

Partie A - Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique

A.1 - Expression de la puissance de la turbine.

on a $P = \frac{dE}{dt}$ avec $dE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot S \cdot dv$
 $dv = V \cdot dt$

Donc $\Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \frac{V dt}{dt}$

$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$

A.2 - la puissance captée par la turbine Peol

Sachant que : $C_p = \frac{P_{eol}}{P}$

Donc : $P_{eol} = C_p \cdot P \Rightarrow P_{eol} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$

A.3 - le couple de turbine Ceol

on définit : $C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega}$

et $P_{eol} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$ avec

$S = \pi R^2$ surface balayée

$\Rightarrow C_{eol} = \frac{1}{\Omega} \times \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3$

on note aussi que $\lambda = \frac{R \Omega}{V}$

$\Rightarrow V = \frac{R \Omega}{\lambda}$

$\Rightarrow C_{eol} = \frac{1}{\Omega} \times \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left(\frac{R \Omega}{\lambda}\right)^3$

$= \frac{1}{\Omega} \cdot \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{R^3 \Omega^3}{\lambda^3} \cdot V^2$

Donc : $C_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \cdot \frac{1}{\lambda}$

A.4 - la valeur de C_p et λ

le point optimal est le point où

C_p est maximal $\Rightarrow C_p = 0.44$

Donc $\lambda = 7$

A.5 - la valeur numérique de la puissance Peol

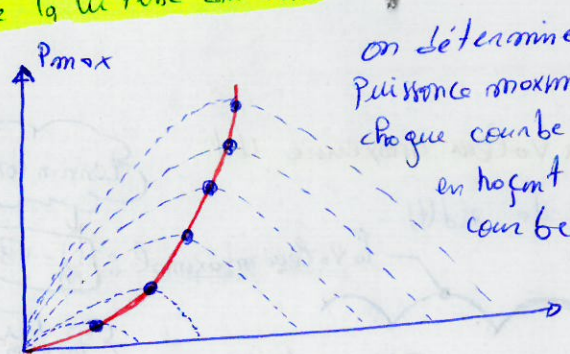
Peol

$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$

$= \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3$

$P_{eol} = 11,513 \text{ kW}$

A.5 - la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent



on détermine la puissance maximale de chaque courbe puis en reliant les courbes.

A.5 - la nécessité d'asservir

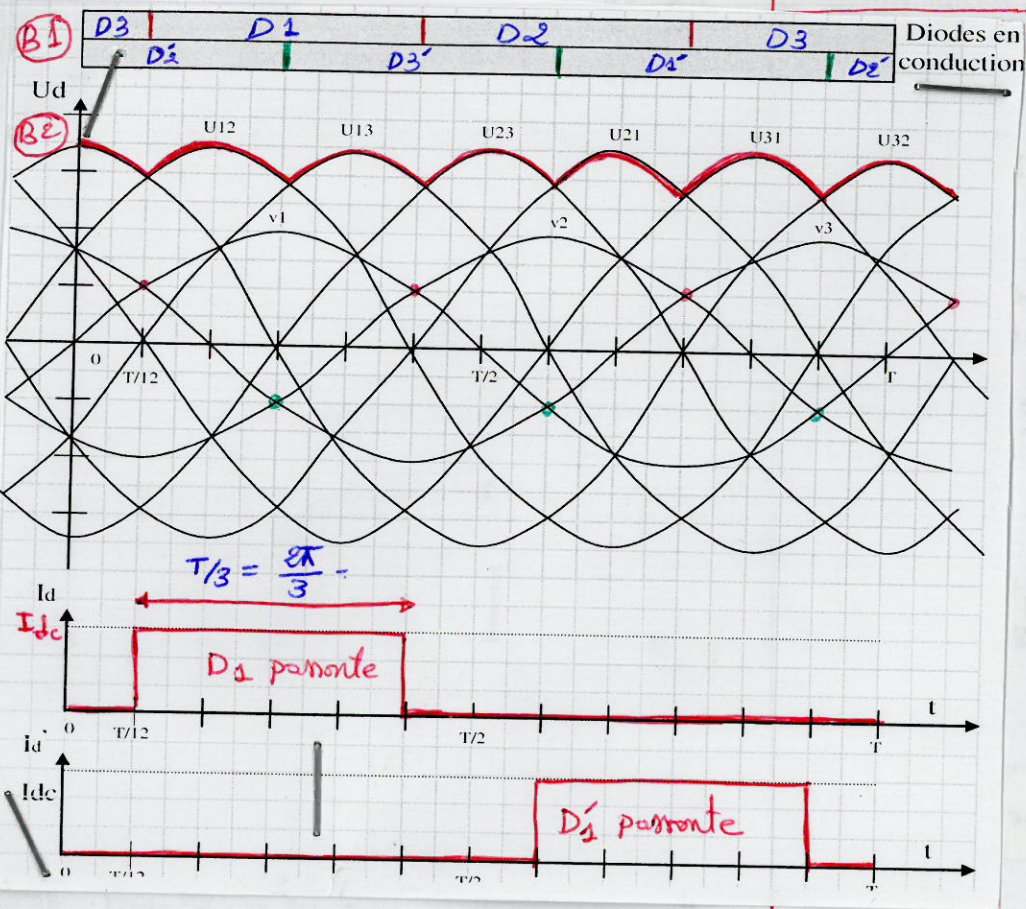
À partir des graphes précédentes, on constate que la puissance maximale fournie par l'éolienne est variable selon la vitesse de rotation de l'éolienne.

Pour fonctionner à régime de puissance max constante, on doit régler (asservir) la pale de l'éolienne, afin d'avoir une vitesse constante \Rightarrow donc une puissance constante.

www.autocpge.info

Pontie B - Etude du redresseur de la chaîne de conversion éolienne

DMC: $U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$



B.4) la valeur de V_m pour avoir $U_d = 48V$

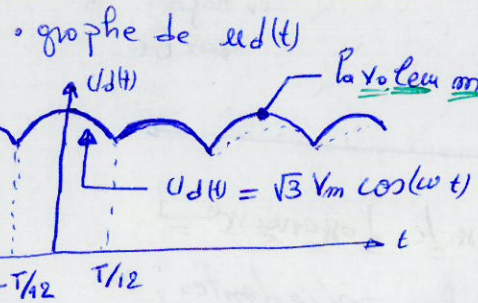
d'après l'expression précédente
 $V_m = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \cdot U_d$
 $\rightarrow AN: V_m = 29V$

B.5/ le courant I_d et $I_{d'}$

- $I_D = I_{Dc}$ si D_2 passant et $I_{D'} = 0$ si bloquée
 - $I_{D'} = I_{Dc}$ si D_2' passant et $I_D = 0$ si bloquée
- voir figure ci-après

B.6/ la valeur moyenne de I_d

B.3/ la valeur moyenne U_d



tennis composé
 $U = \sqrt{3} V_m$
 tennis simple

sur la période $[-T/12, T/12]$
 $\rightarrow U_d(t) = \sqrt{3} V_m \cos(\omega t)$ avec une période $T/6$

DMC

$$U_d = \langle u_d(t) \rangle = 2 \times \frac{1}{T/6} \int_0^{T/12} \sqrt{3} V_m \cos \omega t dt$$

$$\Rightarrow U_d = 2 \times \frac{6}{2\pi} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} V_m \cos \theta d\theta$$

$$= \frac{6}{\pi} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} V_m \cos \theta d\theta$$

$$= \frac{6\sqrt{3} V_m}{\pi} [\sin \theta]_0^{\pi/6}$$

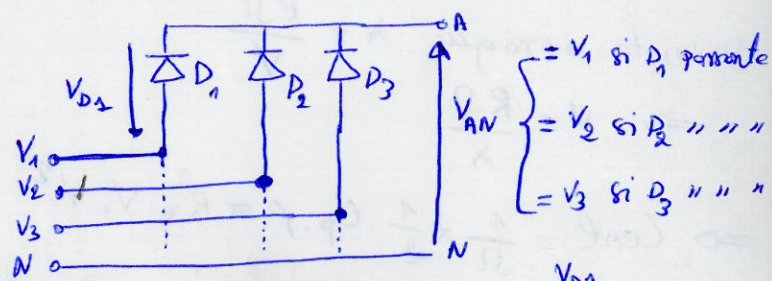
$$= \frac{6\sqrt{3} V_m}{\pi} (\sin(\pi/6) - \sin(0))$$

www.aurtope.com

$I_d = \langle i_d(t) \rangle = \frac{\text{surface}}{T} = \frac{\frac{2\pi}{3} \cdot I_{Dc}}{2\pi}$
 $I_d = \frac{I_{Dc}}{3} \Rightarrow I_{Dc} = 3.34 A$

B7 - Allure de la tension $U_{d2}(t)$

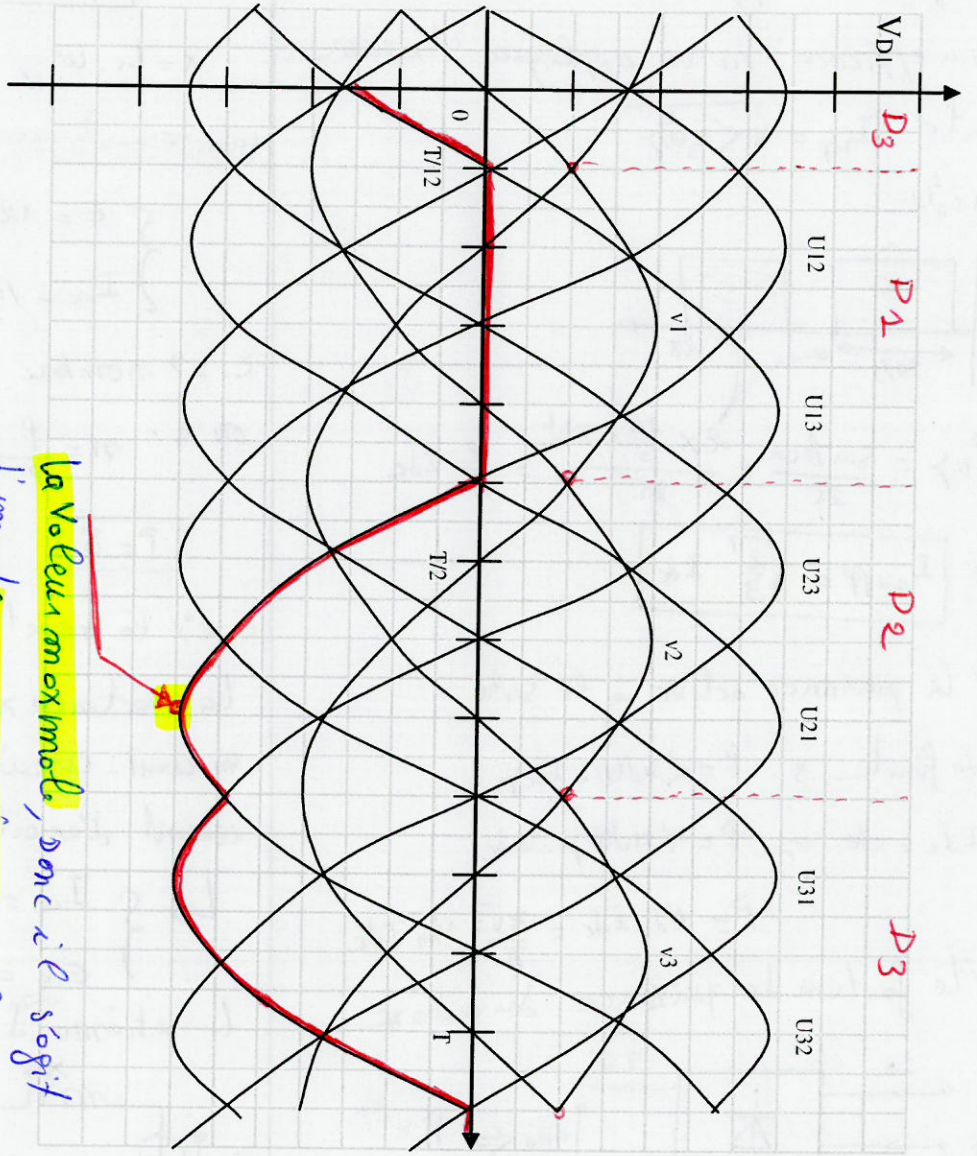
on trace ci-dessous la partie supérieure
 \rightarrow il s'agit d'un P3 à mode



DMC $V_{D2} = V_2 - V_{AN} \equiv$

- $V_{D2} = V_1 - V_2 = 0$ si D_1 passant
- $V_{D2} = V_2 - V_2 = 0$ si D_2 passant
- $V_{D2} = V_2 - V_3 = U_{13}$ si D_3 passant

voir DR



la valeur maximale, donc il s'agit
 d'une tension composée maximale U_{mox}

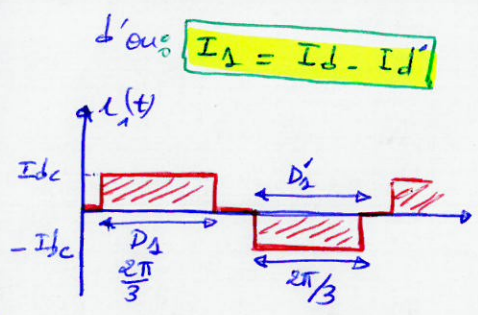
$\hookrightarrow U_{mox} = \sqrt{3} \cdot U_m$

$U_{mox} = \sqrt{3} \cdot 29 \Rightarrow U_{mox} = 50,2 \text{ V}$

www.autocpge.info

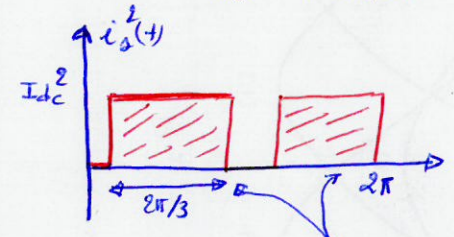
B8 - Représentation du courant de ligne I_Δ

D'après la loi des noeuds : $I_{\Delta} = I_{\Delta} + I_{\Delta}'$



La valeur efficace, on va appliquer l'expression suivante

$I_{ref} = \sqrt{\langle i_{\Delta}^2(t) \rangle}$



$\langle i_{\Delta}^2(t) \rangle = \frac{\text{surface}}{2\pi} = \frac{2 \times \frac{2\pi}{3} \times Idc^2}{2\pi} = \frac{2}{3} Idc^2$

d'où $I_{seff} = \sqrt{\frac{2}{3}} Idc$

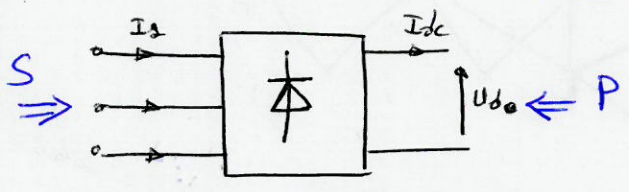
B-9% La puissance active à la sortie

Par définition : $P = \langle u_{\Delta}(t) \cdot Idc \rangle$

si $Idc = cte \Rightarrow P = \langle u_{\Delta}(t) \rangle \cdot Idc$

$P = U_{\Delta} \cdot Idc = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m Idc$

B10% le facteur de puissance du redresseur



$f_p = \frac{P}{S} = \frac{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m Idc}{3 V_{seff} I_{seff}}$

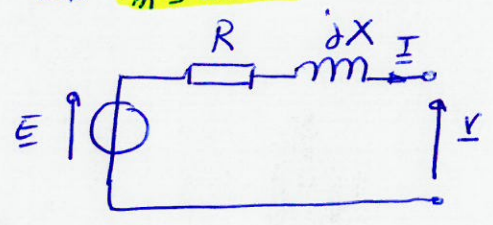
$V_{seff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, I_{seff} = \sqrt{\frac{2}{3}} Idc$

$f_p = \frac{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m Idc}{3 \cdot \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} Idc} \Rightarrow f_p = \frac{3}{\pi} \Rightarrow f_p = 96\%$

Partie C : Etude de la machine synchrone de l'éolienne

Machine synchrone 3φ : 127/220 V ^{composé}
simple

$S_m = 3 \text{ kVA}$



$x = L_s \cdot \omega, n = 375 \text{ tr/min}$

caractéristiques pour $n = 375 \text{ tr/min}$

$\begin{cases} E = 120 I_e \\ I_{cc} = 10 I_e \end{cases}$ ^{courant d'excitation}

C-2% nombre de paire de pôles P

on a : $n = \frac{f}{P} \times 60 \Rightarrow P = \frac{f}{n} \times 60$ ^{50 Hz}

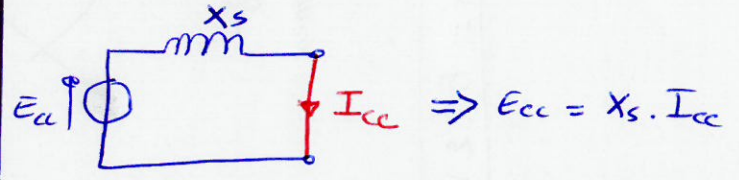
$P = 8$

C-2% la reactance X

La reactance x est calculée à l'essai en court-circuit (C.C). on fixe un courant d'excitation I_e.

$\begin{cases} I_{cc} = 10 I_e \\ E_{cc} = 120 I_e \end{cases}$

le schéma devient :



$\Leftrightarrow X_s = \frac{E_{cc}}{I_{cc}} = \frac{120 I_e}{10 I_e} \Rightarrow X_s = 12 \Omega$

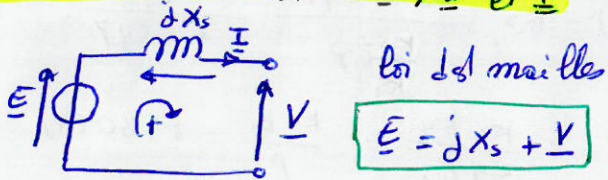
C-3% le courant nominal des courants statoriques

on a $S_m = \sqrt{3} U_m \cdot I_m \Rightarrow I_m = \frac{S_m}{\sqrt{3} U_m}$

$I_m = 7.87 \text{ A}$

www.autocege.info

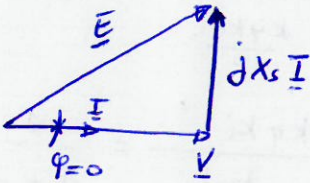
C.4% La relation entre \underline{E} , \underline{V} et \underline{I}



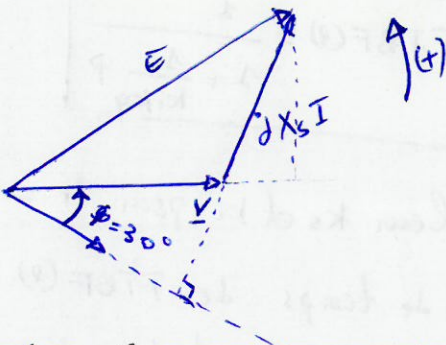
loi des mailles
 $\underline{E} = jX_s \underline{I} + \underline{V}$

C.5% Diagramme de Fresnel

cas 1: $\varphi = 0$



cas 2: $\varphi = 30^\circ$

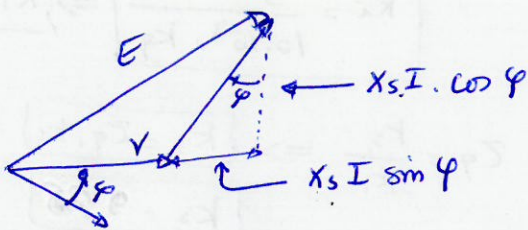


C.6% la valeur de E pour les deux cas

cas 1: appliquons le théorème de Pythagore: $\underline{E} = \sqrt{V^2 + (X_s I)^2}$

$\underline{E} = 150,31V$

cas 2



donc: $E^2 = (V + X_s I \sin \varphi)^2 + (X_s I \cos \varphi)^2$

$E = \sqrt{(V + X_s I \sin \varphi)^2 + (X_s I \cos \varphi)^2}$

$E = 182,11V$

D. contrôle de la vitesse et de la puissance de la machine synchrone

www.autoepee.info

D.1% La transformée de Laplace de v_d et v_q et ainsi les fonctions de transfert $H_d(p)$ et $H_q(p)$

• tension $v_d(t)$

on a: $v_d(t) = R_s I_d(t) + \frac{d}{dt} (L_d I_d(t) + \Phi_{sf}) - \omega (L_q I_q(t))$

$v_d(t) = R_s I_d(t) + L_d \frac{dI_d(t)}{dt} + \frac{d\Phi_{sf}}{dt} - \omega L_q I_q(t)$

$v_d(t) = R_s I_d(t) + L_d \frac{dI_d(t)}{dt} - \omega L_q I_q(t)$

$\underline{v}_d(p) = R_s \underline{I}_d(p) + L_d p \underline{I}_d(p) - \omega L_q \underline{I}_q(p)$

$(R_s + L_d p) \underline{I}_d(p) = \underline{v}_d(p) - \omega L_q \underline{I}_q(p)$

$\underline{I}_d(p) = \frac{1}{R_s + L_d p} [\underline{v}_d(p) - \omega L_q \underline{I}_q(p)]$

Donc $\Rightarrow H_d(p) = \frac{1}{R_s + L_d p}$

• tension $v_q(t)$

$v_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} (L_q I_q(t)) + \omega (L_d I_d(t) + \Phi_{sf})$

$v_q(t) = R_s I_q(t) + L_q \frac{dI_q(t)}{dt} + \omega L_d I_d(t) + \omega \Phi_{sf}$

$\underline{v}_q(p) = R_s \underline{I}_q(p) + L_q p \underline{I}_q(p) + \omega L_d \underline{I}_d(p) + \omega \Phi_{sf}$

$(R_s + L_q p) \underline{I}_q(p) = \underline{v}_q(p) - \omega L_d \underline{I}_d(p) - \omega \Phi_{sf}$

$\underline{I}_q(p) = \frac{1}{R_s + L_q p} [\underline{v}_q - \omega L_d \underline{I}_d(p) - \omega \Phi_{sf}]$

Donc: $H_q(p) = \frac{1}{R_s + L_q p}$

D.2% Hd(p) sous la forme $\frac{k_d}{1+\tau_d p}$

On a: $H_d(p) = \frac{1}{R_s + L_d p}$
 $= \frac{1/R_s}{1 + \frac{L_d p}{R_s}} = \frac{k_d}{1 + \tau_d p}$

Dmc: $k_d = \frac{1}{R_s}$ / $\tau_d = \frac{L_d}{R_s}$

D.3% Hg(p) sous la forme $\frac{k_g}{1+\tau_g p}$

on a: $H_g(p) = \frac{1}{R_s + L_g p}$
 $= \frac{1/R_s}{1 + \frac{L_g p}{R_s}} = \frac{k_g}{1 + \tau_g p}$

Dmc: $k_g = \frac{1}{R_s}$ / $\tau_g = \frac{L_g}{R_s}$

D.4% la fonction de Transfert en Boucle ouverte

$FTBO(p) = \frac{I_v(p)}{E(p)} = R(p) \cdot H_g(p)$

$FTBO(p) = \left(k_s + \frac{k_i}{p} \right) \left(\frac{k_g}{1 + \tau_g p} \right)$

• l'eneur statique: le correcteur installé est de type **PI** \Rightarrow la fonction en BO possède une intégral
 d'où l'eneur statique: $\epsilon_s = 0$

D.5% la fonction de transfert en Boucle fermée: $\tau_g = \frac{k_s}{k_i}$

on détermine tout d'abord la fonction en boucle ouverte pour ses conditions:

$FTBO(p) = k_s \left(1 + \frac{k_i}{k_s p} \right) \left(\frac{k_g}{1 + \tau_g p} \right)$
 $= k_s \left(1 + \frac{1}{\frac{k_s}{k_i} p} \right) \left(\frac{k_g}{1 + \tau_g p} \right)$
 $\frac{k_s}{k_i} = \tau_g$

$FTBO(p) = k_s \frac{1 + \tau_g p}{\tau_g p} \frac{k_g}{1 + \tau_g p}$
 $= \frac{k_s k_g}{\tau_g p} = \frac{k_g k_i}{p} = FTBO(p)$

Retour unitaire $\Rightarrow FTBF(p) = \frac{FTBO(p)}{1 + FTBO(p)}$

$\Rightarrow FTBF(p) = \frac{\frac{k_g k_i}{p}}{1 + \frac{k_g k_i}{p}}$
 $= \frac{k_g k_i}{p + k_g k_i} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_g k_i} p}$

Dmc: $FTBF(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_i k_g} p}$

D.6% la valeur ks et ki pour $\tau_r = 60ms$

la constante de temps de $FTBF(p)$ et $\tau_{bf} = \frac{1}{k_i k_g}$, il s'agit bien d'un système de 1^{er} ordre $\Rightarrow \tau_r = 3 \tau_{bf}$

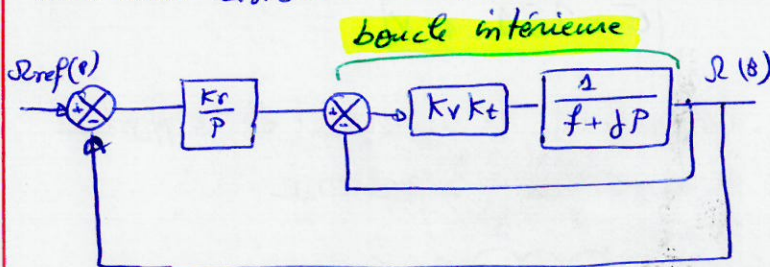
$3 \times \frac{1}{k_i k_g} = 60ms$

$k_i = \frac{3}{10 \cdot 10^{-3} \times k_g} \Rightarrow k_i = 11,90$

Or $\tau_g = \frac{k_s}{k_i} \Rightarrow k_s = \tau_g \cdot k_i$
 $k_s = 1,55$

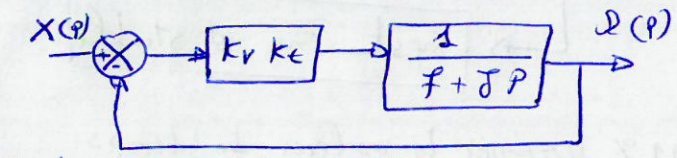
D.6% la fonction de transfert $H(p) = \frac{R(p)}{S_{ref}(p)}$

on retrace à nouveau le schéma pour être bien lisible: $C_r(p) = 0$



Boucle extérieure

Boucle intérieure :



fonct du moteur M(p)

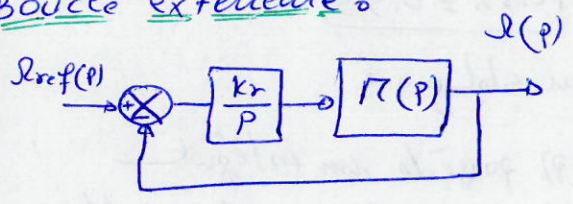
$$\Pi(p) = \frac{Q(p)}{X(p)} = \frac{FTBO_M(p)}{1 + FTBO}$$

$$FTBO_M(p) = \frac{Kv \cdot Ke}{f + Jp}$$

d'où :

$$M(p) = \frac{Kv \cdot Ke}{(Jp + f) + KvKe}$$

Boucle extérieure :



$$FTBO(p) = \frac{Kr}{P} \frac{Kv \cdot Ke}{(Jp + f) + KvKe}$$

dmc :

$$H(p) = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{\frac{Kr}{P} \frac{Kv \cdot Ke}{(Jp + f) + KvKe}}{1 + \frac{Kr}{P} \frac{Kv \cdot Ke}{(Jp + f) + KvKe}}$$

$$H(p) = \frac{Kr \cdot Kv \cdot Ke}{P[(Jp + f) + KvKe] + Kr \cdot Kv \cdot Ke}$$

$$H(p) = \frac{Kr \cdot Kv \cdot Ke}{JP^2 + (f + Kv \cdot Ke)P + Kr \cdot Kv \cdot Ke}$$

D8% mettre H(p) sous sa forme canonique

$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{f + Kv \cdot Ke}{Kr \cdot Kv \cdot Ke} p + \frac{J}{Kr \cdot Kv \cdot Ke} p^2}$$

Dmc : A = 1, $\frac{1}{\omega_m^2} = \frac{J}{Kr \cdot Kv \cdot Ke}$

et $\frac{2m}{\omega_m} = \frac{f + Kv \cdot Ke}{Kr \cdot Kv \cdot Ke}$

$$\Leftrightarrow A = 2, \quad \omega_m = \sqrt{\frac{Kr \cdot Kv \cdot Ke}{J}}$$

$$m = \frac{1}{2} \times \omega_m \times \frac{f + Kv \cdot Ke}{Kr \cdot Kv \cdot Ke}$$

$$= \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{Kr \cdot Kv \cdot Ke}{J}} \times \frac{f + Kv \cdot Ke}{Kr \cdot Kv \cdot Ke}$$

$$m = \frac{1}{2} \times \frac{f + Kv \cdot Ke}{\sqrt{Kr \cdot Kv \cdot Ke \cdot J}}$$

D-9% la valeur de kv et kr

on a : $\omega_m^2 = \frac{Kr \cdot Kv \cdot Ke}{J} \Rightarrow Kr \cdot Kv = \omega_m^2 \cdot \frac{J}{Ke}$

en remplace cette equat dans m

$$\Rightarrow m = \frac{1}{2} \times \frac{f + Kv \cdot Ke}{\sqrt{\omega_m^2 \cdot \frac{J}{Ke} \times Ke \times J}}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{f + Kv \cdot Ke}{\omega_m \cdot J}$$

d'où :

$$Kv = \frac{2m \cdot J \cdot \omega_m - f}{Ke} \Rightarrow Kv = 6.22$$

ou

$$Kv \cdot Kr = \omega_m^2 \cdot \frac{J}{Ke} \Rightarrow Kr = \frac{\omega_m^2 \cdot J}{Ke \cdot Kv} \Rightarrow$$

$$Kr = 8.7$$

D10 - la marge du phase MP

Par définition :

$$\left. \begin{aligned} MP &= 180 + \text{Arg}(FTBO(j\omega_c)) \\ \omega_c / |FTBO(j\omega_c)| &= 1 \end{aligned} \right\} \text{défini}$$

m rappelle que : $FTBO(p) = \frac{Kv \cdot Ke \cdot Kr}{Kr \cdot Ke \cdot Kv} \frac{1}{P(Jp + f + Kv \cdot Ke)}$

$$\Rightarrow FTBO(p) = \frac{60}{P(1 + \frac{J}{f + Kv \cdot Ke} p)} (1 + z_0 p)^P$$

tel que : $G_0 = \frac{Kv \cdot Kt \cdot Kp}{f + Kv \cdot Kt} = 7.142$

$\tau_0 = \frac{\tau}{f + Kv \cdot Kt} = 72.43 \text{ ms}$

FTBO (P) = $\frac{G_0}{P(1 + \tau_0 P)}$

(=) FTBO(jw) = $\frac{G_0}{jw(1 + \tau_0 jw)}$

* module et la phase

$|FTBO(jw)| = \frac{G_0}{w \sqrt{1 + (\tau_0 w)^2}}$
 $\text{Arg}(FTBO(jw)) = -90 - \text{Arctg}(\tau_0 w)$

cherchons w_c ?

on a : $|FTBO(jw_c)| = 1$

$\frac{G_0}{w_c \sqrt{1 + (\tau_0 w_c)^2}} = 1$

(=) $w_c \sqrt{1 + (\tau_0 w_c)^2} = G_0$

$\tau_0^2 w_c^4 + w_c^2 - G_0^2 = 0$

on pose $X = w_c^2 \Rightarrow \tau_0^2 X^2 + X - G_0^2 = 0$

on prend $X > 0 \Rightarrow X = 42 \Rightarrow w_c = 6.48 \text{ rad/s}$

Pour la marge de phase

MP = $180 + \text{Arg}(FTBO(jw_c))$
 $= 180 - 90 - \text{arctg}(\tau_0 w_c)$

$\Rightarrow MP = 65.16^\circ$

* la stabilité

FTBO(P) est un système 2^{ème} ordre

$\Rightarrow MA = +\infty$

$\Rightarrow MA > 0$ et $MP > 0$

\hookrightarrow système stable

D.117 Donner la valeur de temps de réponse :

Pour cette quest on utilise l'abaque de l'annexe.

on $m = 0.7 \Rightarrow tr_{5\%} \times w_m \approx 3$

$\hookrightarrow tr_{5\%} \approx \frac{3}{w_m}$

$tr_{5\%} = 0.3 \text{ s}$

* l'erreur statique :

FTBO(P) possède un intégrat
 Donc l'erreur statique est nulle

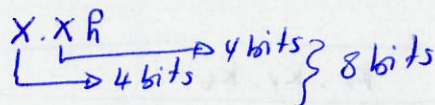
$\epsilon_s = 0$

E-Communicat Réseau avec l'éolienne

on se base sur l'annexe

E.1 / Adresse MAC ds machines

Adresse MAC est codée par 6 octets \hookrightarrow (8 bit)



DMC : $00 \ 02 \ 02 \ AF \ F5 \ E2$
 \hookrightarrow Destinataire

$00 \ 60 \ 08 \ 62 \ 04 \ 7B$
 \hookrightarrow Emettrice (source)

E2 - type de protocole

après l'adresse source nous avons trouvé type = 0800 \Rightarrow d'après l'annexe, il s'agit d'un protocole IP

www.autopge.info

E3% l'adresse IP de machine

• IP émettrice : 0A.0A.9F.02

10.10.159.2

• IP destinataire : 0A.0A.01.01

10.10.1.1

ses données sont identifiées avec le thème IP.

E4% le protocole de la couche
Trois ports.

a partir de la trame IP :

11 ⇒ protocole UDP

E8% les numéros de ports :

Port source < 1024

Port destinataire > 1024



• Port source : 0029 ⇒ 41

• Port destinataire : A1E4 ⇒ 41444

www.autocpge.info

La suite hexadécimale ci-dessous correspond à une trame ETHERNET interceptée par un logiciel d'analyse de trames.

00 01 02 af f5 e2 00 60 08 61 04 7b 08 00 45 00 00 3d dc 56 00 0d 80 11 aa	MAC dest	MAC source	Protocole	Protocole & IP
42 0a 0a 9f 02 0a 0a 01 01 0a 79 00 35 00 29 a1 e4 00 02 01 00 00 01 00 00	IP émet	IP destin	Port source	Port dest

00 00 00 00 02 77 70 08 6e 65 74 73 63 61 70 65 03 63 6f 6d 00 00 01 00 01