

M1 E3A - VOIE ANDRÉ AMPÈRE

MODULE 414
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ
À PARTIR D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

Note de Cours

Un cours de :

ANTHONY JUTON & OLIVIER VILLAIN & EMMANUEL HOANG

Rédigé et complété par :

PIERRE-ANTOINE COMBY

Version du 25 février 2019

Table des matières

1	La machine asynchrone - principe et modèle	5
1	Introduction	5
2	Principe de la machine asynchrone	6
2.1	Le stator triphasé	6
2.2	Rotor à une spire en court circuit	8
2.3	Rotor à 3 spires en court circuit	9
3	Modélisation de la machine asynchrone	10
3.1	Mise en équation	10
3.2	Bilan de puissance	12
3.3	Couple et puissance	13
2	Production d'électricité d'origine non nucléaire	15
1	Les différentes sources d'énergies pour l'électricité	15
1.1	Rappels	15
1.2	Les énergies non renouvelable	15
1.3	Les énergies renouvelable	16
2	L'hydroélectricité	17
2.1	Sur terre	17
2.2	En mer	17
3	L'éolien	18
3.1	Sur Terre	18
3.2	En mer	18
4	Le photovoltaïque	18
4.1	Origine de l'énergie solaire	18
4.2	Principe de la conversion : la cellule photovoltaïque	18
4.3	Mise en oeuvre	18
5	Conclusion	18
3	L'éolien : principe physique	19
1	Quelques chiffres	19
2	Caractérisation du vent	19
2.1	La rose des vents	19
2.2	La distribution des vitesses	19
2.3	Dépendances de la vitesse du vent avec l'altitude	19
2.4	Énergie cinétique d'une colonne de vent	20
2.5	Potentiel éolien d'un site	20

2.6	Potentiel éolien en France	21
3	Les différents types de turbines	21
4	Conversion d'énergie cinétique, mécanique	22
4.1	Limite de Betz	22
4.2	Théorie Simplifiée de la pale	24
4.3	Pale réelle	28
4.4	Comparaison des différents types de turbines	28
4.5	Réglage de la conversion	28
4.6	Exemple de caractéristiques	28
4	La machine asynchrone en génératrice	29
5	La machine asynchrone à double excitation	31
6	Physique de la conversion électrovoltaïque	33
1	Origine de l'énergie solaire	33
1.1	Constitution du Soleil	33
1.2	Rayonnement produit et loi utiles	33
1.3	Notion d'Air-Masse	34
2	Principe de la conversion : la cellule photovoltaïque	34
2.1	Historique	34
2.2	La jonction PN	34
2.3	Effet photovoltaïque	34
3	Mise en oeuvre	35
7	Électronique de puissance pour les parcs éoliens connectés au réseau	37

Chapitre 1

La machine asynchrone - principe et modèle

Anthony Juton

1 Introduction

blabla ,les centrales nucléaire c'est 1GW , avec des machines synchrones. Les MCC sont pas utilisé en forte puissance. on préfère utiliser une machine synchrone ou une machine asynchrone (plus simple, moins cher,etc) La machine asynchrone fonctionne en moteur ou en alternateur.

Premier dépôt déposé en 1888 par Nicolas Tesla.

Utilisation des différentes technologies de moteur (brushless, bobinés) en automobile et industrie (80% des moteur de l'industrie sont des machines asynchrones)

2 Principe de la machine asynchrone

en anglais on parle de *Induction Motor*. On génère un champ magnétique tournant au stator. Le courant électrique est induit dans le rotor, pas besoin de mettre des balais ou de bobinage au rotor.

2.1 Le stator triphasé

2.1.1 Champs tournant

On a le schéma suivant, n spires sont parcourues par un courant i_{sa} .

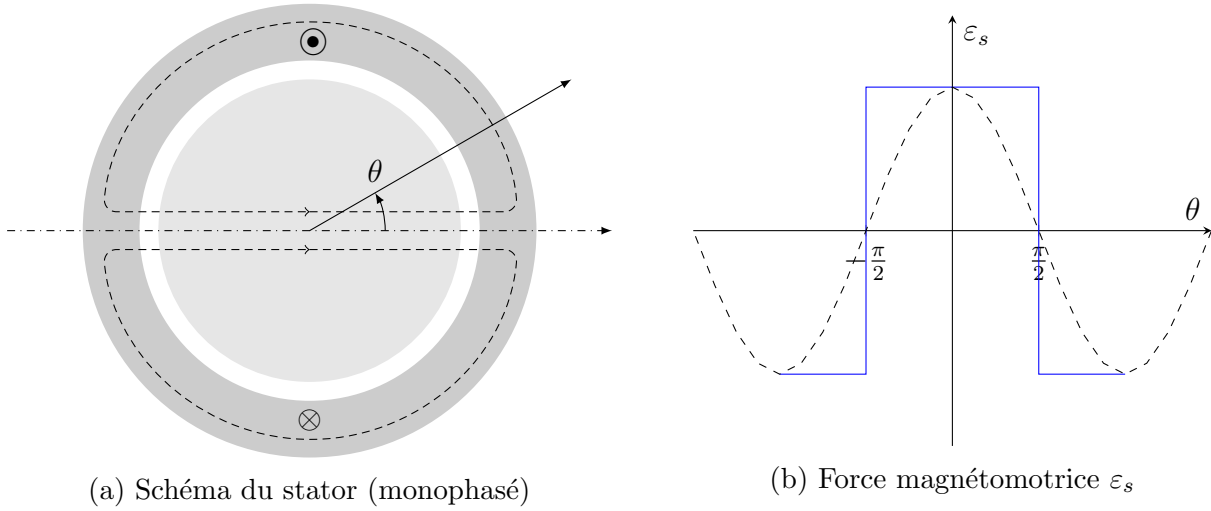


FIGURE 1.1 – Champ tournant dans le stator

Avec le théorème d'ampère on a :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = n_s i_s$$

$$\underbrace{\int H \cdot dl}_{H_{fer}} + \underbrace{2H_e e}_{H_e} = n_s i_s$$

Or on a :

$$H_{mat.fer} \ll H_{entrefer}$$

Donc on a la force magnétomotrice

$$\varepsilon_s = H_e e = \frac{n_s i_s}{2}$$

On peut donc tracer :

La répartition des fils autour du rotor influe sur l'allure de la force magnétomotrice. Par exemple pour une répartition uniforme de $n/3$ spires par encoche :

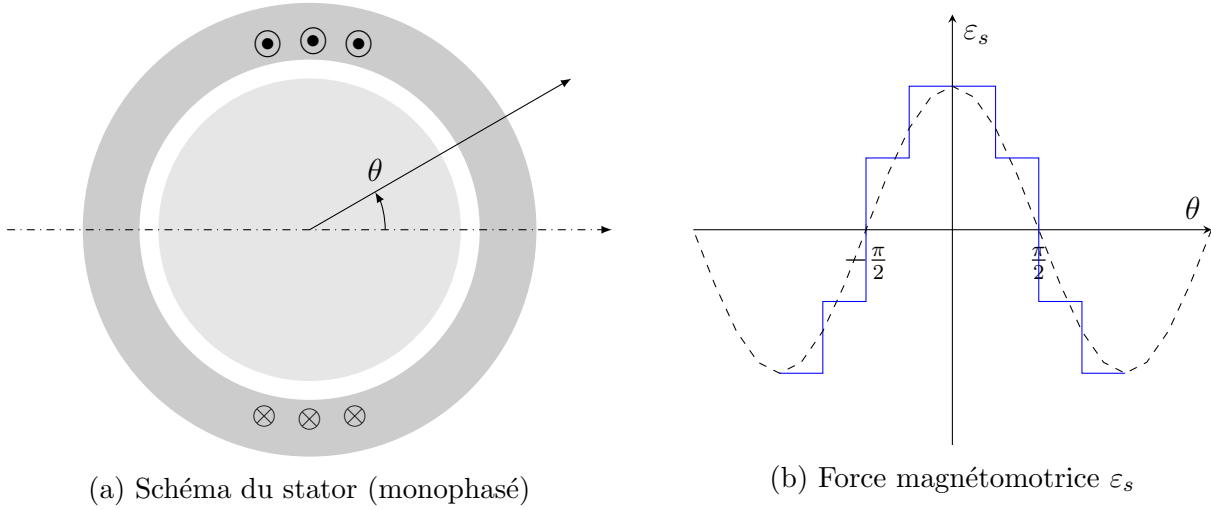


FIGURE 1.2 – Approximation sinusoïdale du champ tournant

en répartissant les bobinage sur le rotor de manière sinusoïdales, on peut générer une force magnétomotrice sinusoïdale également.

Remarque: On utilise des petits fils pour éviter l'effet de peau en alternatif, mais cela augmente la résistivité et la puissance dissipée par effet Joule, rien n'est parfait.

En utilisant un courant i_s alternatif (à la pulsation ω) on a une onde pulsante :

$$\varepsilon_s = \frac{n_s i_{max}}{2} \cos(\omega t)$$

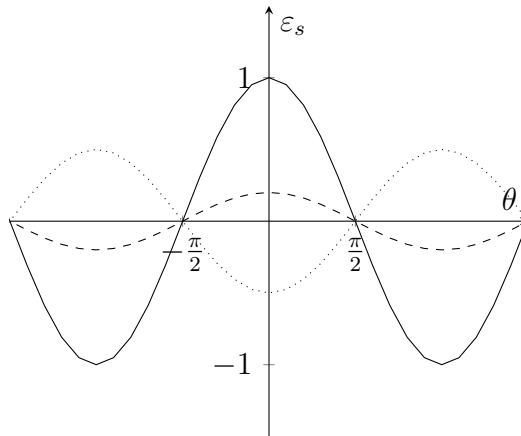


FIGURE 1.3 – Évolution d'une onde pulsante en fonction du temps

Dans le cas triphasé on répartit les enroulements de manière sinusoïdales (seule un tour de bobinage est représenté) parcourus par i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} :

$$\begin{cases} i_{sa}(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t) \\ i_{sb}(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{sc}(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{Soit} \quad \begin{cases} \varepsilon_{sa}(t) = \frac{n_s i_s(t)}{2} \cos(\theta) \\ \varepsilon_{sb}(t) = \frac{n_s i_s(t)}{2} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \varepsilon_{sc}(t) = \frac{n_s i_s(t)}{2} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

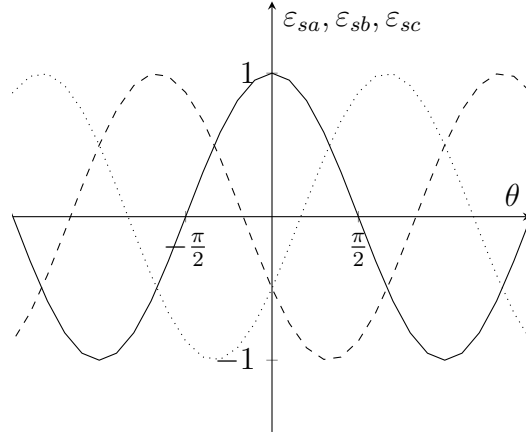


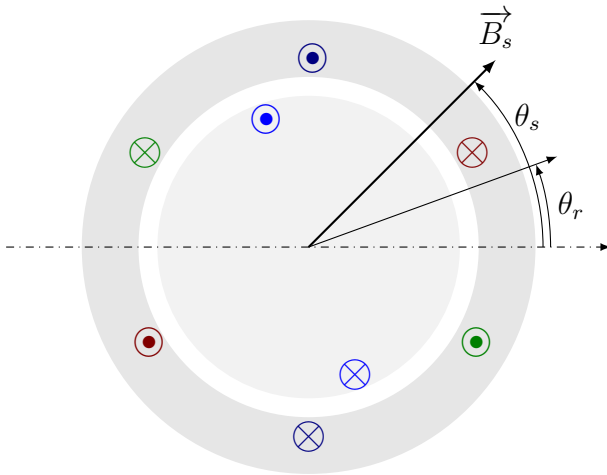
FIGURE 1.4 – Évolution d'une onde pulsante en fonction du temps

Alors la force magnétomotrice totale vaut :

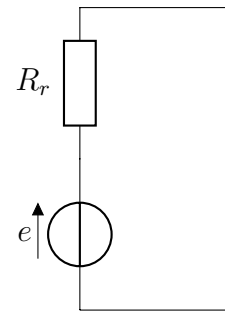
$$\begin{aligned}
 \varepsilon_s &= \varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c \\
 &= \frac{n_s I \sqrt{2}}{2} \left(\cos(\theta) \cos(\theta) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\
 &= \frac{3n_s I}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \omega t)
 \end{aligned}$$

On a créé un champ tournant, avec trois bobinages, le module de la force magnétomotrice est constant, son argument balaye tout l'espace.

2.2 Rotor à une spire en court circuit



(a) Disposition du rotor (monophasé)



(b) Schéma électrique du rotor en court circuit

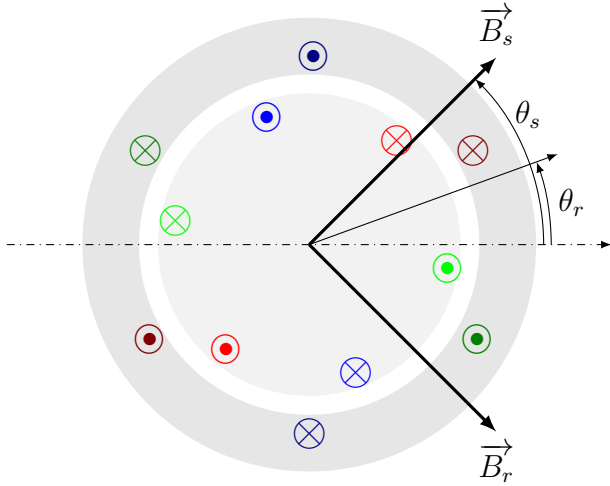
On a :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = R_r i_r = -L \frac{di_r}{dt} + B \cdot n_r S_r \frac{d}{d\theta_s - \theta_r} \sin(\theta_s - \theta_r)$$

Pour $\theta_s = \omega_s t$, position du champs statorique et $\theta_r = \Omega t + \theta_{r_0}$, position du champ rotorique on a :

$$e = -L \frac{d}{dt} i_r + B \cdot n_r S_r (\omega_s - \Omega) \sin((\omega_s - \Omega)t + \theta_{r_0})$$

2.3 Rotor à 3 spires en court circuit



(a) Rotor triphasé

On a :

- Vitesse de rotation de $\vec{B}_s$: ω_s
- Vitesse de rotation du rotor ω_r
- Vitesse de rotation de $\vec{B}_s$ dans le repère du rotor : $\omega_s - \omega_r$
- Vitesse de rotation du champ $\vec{B}_r$ induit dans le rotor dans le repère du stator : ω_s .

Proposition

Le champ induit dans le rotor et le champ du stator tournent à la même vitesse, appelé *la vitesse de synchronisme*

3 Modélisation de la machine asynchrone

On considère une machine triphasé au rotor et au stator à une paire de pôle :

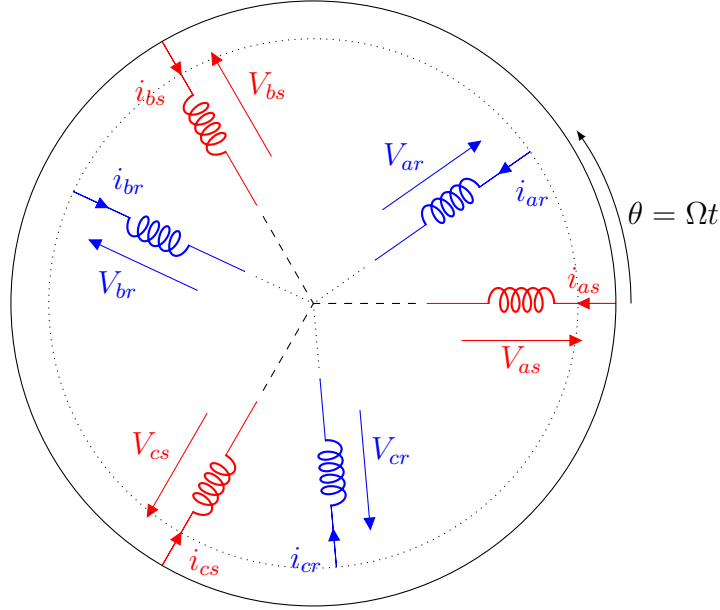


FIGURE 1.7 – Modèle électrique

Hypothèses

- Alimentation sinus triphasé en Régime Permanent
- Rotor triphasé en court-circuit
- Couplage en étoile des enroulements équilibrés
- Fmm sinusoïdales, pas de saturation magnétiques

On note ω_s pulsation des courants statorique ω_r la pulsation des courants rotorique et Ω la pulsation mécanique de la machine.

3.1 Mise en équation

3.1.1 Équation statorique

On a les équations suivantes pour le stator :

$$v_{as} = R_s i_{as}(t) + \frac{d\Phi_{as}(t)}{dt}$$

$$\Phi_{as}(t) = L_s i_{as} + M_s (i_{bs} + i_{cs})$$

$$+ M_0 \left(\cos(\theta) i_{ar}(t) + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{br}(t) + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{br}(t) + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{cr}(t) \right)$$

$$\Phi_{as}(t) = (L_s - M_s) i_{as}(t) + \frac{3M_0 I_r}{\sqrt{2}} \cos(\theta + \omega_r t + \phi_r + \theta_0)$$

$$\Phi_{as}(t) = (L_s - M_s) i_{as}(t) + \frac{3M_0 I_r}{\sqrt{2}} \cos(\omega_s t + \phi_s)$$

On en déduit donc (Dans le formalisme complexe de l'ARQS)

$$\underline{V_{as}} = R_s \underline{I_s} + j L_{sc} \omega_s \underline{I_{as}} + j \frac{3}{2} M_0 \omega_s \underline{I_r}$$

I_r est à la pulsation ω_s !

3.1.2 Équations rotoriques

On fait les mêmes calculs pour le rotor :

$$\begin{aligned} v_{ar}(t) &= R_r i_{ar}(t) + \frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi_{ar}(t) &= (L_r - M_r) i_{ar} + M_0 (\cos(\theta) i_{as}(t) + \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) i_{br}(t) + \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) i_{br}(t) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) i_{cr}(t)) \\ \Phi_{ar}(t) &= (L_r - M_r) i_{ar} + \frac{3M_0 I_s}{\sqrt{2}} \cos(\Omega t - \omega_s t + \theta_0 - \phi_s) \\ \Phi_{ar}(t) &= L_{rc} i_{ar} + \frac{3M_0 I_s}{\sqrt{2}} \cos(\omega_r t + \phi'_s) \end{aligned}$$

Donc on a dans le formalisme complexe de l'ARQS, avec le rotor en court-circuit :

$$V_{ar} = R_r I_{ar} + j L_{rc} \omega_r I_{ar} + j \frac{3}{2} M_0 \omega_r I_s = 0$$

Soit en posant $g = \frac{\omega_s - \Omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s}$:

$$\frac{V_{ar}}{g} = 0 = \frac{R_r}{g} + j L_{rc} \omega_s I_{ar} + j \frac{3}{2} M_0 \omega_s I_s$$

3.1.3 Modèle par analogie

On a donc un couplage magnétique et on peut construire un modèle équivalent :

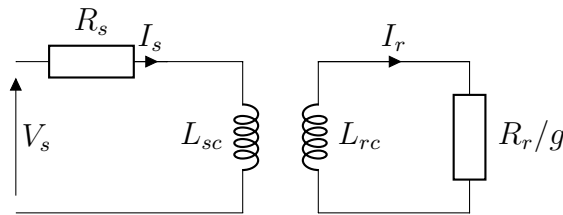


FIGURE 1.8 – Modèle électrique équivalent

Le couplage n'est pas parfait : $\frac{3}{2} M_0 < \sqrt{L_{sc} L_{rc}}$. On fait l'analogie avec un transformateur parfait avec pertes :

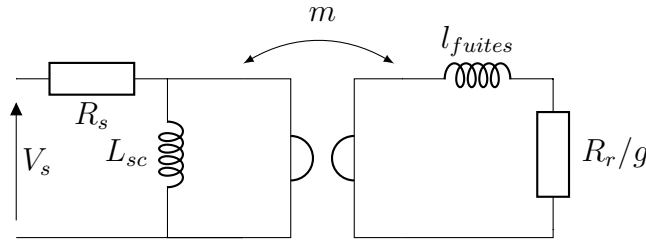


FIGURE 1.9 – Modèle électrique équivalent

Avec $m = \frac{M_c}{L_{sc}}$

On a donc l'impédance équivalente suivante à alimenter :

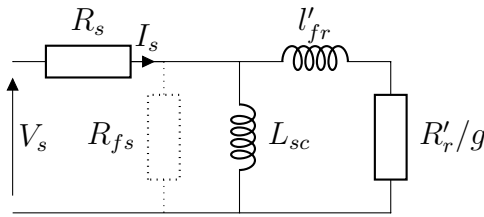


FIGURE 1.10 – impédance équivalente au stator

Avec : $l'_{fr} = \frac{l_{fuite}}{m^2}$ et $R'_r = \frac{R_r}{m^2}$.

3.2 Bilan de puissance

$$P_{transmise} = \frac{R_r}{g} I_r^2$$

$$P_{Joules} = R_r I_r^2$$

$$P_{meca} = P_{transmise} - P_{joules} = R_r I_r^2 \left(\frac{1}{g} - 1 \right)$$

Dans le modèle équivalent on est à ω_s . Or dans le rotor les courants sont à ω_r . On a alors : $\omega_r = g\omega_s$ Soit

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

Exemple: Pour une machine asynchrone , 400V/690V ,1.5kW ,1425 tr/min :

1. La machine est câblée en triangle pour un réseau 400V (entre phase ,230V phase-neutre). Dans le cas d'un réseau 690V on cablera en étoile.
2. En continu on mesure entre deux phases $R = 3.8 \Omega$. Quel est la valeur de R_s ?
3. Pour une machine à vide $Q_{0T} = 1100 \text{ VAR}$ et $P_{OT} = 200 \text{ W}$. Quelle est la valeur de L_{cs} et de R_{fs} ?
4. Au point nominal on mesure $I = 2.9 \text{ A}$; $P_T = 1500 \text{ W}$; $Q_T = 1300 \text{ VAR}$. Quelle est la valeur de l'_{fr} et R'_r ?

3.3 Couple et puissance

On a :

$$I_s = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{g}\right)^2 + (l_2\omega_s)^2}}$$

On étudie une MAS à p paire de poles : $\Omega_{meca}p = \omega$ et $C_{meca} = pC_{em}$. On a

$$C = 3 \frac{P_{meca}}{\omega}$$

pour faire varier ω_s on fais varier V_s .

Variation de fréquence à U/f constant : droite affine. (seuil à l'origine)

Chapitre 2

Production d'électricité d'origine non nucléaire

Dans ce chapitre on donne un état des différentes productions d'énergie électriques, pas de calcul, juste de la recopie de slides

1 Les différentes sources d'énergies pour l'électricité

1.1 Rappels

1.1.1 Unités

Puissance

-
- $1 \text{ ch} = 735 \text{ W}$

Énergie

- 1 tonne équivalente pétrole (tep) = $11\,628 \text{ kWh} = 41.8 \text{ GJ} = 7.33 \text{ barils de pétroles}$
- 1 baril de pétrole = $150 \text{ L} = 5.6 \text{ GJ} = 1580 \text{ kWh}$
- $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$
- $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

Conversion d'énergie

1.2 Les énergies non renouvelable

Définition

Une énergie non renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle moins vite qu'on ne la consomme et de manière négligeable à l'échelle humaine.

1.2.1 Les énergies fossiles

Environ 80% de l'énergie consommée dans le monde est d'origine fossile. On distingue :

- le charbon (24%)
- le pétrole (35%)
- le gaz naturel (21%)

ces ressources permettent d'assurer la plupart des moyens de transports, le chauffage, et production d'électricité et de chaleur (avec éventuellement cogénération¹)

1.2.2 Les énergies nucléaires

- Par des réactions de fissions 6% énergie primaire consommée dans le monde. 15% de la production mondiale.

Remarque: Une ressource potentiellement illimitée avec des technologies de neutrons rapides (ex : super phénix en France)

- Par des réacteur de fusion , pour la fin du 21ème siècle.

1.2.3 Problématique actuelle

Un double problème :

1. Raréfaction des ressources et dépendance

- Ressources carbonées fossiles : charbon
- nucléaire : Uranium (neutrons lents) 200 ans. neutrons rapide, 5000 ans.
- Problème géopolitique de la dépendance, 50% de l'énergie consommée au sein

2. Des conséquences écologiques à limiter

- Limitation des émissions de gaz à effet de serre (380 ppm en 2008, 550 ppm en 2035) pour limiter le réchauffement climatique anthropique.
- Gestion des déchets nucléaires

1.3 Les énergies renouvelable

C'est la suite du cours.

1. Énergie hydraulique

2. Énergie éolienne

3. Énergie solaire

a) Le chauffage solaire

b) Les centrales électriques solaires (thermodynamique, avec cogénération)

c) Le photovoltaïque (cf. 4)

4. Géothermie

a) La production directe de chaleur (ex aquifère de Cachan)

1. récupération de la chaleur pour le réseau urbain d'eau chaude

- b) La production d'électricité
 - c) Les pompes à chaleur
5. La biomasse
- a) Les bio-carburants
 - b) Le biogaz
 - c) Le bois

2 L'hydroélectricité

2.1 Sur terre

2.1.1 Les prémices

2.1.2 Les grandes centrales hydroélectriques

1. Avantages :
 - Le caractère intermittent est contrôlé
 - Inondation évitée en aval
 - Irrigation
 - Tourisme
2. Inconvénients :
 - Vallée noyée (village et terres agricoles)
 - Risque d'inondation catastrophique en aval si rupture
 - Bloque la remontée des poissons
 - Se remplit petit à petit
 - Prive de sédiments le cours d'eau en aval

2.1.3 La petite hydroélectricité

2.2 En mer

2.2.1 Les marées : prémices

- Usine marémotrice de la Rance ouverte en 1966 240 MW, 550 GWh/an
- Sihwa (Corée du Sud, 258 MW)

2.2.2 Les courants permanents

2.2.3 La houle

3 L'éolien

3.1 Sur Terre

étudié dans le chapitre 3

3.2 En mer

4 Le photovoltaïque

4.1 Origine de l'énergie solaire

4.2 Principe de la conversion : la cellule photovoltaïque

4.3 Mise en oeuvre

5 Conclusion

Chapitre 3

L'éolien : principe physique

1 Quelques chiffres

Cf poly

Beaucoup de donnée disponible dans le poly, encore plus sur le site de RTE.

Définition

Le *facteur de charge* ou facteur d'utilisation d'une centrale électrique est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période.

2 Caractérisation du vent

De façon à étudier le potentiel éolien d'un site il convient de connaître la source d'énergie : le vent. Ces renseignements sont donnés par :

- la rose des vents
- la distribution des vitesses
- La dépendance en fonction de l'altitude

2.1 La rose des vents

2.2 La distribution des vitesses

2.3 Dépendances de la vitesse du vent avec l'altitude

Les frottement avec la surface terrestre font que la vitesse du vent varie en fonction de l'altitude. La loi empirique suivante permet de prendre en compte cette dépendance.

$$\frac{V}{V_{ref}} = \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha$$

Avec

H hauteur

α coefficient permettant de prendre en compte la rugosité du terrain.

Mer calme	$\alpha = 0,09$
prairie	$\alpha = 0,16$

2.4 Énergie cinétique d'une colonne de vent

L'énergie cinétique d'une colonne de vent de masse m se déplaçant à la vitesse V s'écrit :

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

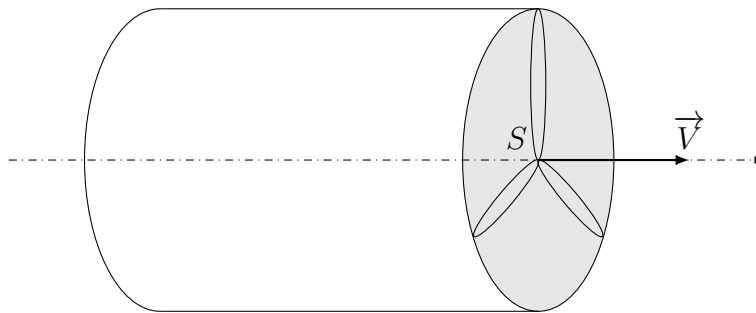


FIGURE 3.1 – Colonne de vent

En supposant qu'en sortie de l'éolienne la vitesse de cette colonne soit nulle, il serait possible de récupérer dans l'intervalle de temps dt l'énergie élémentaire :

$$dE_c = \frac{1}{2}dmV^2$$

où dm représente la masse ayant traversé la surface S pendant le temps dt . Soit $dm = \rho SV dt$ avec $\rho 1.225 \text{ kg/m}^3$ masse volumique de l'air dans les conditions normale de pression et de température.

$$dE_c = \frac{1}{2}\rho SV^3 dt$$

On fournit alors une puissance :

$$P_{E_c} = \frac{1}{2}\rho SV^3$$

2.5 Potentiel éolien d'un site

Connaissant l'histogramme des vitesses sur un site il est possible de calculer la contribution pour que chaque vitesse de vent à l'énergie cinétique sur 1 an. Le principe de calcul est le suivant :

- Un vent de 5 m s^{-1} souffle 22% du temps, soit 1927 h/an.
- La puissance par unité de surface s'écrit : $\frac{P_{E_c}}{S} = \frac{1}{2}\rho V^3 = 76.5 \text{ W/m}^2$

- La contribution de cette vitesse à l'énergie est donc :

$$\left(\frac{W_{E_c}}{S} \right)_{V=5m/s} = 150 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Pour avoir l'énergie théorique sur un an et par unité de surface, il suffit de sommer les différentes vitesses

$$\frac{W_{E_c}}{S} = 821 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

pour une éolienne balayant une surface de 100 m^2 , l'énergie de la veine de vent sur un an serait $W_{E_c} = 82\,100 \text{ kWh}$. Comme le montrerons les parties suivantes, l'énergie convertie sera beaucoup faible et représentera environ 50% de l'énergie du vent.

2.6 Potentiel éolien en France

bullshit.

3 Les différents types de turbines

bullshit

4 Conversion d'énergie cinétique, mécanique

4.1 Limite de Betz

Dans le chapitre concernant le vent, nous avons montré en supposant qu'en sortie de l'hélice la vitesse de la colonne de vent soit nulle, qu'il serait possible de fournir une puissance : $P_{Ec} = \frac{1}{2} : \rho S V^3$. Les particules constituant l'air ne pouvant disparaître en sortie de l'hélice il y aura une limite à cette puissance. Albert Betz (1919) a démontré en supposant l'écoulement de l'air incompressible que le transfert est limité.

Proposition (*Limite de Betz*)

En considérant un écoulement incompressible sur la turbine on peut *au maximum* extraire de la puissance du vent :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{Ec}$$

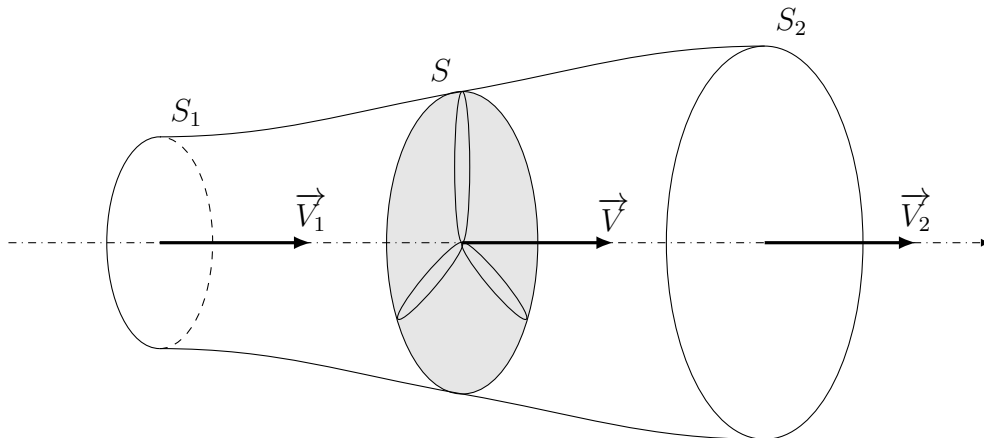
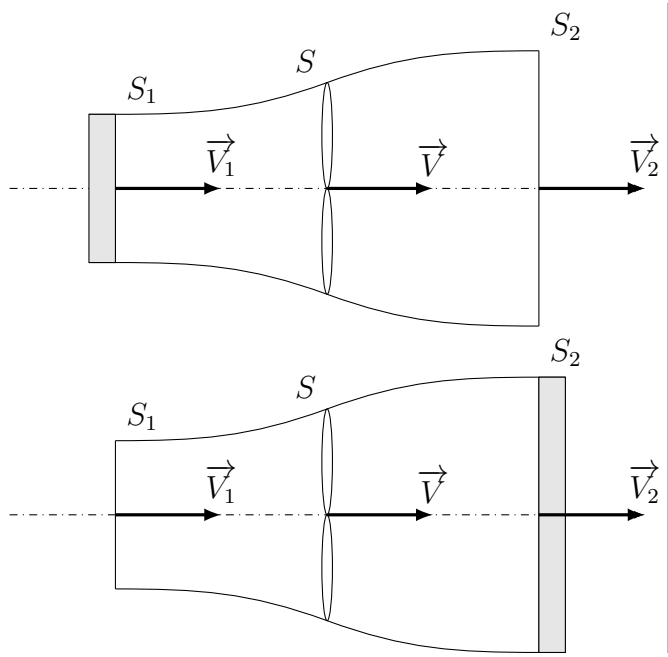


FIGURE 3.2 – Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur



- À l'instant t la quantité de mouvement de la veine de vent s'écrit :

$$p(t) = p_{ABEF} + p_{BCDE} = d_n v_1(t) + p_{BCDE}$$

- À l'instant $t + dt$ la quantité de mouvement de la veine de vent s'écrit :

$$p(t) = p_{CGDH} + p_{BCDE} = d_n v_2(t) + p_{BCDE}$$

Le débit se conservant et l'écoulement étant supposé incompressible, la masse élémentaire dm est la masse qui traverse la surface S pendant dt . Soit :

$$\frac{dm}{dt} = \rho S v = \rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2$$

En régime permanent, la variation de la quantité de mouvement durant le temps dt s'écrit :

$$dp = p(t + dt) - p(t) = \rho S v dt (v_2 - v_1)$$

On en déduit que la puissance cédée à l'hélice est donnée par la relation :

$$P = \rho S v^2 (v_2 - v_1)$$

Cette puissance peut aussi être déterminée en effectuant un bilan d'énergie sur la veine de vent. La variation d'énergie cinétique entre les instants t et $t + dt$ s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2)$$

Soit

$$P = \frac{\rho S v}{2} (v_2^2 - v_1^2)$$

En égalisant les deux expressions de la puissance transférée à l'hélice

$$\rho S v^2 (v_2 - v_1) = \frac{\rho S v}{2} (v_2^2 - v_1^2) \implies \boxed{v = \frac{v_1 + v_2}{2}}$$

On en déduit une autre expressions de la puissance ne faisant intervenir que les vitesses avant et après l'hélice.

$$P = \frac{\rho S}{4} (v_1 + v_2) (v_2^2 - v_1^2)$$

pour une vitesse v_1 donnée cette puissance passe par un maximum quand $\frac{dP}{dv_2} = 0$. Et le maximum est donnée par l'expression :

$$P = -\frac{16}{27} \underbrace{\frac{\rho S v_1^3}{2}}_{P_{incident}} \text{ pour } v_2 = \frac{1}{3} v_1$$

4.2 Théorie Simplifiée de la pale

On considère une hélice constituée de pales formée de plaques. On note :

- v la vitesse du vent réel.
- Ω la vitesse de rotation de l'hélice.

On cherche à déterminer la contribution à la puissance et au couple moteur de l'élément de pale situé à une distance r de l'axe de rotation.

Pour ce tronçon élémentaire, on note :

- l : largeur
- dr : longueur
- β : angle de calage

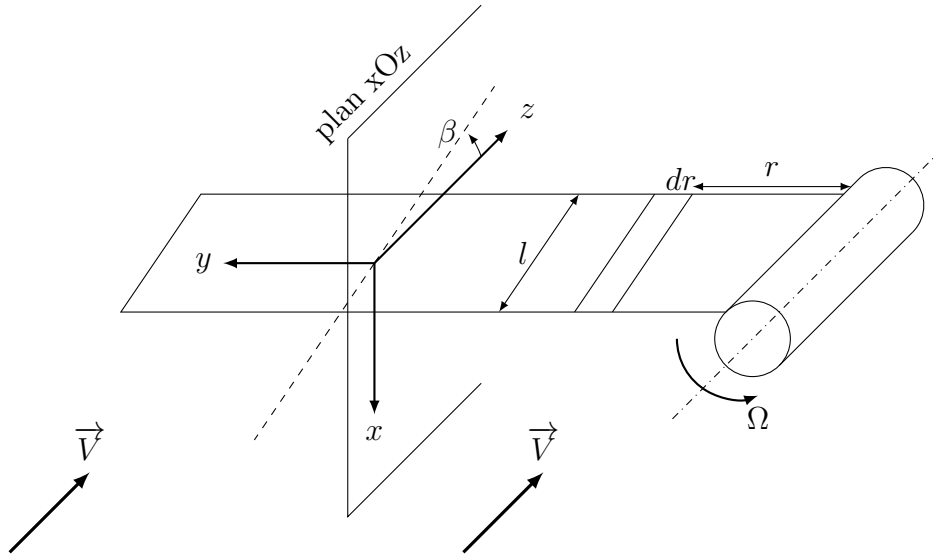


FIGURE 3.3 – hélice simplifiée

Cet élément est soumis au vent réel ($\vec{V}$) et à un vent dû à la rotation de l'hélice ($-\vec{V}_x$) avec $v_x = \Omega r$. La somme vectorielle de ces deux vents donne le vent apparent noté V_a .

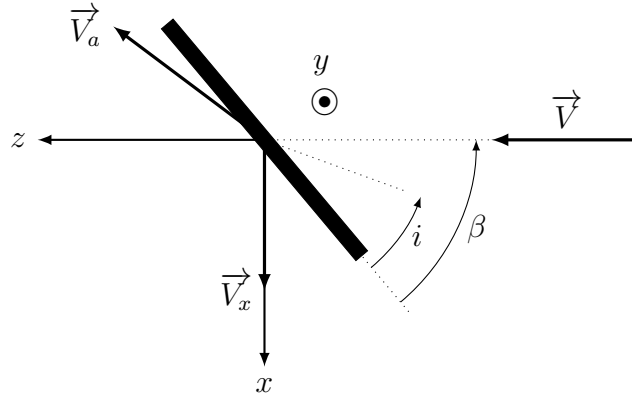
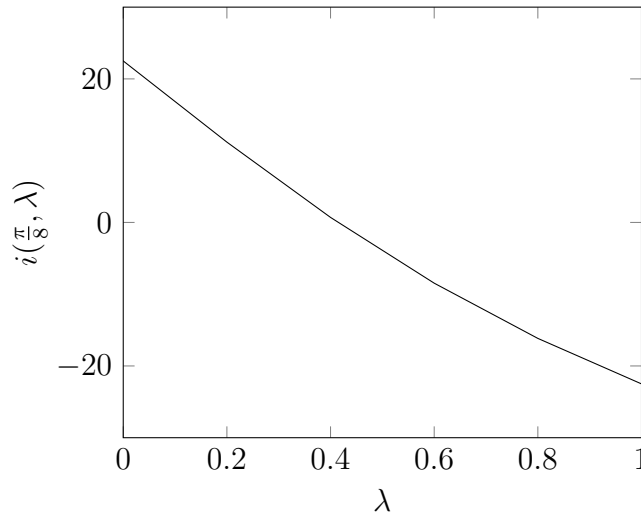


FIGURE 3.4 – Vue de l'élément de pale dans le plan xOz

On définit l'angle d'incidence i comme l'angle entre le vent vu par l'élément de pale ($\vec{V}_a$) et la pale. Pour un angle de calage β donné, cet angle est fonction de la vitesse du vent et de la vitesse due à la rotation V_x . On a donc $\vec{V}_a = \vec{V} - \vec{V}_x$ soit :

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{V^2 + (r\Omega)^2} \\ i = \beta - \arctan\left(\frac{r\Omega}{V}\right) \end{cases}$$

On pose $\lambda = \frac{r\Omega}{V}$ vitesse spécifique du tronçon et on a par exemple l'allure suivante :

FIGURE 3.5 – Variation de l'angle d'incidence en degré en fonction de la vitesse spécifique λ pour un angle de calage $\beta = \frac{\pi}{8}$.

La figure 3.5 représente l'évolution de l'angle d'incidence en fonction de la vitesse spécifique pour un angle de calage donné. Pour un angle de calage donné et à vitesse de vent donnée, l'angle d'incidence diminue lorsque la vitesse de rotation ou le rayon augmente. Pour un angle de calage et une vitesse de rotation donnés, l'angle d'incidence augmente lorsque la vitesse du vent augmente.

Proposition

En négligeant les effets des frottements, il s'exerce sur cet élément une force de pression (dR) perpendiculaire à la surface (analogue à la force de pénétration d'un véhicule dans l'air) dont le module s'écrit :

$$dR = kV_a^2 . dS'$$

où dS' représente la surface de la pale offerte au vent :

$$dS' = l . \sin(i) . dr$$

d'où :

$$dR = kV_a^2 . l \sin(i) dr$$

Il est d'usage de décomposer cette force (dR) en :

- une force dans la direction du vent apparent (dT) appelée traînée,
- une force perpendiculaire à la direction du vent apparent (dP) appelée portance.

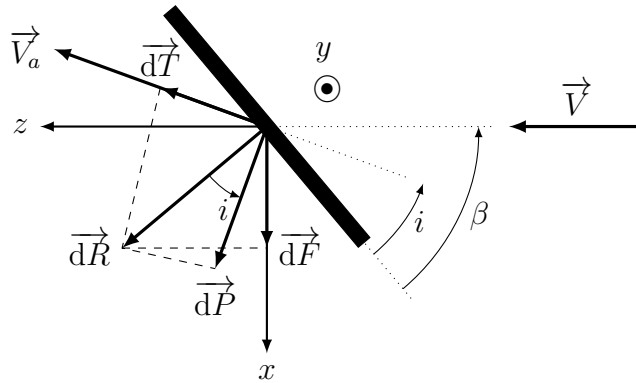


FIGURE 3.6 – Force motrice dF

On en déduit :

$$\begin{cases} dT = dR \sin(i) = kV_a^2 . l \sin(i)^2 dr \\ dP = dR \cos(i) = kV_a^2 . l \sin(i) \cos(i) dr \end{cases}$$

On définit les coefficient de portance C_L ¹ et de traînée C_D ²

$$\begin{cases} dT = \frac{1}{2} \rho C_D V_a^2 l . dr \\ dP = \frac{1}{2} \rho C_L V_a^2 l . dr \end{cases}$$

1. L comme lift
2. D comme drag

Proposition

Dans notre cas les coefficients de trainée et portance sont donc :

$$C_D = \frac{2k}{\rho} \sin(i)^2 \text{ et } C_L = \frac{2k}{\rho} \sin(i) \cos(i)$$

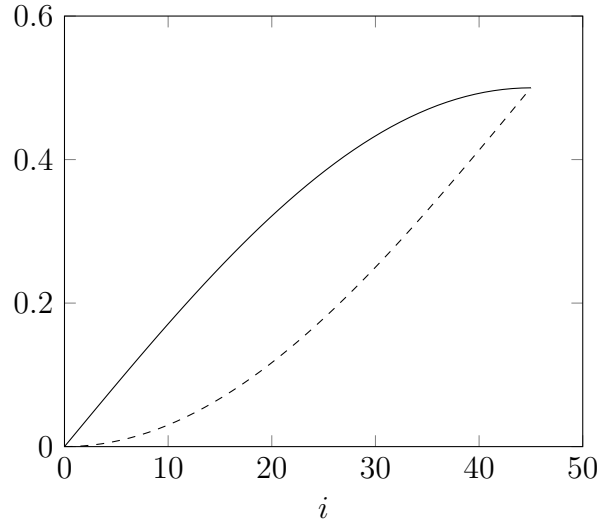


FIGURE 3.7 – Variation des coefficient de portance et de trainée en fonction de l'angle d'incidence

Les deux forces élémentaires dT et dP vont engendrer une force motrice dF et un couple élémentaire :

$$dC = r.dF = r (dP.\cos(\beta - i) - dT.\sin(\beta - i))$$

On en déduit que la contribution de cet élément à la puissance mécanique est donnée par la relation :

$$dP_m = dC\Omega = \frac{1}{2}\rho r V_a^2 \Omega.l (C_L(i).\cos(\beta - i) - C_D(i).\sin(\beta - i)) dr$$

où

$$V_a^2 = V^2 + (\Omega r)^2$$

et

$$i = \beta - \arctan\left(\frac{r\Omega}{V}\right)$$

La figure suivante représente l'allure de la contribution à la puissance mécanique de ce tronçon pour un angle y de calage et une vitesse de vent donnés.

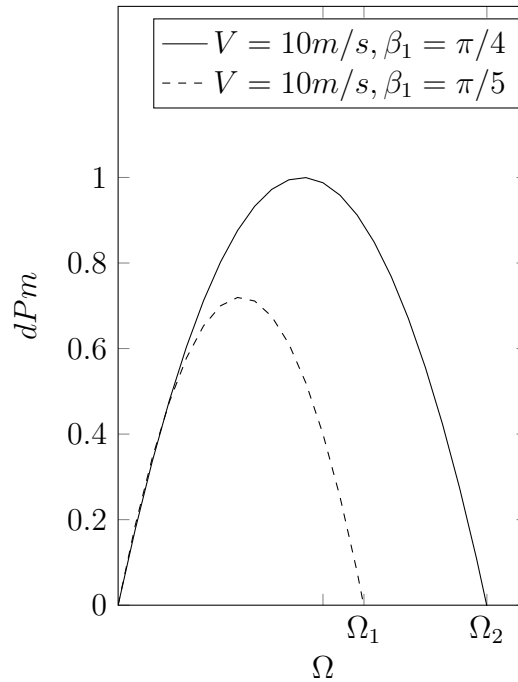


FIGURE 3.8 – Évolution de la puissance en fonction de la vitesse angulaire de rotation pour un angle de calage donné et deux vitesses de vent

À vitesse de vent donnée, la puissance passe par un maximum qui dépend de la vitesse du vent. Cette puissance s'annule pour un angle (i) d'incidence nul, soit encore pour : $\Omega = \frac{V}{r} \tan(\beta)$

Remarque:

- Il faudrait pouvoir adapter la vitesse de rotation de l'hélice à la vitesse du vent pour optimiser la conversion d'énergie cinétique en énergie mécanique.
- La vitesse angulaire correspondant au maximum de puissance dépend de la vitesse du vent mais aussi de r (position du tronçon de pale par rapport à l'axe de rotation). Il est donc nécessaire de vriller le profil de la pale (β est fonction de r) pour optimiser la conversion.
- Le calcul de la puissance totale se fait en intégrant la puissance élémentaire de 0 à R , rayon de l'hélice :

$$P_m = \int_0^R dP_m$$

4.3 Pale réelle

4.4 Comparaison des différents types de turbines

4.5 Réglage de la conversion

4.6 Exemple de caractéristiques

Chapitre 4

La machine asynchrone en génératrice

Chapitre 5

La machine asynchrone à double excitation

Chapitre 6

Physique de la conversion électrovoltaïque

1 Origine de l'énergie solaire

L'énergie proviens du rayonnement solaire, qui arrive jusqu'à la Terre distante de 1.496×10^{11} m.

1.1 Constitution du Soleil

Le soleil (de rayon $R_s = 1.392 \times 10^9$ m) peut se décomposer en trois couches :

1. Le coeur :

C'est là qu'a lieu la réaction nucléaire de fusion qui libère (beaucoup) d'énergie. Cette zone occupe un quart du rayon solaire, et possède une température de 15 millions de Kelvin. On estime que 4.26 tonnes de matière y sont consommées chaque seconde pour 383×10^{15} GW de puissance. C'est un processus autorégulé (le soleil ne va pas s'effondrer ou exploser dans les années qui viennent).

2. La zone de radiation :

La zone de radiation entre 0.25 et 0.7 du rayon solaire, très dense (98% de la masse du soleil). Les atomes d'hydrogène et hélium ionisés émettent des photons absorbés par d'autres ions par convection thermique.

3. La zone de convection : Échange thermique par convection amenant la chaleur vers l'extérieur, on passe de 2 millions à 5800 K. La photosphère produit le rayonnement solaire, épaisse d'environ 400 km et de température moyenne 5781 K.

1.2 Rayonnement produit et loi utiles

Le rayonnement produit par le soleil a les caractéristiques d'un corps noir :

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(\beta h\nu) - 1} \text{ ou encore } B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\beta hc/\lambda) - 1}$$

Ces expressions se simplifient en faisant des hypothèses sur les niveaux d'énergies :

- Loi de Rayleigh-Jeans $h\nu \ll kT$: $B_\nu^{RJ}(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT$

- Loi de Wien $h\nu \gg kT$: $B_\nu^W(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp(-\frac{h\nu}{kT})$

La puissance surfacique reçue en fonction de la température est elle d'après la loi de Boltzmann :

$$P_s = \sigma T^4$$

1.3 Notion d'Air-Masse

- C'est l'épaisseur atmosphérique effectivement traversée normalisée à l'épaisseur traversée jusqu'au niveau de la mer pour un soleil au zénith, en condition normale de pression :

$$m = \frac{P}{1013} \frac{1}{\sin(\alpha)} \exp\left(\frac{-z}{7.8}\right)$$

P Pression atmosphérique en hPa ou millibar

α élévation du soleil sur l'horizon

z altitude en km (7.8 km est l'épaisseur moyenne de l'atmosphère)

- On définit alors les conditions d'ensoleillement par les lettres AM suivi de m :
 - AM0 correspond aux conditions hors atmosphère
 - AM1 au sol lorsque le soleil est au zénith
 - AM2 au sol lorsque le soleil est à 30° sur l'horizon.

En pratique le flux reçu ne dépasse 1000 W/m^2 (1367 W/m^2 pour AM0). Les conditions standard de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

blabla sur le rayonnement direct et indirect

2 Principe de la conversion : la cellule photovoltaïque

2.1 Historique

2.2 La jonction PN

cf UE 232

2.3 Effet photovoltaïque

Un photon suffisamment énergétique peut créer une paire électron/trou dans la zone de transition, contribuant ainsi à augmenter le courant inverse (contribution du courant de génération-recombinaison).

Il faut pour cela que l'énergie du photon soit supérieure à l'énergie de gap (Pour le silicium $E_g = 1.1 \text{ eV}$).

3 Mise en oeuvre

Chapitre 7

Électronique de puissance pour les parcs éoliens connectés au réseau