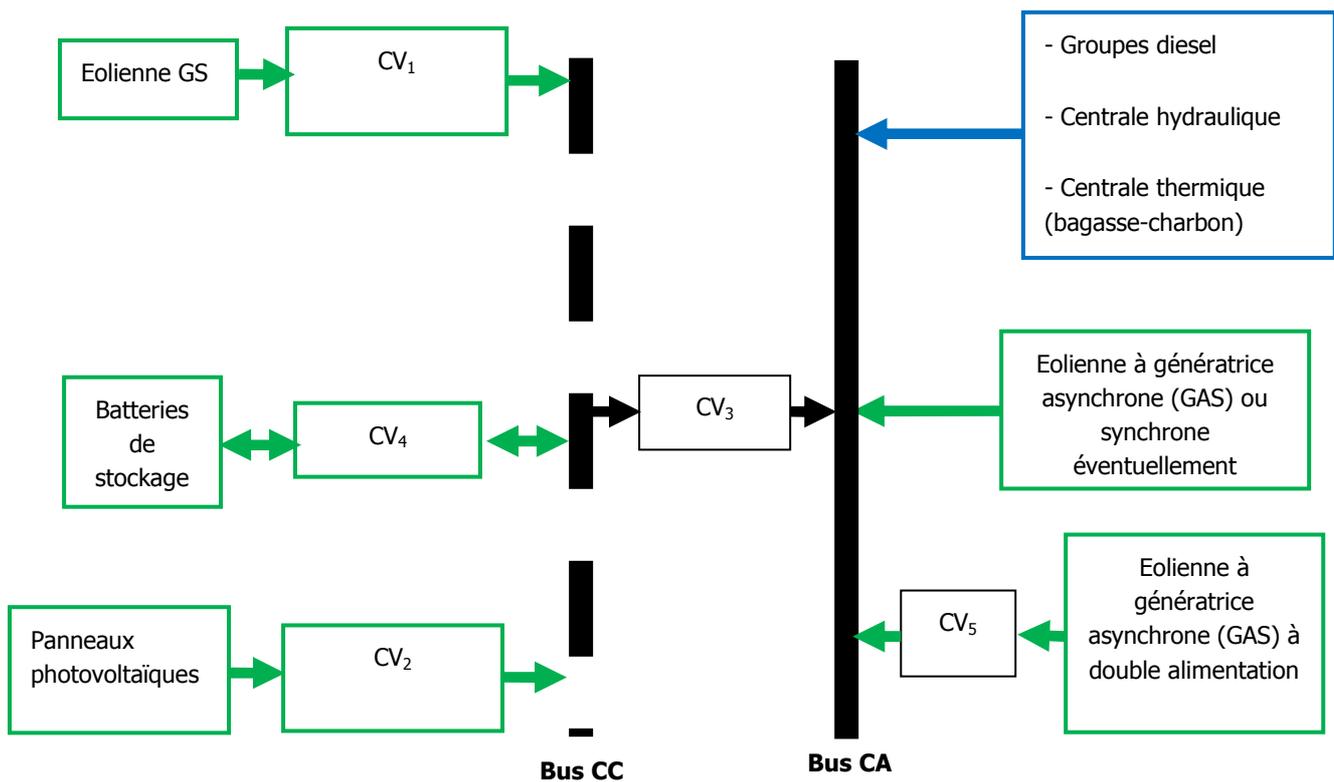


Attention dans ce schéma le réseau est en convention récepteur.

Mettre $P_M = 3000 \text{ W}$ et **calculer** l'amplitude de la consigne de courant. **Visualiser** alors i et v_r . **Visualiser** en particulier u_m pour **comparer** avec les valeurs de la question 27.



Une des topologies de principe des systèmes de génération hybride est la suivante :



Remarque : les éléments tels que transformateurs n'apparaissent pas dans cette représentation. CV₃ est en fait un ensemble de convertisseurs associés à chaque chaîne de conversion. Le bus continu (bus CC) n'est pas un bus unique chaque chaîne de conversion dispose de son propre bus CC.

Dans le cas des génératrices asynchrones à double alimentation le convertisseur CV_5 est un ensemble de redresseur-onduleur.

On connecte sur ce réseau une éolienne dont la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique repose sur une génératrice synchrone. La tension délivrée par la génératrice et la fréquence sont proportionnelles à la vitesse de rotation des pâles.

29. **Donner** le nom et le rôle des convertisseurs CV_1 , CV_2 , CV_3 et CV_4 qui interviennent dans le réseau hybride.

Éléments de correction

1. La puissance totale rayonnée par la surface du soleil P_s s'exprime de la manière suivante :

$$P_s = M.S = \sigma.T^4.S \text{ où } S \text{ est la surface du soleil.}$$

$$S = 4.\pi.R_s^2 \text{ d'où } \boxed{P_s = \sigma.T^4.4.\pi.R_s^2}.$$

$$P_s = 5,67.10^{-8}.5770^4.4.\pi.(696000000)^2$$

$$\boxed{P_s=3,82.10^{26} \text{ W}}$$

2. Energie d'un photon

$$\text{On a } \boxed{E(\lambda) = h.\frac{c}{\lambda}}.$$

$$E(400) = \frac{6,626.10^{-34}.3.10^8}{400.10^{-9}} \text{ et } E(700) = \frac{6,626.10^{-34}.3.10^8}{700.10^{-9}}$$

$$\boxed{E(400)=4,969.10^{-19} \text{ J et } E(700)= 2,839.10^{-19} \text{ J}}$$

3. On a une puissance surfacique hors-atmosphère de 1369 W.m^{-2} ce qui revient à dire qu'en une seconde on a une énergie de 1369 J.m^{-2} .

On obtient donc pour un cm^2 1369.10^{-4} J . L'énergie d'un photon est de $3,2.10^{-19} \text{ J}$.

$$\text{Donc } N = \frac{1369.10^{-4}}{3,2.10^{-19}} \text{ soit } \boxed{N=4,278.10^{17} \text{ photons}}.$$

4. Nous avons $4,278.10^{17}$ électrons en une seconde pour un cm^2 . Sachant qu'un électron porte une charge $|q| = 1,6.10^{-19} \text{ C}$ on a $\delta i = N.|q|$

$$\text{Soit } \delta i=68,45.10^{-3} \text{ C.s}^{-1} \text{ ou encore } \boxed{\delta i=68,45.10^{-3} \text{ A.cm}^{-2}}.$$

5. On a :
$$dw_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (V_2^2 - V_1^2)$$

6. On a :
$$P = \frac{dw_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot (V_2^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot dl}{dt} \cdot (V_2^2 - V_1^2) \Rightarrow$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2)$$

7. On a :
$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_2^2 - V_1^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + k \cdot V_1) \cdot (k^2 \cdot V_1^2 - V_1^2)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 (1 + k) \cdot (k^2 - 1)$$

8. Pour trouver la valeur de k qui rend la puissance maximale il convient de dériver P(k).

$$\frac{dP(k)}{dk} = 1 \cdot (k^2 - 1) + 2 \cdot k \cdot (1 + k) = 3 \cdot k^2 + 2 \cdot k - 1 = 0$$

On obtient
$$k = -1 \text{ et } k = \frac{1}{3}$$

K = -1 est une solution absurde car cela correspond à un vent de direction opposée aux pâles.

Donc
$$P\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left(\left(\frac{1}{3}\right)^2 - 1\right)$$

$$P\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3$$

9. Soit P_M la puissance maximale alors :

$$P_M = \frac{8}{27} \cdot 1,25 \cdot \frac{\pi \cdot 77^2}{4} \cdot 10^3$$

$$P_M = 1,72 \text{ MW}$$

10. La loi des mailles permet d'écrire :

$$v_r - (\lambda_r + \lambda_c) \cdot \frac{di}{dt} - v_c = 0$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{\lambda} \cdot (v_r - v_c) \Rightarrow i = \frac{1}{\lambda} \cdot \int (v_r - v_c) \cdot dt$$

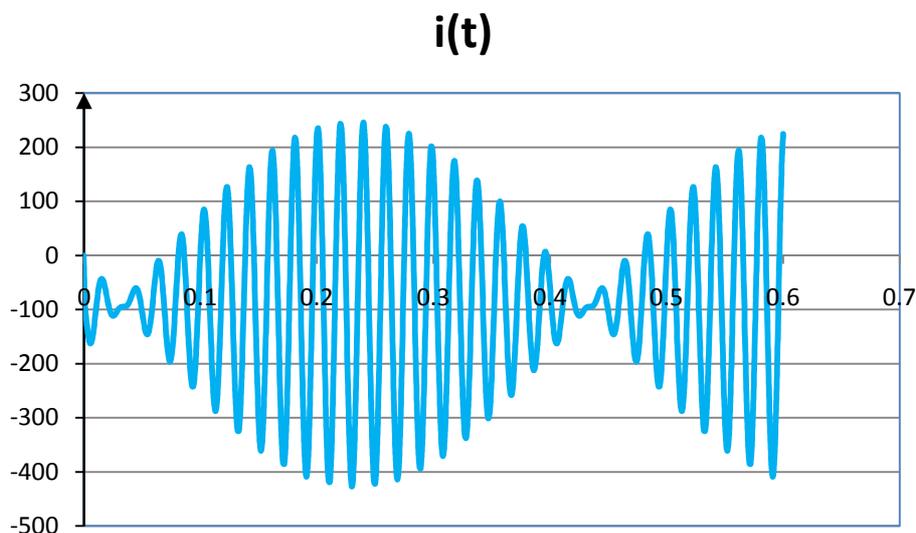
$$i = \frac{V_r \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_r} \cdot \cos(\omega_r \cdot t) - \frac{V_c \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_c} \cdot \cos(\omega_c \cdot t - \beta) + A \quad \text{Où } A \text{ est la constante d'intégration.}$$

A l'instant $t = 0$ on a $i(0) = 0$ A.

$$\text{D'où } A = \frac{V_c \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_c} \cdot \cos(\beta) - \frac{V_r \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_r}$$

$$i = \frac{V_r \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_r} \cdot \cos(\omega_r \cdot t) - \frac{V_c \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_c} \cdot \cos(\omega_c \cdot t - \beta) + \frac{V_c \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_c} \cdot \cos(\beta) - \frac{V_r \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_r}$$

Allure de i sur 0,6 seconde :



11. la puissance instantanée vue du réseau s'exprime par :

$$p_r = v_r \cdot i = V_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t) \cdot \left(\frac{V_r \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_r} \cdot \cos(\omega_r \cdot t) - \frac{V_c \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_c} \cdot \cos(\omega_c \cdot t - \beta) \right)$$

12. La puissance moyenne sur une période du réseau s'exprime par :

$$\bar{P} = P = \frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} V_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t) \cdot \left(\frac{V_r \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_r} \cdot \cos(\omega_r \cdot t) - \frac{V_c \cdot \sqrt{2}}{\lambda \cdot \omega_c} \cdot \cos(\omega_c \cdot t - \beta) \right) dt$$

$$\text{On a } \sin a \cdot \cos b = \frac{1}{2} \cdot (\sin(a + b) + \sin(a - b))$$

$$P = \frac{2}{T} \int_0^{T_r} \left[\frac{V_r^2}{\lambda \cdot \omega_r} \cdot \sin(\omega_r \cdot t) \cdot \cos(\omega_r \cdot t) - \frac{V_c \cdot V_r}{\lambda \cdot \omega_c} \sin(\omega_r \cdot t) \cdot \cos(\omega_c \cdot t - \beta) \right] dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{T_r} \left[\frac{V_r^2}{\lambda \cdot \omega_r} \cdot \sin(2 \cdot \omega_r \cdot t) - \frac{V_c \cdot V_r}{\lambda \cdot \omega_c} \cdot (\sin(2 \cdot \omega_r \cdot t - \beta) + \sin \beta) \right] dt$$

$$P = \frac{V_c \cdot V_r}{\lambda \cdot \omega_r} \cdot \sin \beta$$

13. lorsque $\beta < 0$ alors la puissance transite de la source V_c à la source V_r . On peut espérer en contrôlant l'angle de déphasage entre v_r et v_c , maîtriser le sens de transfert de la puissance.

14. On a : $\underline{S} = V_c \cdot I \cdot \cos \varphi + j \cdot V_c \cdot I \cdot \sin \varphi \Rightarrow P + jQ$, où P est la puissance active et Q la puissance réactive.

Une puissance positive signifie une absorption de puissance par la source v_c . $\varphi > 0$ pour Q_3 et Q_4 . Pour les autres quadrants $\varphi < 0$.

Q_1 : $P > 0$ et $Q < 0$.

Q_2 : $P < 0$ et $Q < 0$.

Q_3 : $P < 0$ et $Q > 0$.

Q_4 : $P > 0$ et $Q > 0$.

Remarque : on peut aussi réaliser quatre points particuliers.

$Q = 0$, alors $P > 0$ ou $P < 0$.

$P = 0$ et $Q > 0$ ou $Q < 0$ (compensateur d'énergie réactive).

$$15. \text{ On a : } v_r - \lambda_r \cdot \frac{di}{dt} = v \quad \text{et} \quad v - \lambda_c \cdot \frac{di}{dt} = v_c$$

16. On a un système d'équation :

$$\begin{cases} v_r - \lambda_r \cdot \frac{di}{dt} = v \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{1}{\lambda_r} \cdot (v_r - v) \\ v_c + \lambda_c \cdot \frac{di}{dt} = v \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{1}{\lambda_c} \cdot (v - v_c) \end{cases}$$

En faisant la soustraction entre ces deux équations on obtient :

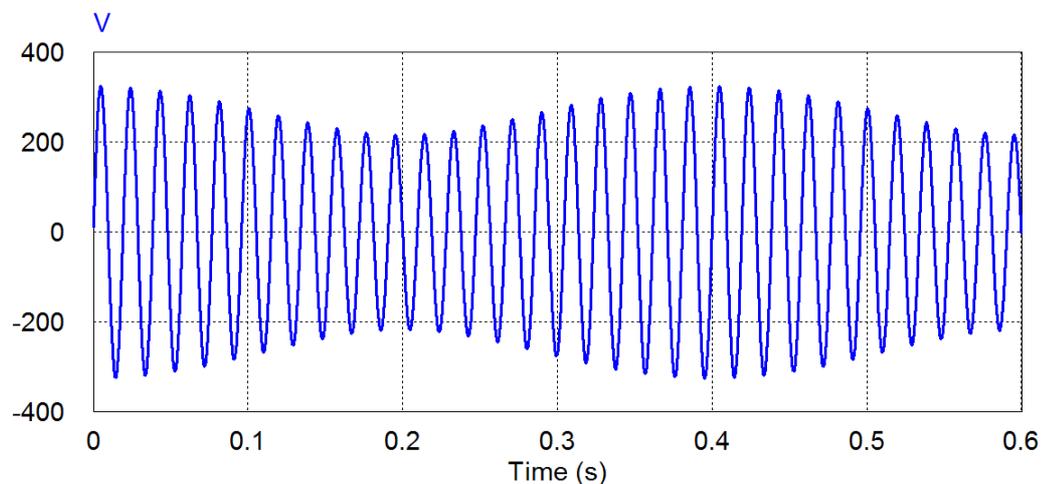
$$\frac{1}{\lambda_c} \cdot (v - v_c) - \frac{1}{\lambda_r} \cdot (v_r - v) = 0 \Rightarrow \left(\frac{1}{\lambda_c} + \frac{1}{\lambda_r} \right) \cdot v = \frac{1}{\lambda_c} \cdot v_c + \frac{1}{\lambda_r} \cdot v_r$$

On retrouve bien après réduction au même dénominateur et après isolation de v la

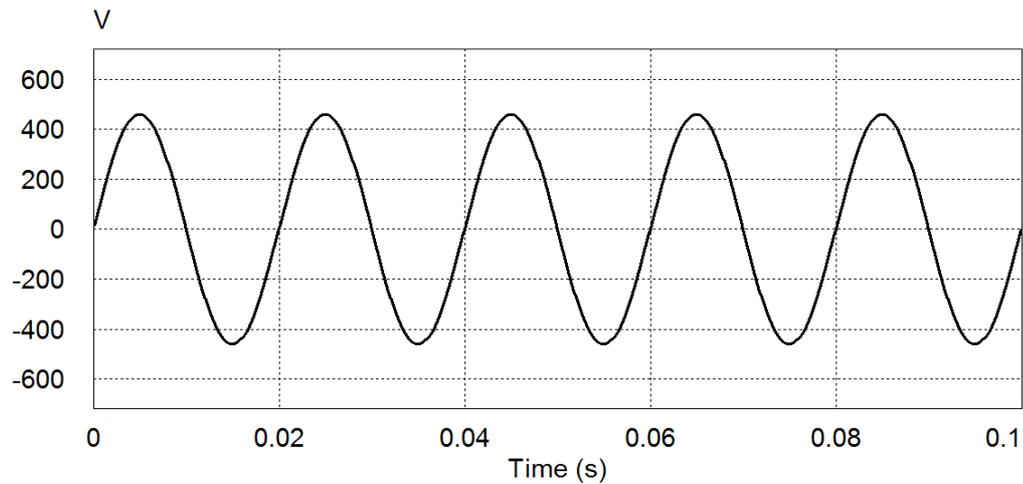
relation proposée :

$$v = \frac{1}{\lambda_r + \lambda_c} \cdot (\lambda_r \cdot v_c + \lambda_c \cdot v_r)$$

17. Allure de v obtenue par simulation sous le logiciel PSIMDEMO : (voir fichier **connexion de deux reseaux.psimsch**)



On constate des fluctuations de l'amplitude de la tension et des variations de fréquence. La nouvelle période est de 0,4 secondes.

18. Allure de v :

$$V = \frac{1}{\lambda_r + \lambda_c} \cdot (\lambda_r \cdot V_c + \lambda_c \cdot V_r) \Rightarrow \frac{1}{6} \cdot (5.230 \cdot 1,5 + 230) = 325,8V$$

La valeur maximale est de 460,8 V et la valeur efficace est de 325,8 V. Il y a surtension de 41,6 % environ dans ce cas.

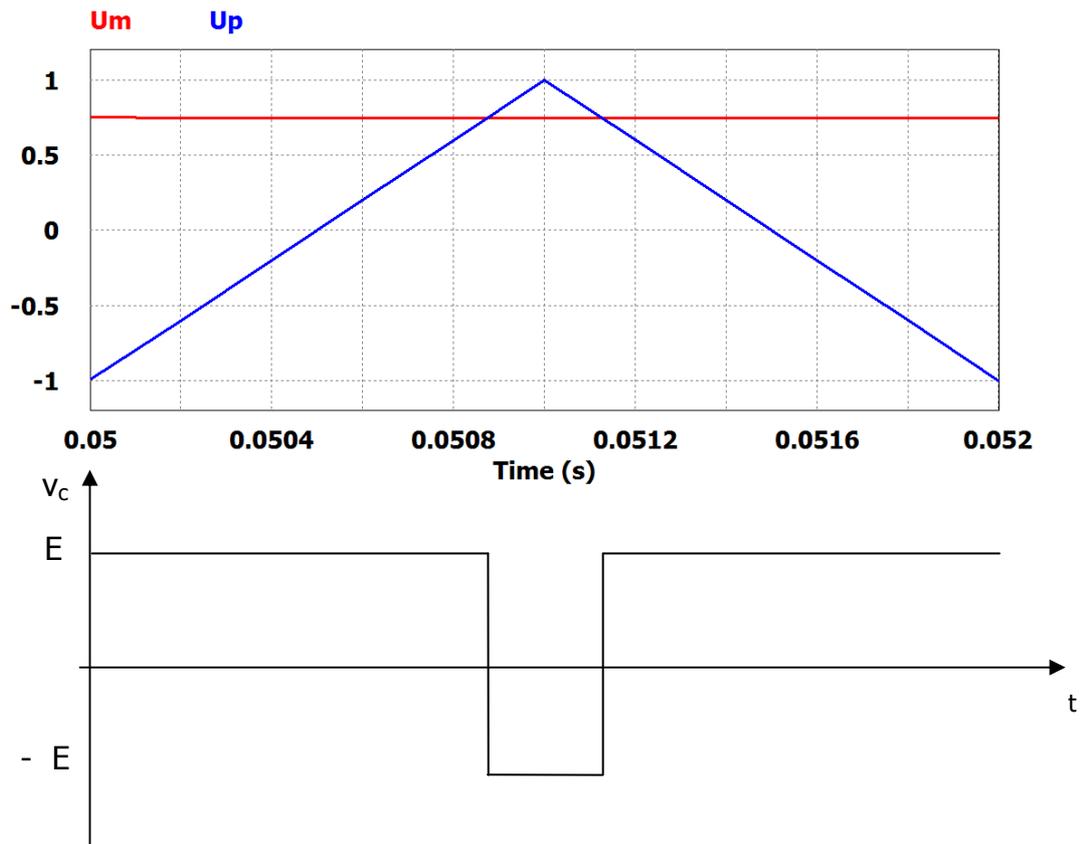
19. Nous venons de mettre en évidence les impacts des caractéristiques de la source v_c sur la tension v . Une variation de v_c en amplitude se traduit par une surtension ou sous tension et une variation de fréquence, par des variations de fréquence, donc une impossibilité de transférer de la puissance active (moyenne) avec le réseau v_r .

Il convient donc à partir des énergies de natures fluctuantes et intermittentes d'assurer une stabilité de la source v_c . Cette stabilisation est rendue possible grâce à l'emploi des convertisseurs statiques dans une certaine mesure.

20. Lorsque K_1 est fermé $v_c = E$.

Lorsque K_1 est ouvert cela entraîne K_2 fermé et donc $v_c = -E$.

21. Allure de v_c sur une période T_p .



$$\overline{v_c} = \frac{1}{T_p} \cdot \int_{-\frac{T_p}{2}}^{\frac{T_p}{2}} v_c \cdot dt = \frac{2}{T_p} \cdot \left(\int_0^{\frac{\alpha \cdot T_p}{2}} E \cdot dt + \int_{\frac{\alpha \cdot T_p}{2}}^{\frac{T_p}{2}} -E \cdot dt \right)$$

$$\overline{v_c} = \frac{2}{T_p} \left(E \cdot \alpha \cdot \frac{T_p}{2} - E \cdot \frac{T_p}{2} + E \cdot \alpha \cdot \frac{T_p}{2} \right)$$

$$\boxed{\overline{v_c} = E \cdot (2 \cdot \alpha - 1)}$$

22. u_p est une droite son équation est de la forme $u_p = a \cdot t + b$.

$$a = \frac{(1 - (-1))}{\frac{T_p}{2}} = \frac{4}{T_p} ; \text{ Pour déterminer } b \text{ on prendra le point à l'origine (} t = 0 \text{) où}$$

$$b = -1.$$

$$\text{D'où : } \boxed{u_p = \frac{4}{T_p} \cdot t - 1}$$

A l'instant $\alpha \cdot \frac{T_p}{2}$ on a $u_p = u_m$; $u_p(\alpha \cdot \frac{T_p}{2}) = u_m = \frac{4}{T_p} \cdot \alpha \cdot \frac{T_p}{2} - 1 \Rightarrow \boxed{\alpha = \frac{u_m + 1}{2}}$.

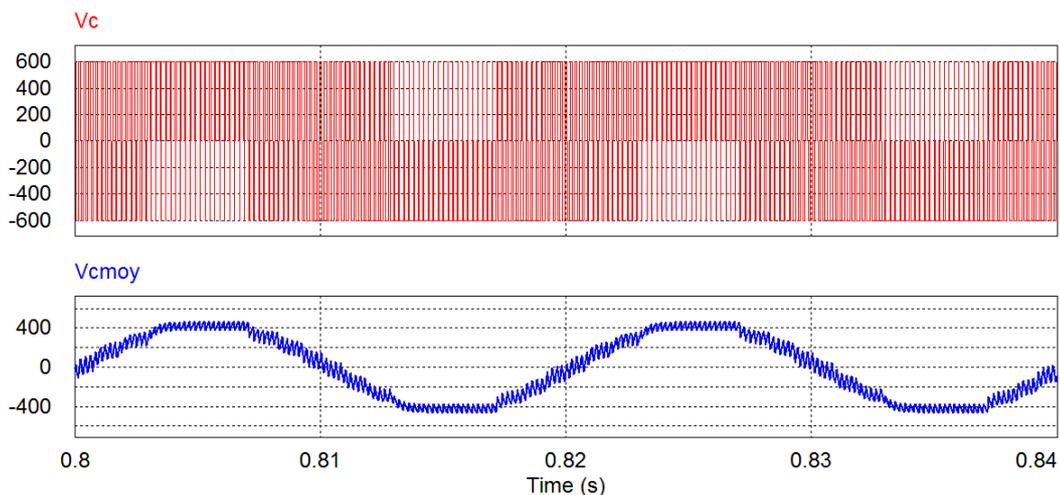
23. On a $\boxed{v_c = E \cdot u_m = E \cdot U_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t - \beta)}$.

Tout se passe comme si on échantillonnait à la période T_p la tension U_m affectée d'un coefficient E .

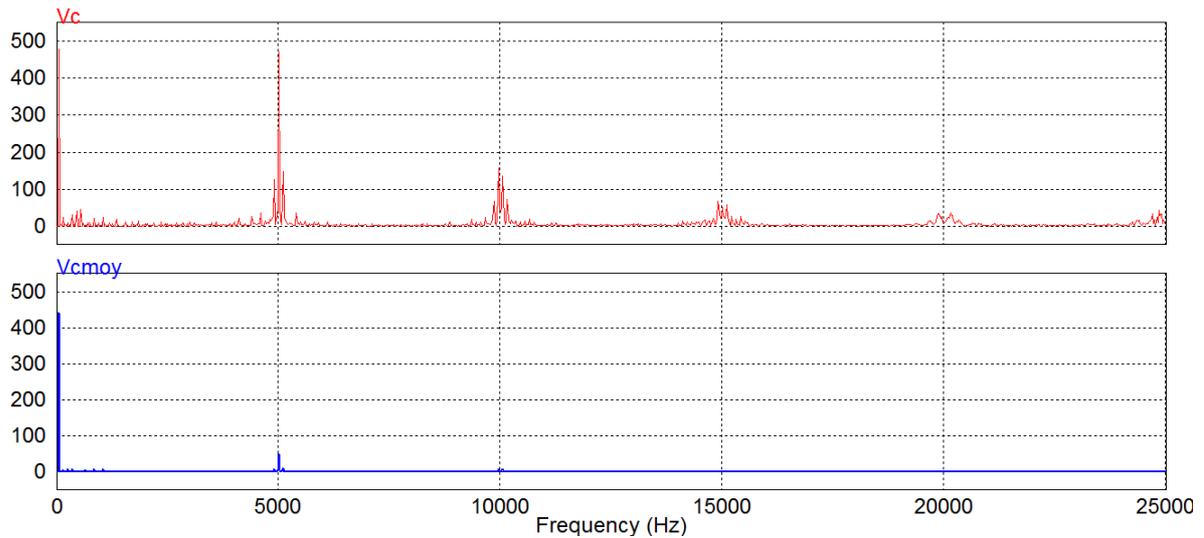
En effet on pourrait tracer à chaque période T_p la tension $v_c(t_k) = E \cdot U_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot k \cdot T_p - \beta)$ où t_k est le temps discrétisé $t_k = k \cdot T_p$.

Conclusion : grâce à un filtre passe bas on peut extraire la valeur moyenne de v_c . Cette valeur moyenne est proportionnelle à u_m . On peut contrôler la source v_c en amplitude, en fréquence et en phase ; donc le transfert de puissance avec la source v_r .

Voir fichier de simulation : **filtre onduleur.psimsch**

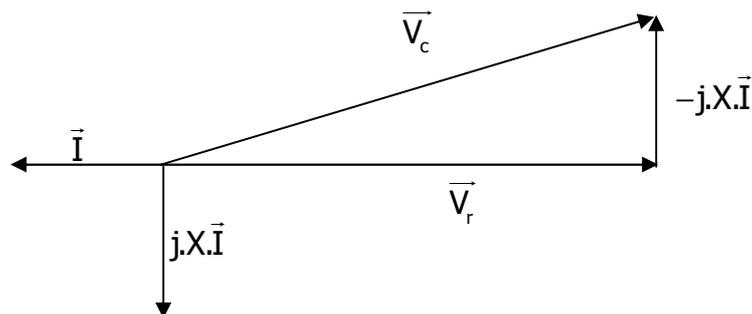


Ces courbes ont été obtenues pour une fréquence $f_r = 50$ Hz et $f_m = 5000$ Hz. La fréquence de coupure du filtre est égale à 500 Hz.



L'analyse du spectre montre bien le fondamental vu du réseau (à la fréquence f_r) les harmoniques ainsi que l'influence du filtre.

24. La loi des mailles donne : $\underline{V}_r - j.X.I = \underline{V}_c$



25. Le théorème de Pythagore fournit :

$$\boxed{V_r^2 + (X.I)^2 = V_c^2}$$

26. La puissance $P = -V_r.I \Rightarrow I = -\frac{P}{V_r}$ en remplaçant cette expression dans

l'équation de la question 25 on obtient : $\boxed{V_r^2 + \left(X \cdot \frac{P}{V_r}\right)^2 = V_c^2}$

$$\frac{\sqrt{V_r^2 + \left(X \cdot \frac{P}{V_r}\right)^2}}{E} = U_m$$

27.
$$u_m = \frac{\sqrt{V_r^2 + \left(X \cdot \frac{P}{V_r}\right)^2}}{E} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t + \beta)$$
 ou β est le déphasage entre v_r et v_c .

$$\beta = \arctan\left(\frac{X \cdot P}{V_r^2}\right)$$

$U_m = 0,385$ et $\beta = 0,01$ rad.
$$u_m = 0,385 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_r \cdot t + 0,01)$$
.

28. Simulation.

29. CV_1 est un redresseur son rôle est de convertir la tension alternative de l'éolienne caractérisée par une fréquence et une amplitude variable, en tension continue dépourvue de fréquence. De cette manière on gomme la variation de fréquence due à la vitesse du vent.

CV_2 est un convertisseur continu-continu destiné à l'adaptation d'impédance du panneau. C'est un hacheur élévateur.

CV_3 est un onduleur dont le rôle est de convertir la tension du bus continu en tension alternative compatible avec le bus CA.

CV_4 est un convertisseur continu-continu réversible. Son rôle est de charger les batteries de stockage et de les décharger en cas de besoin.