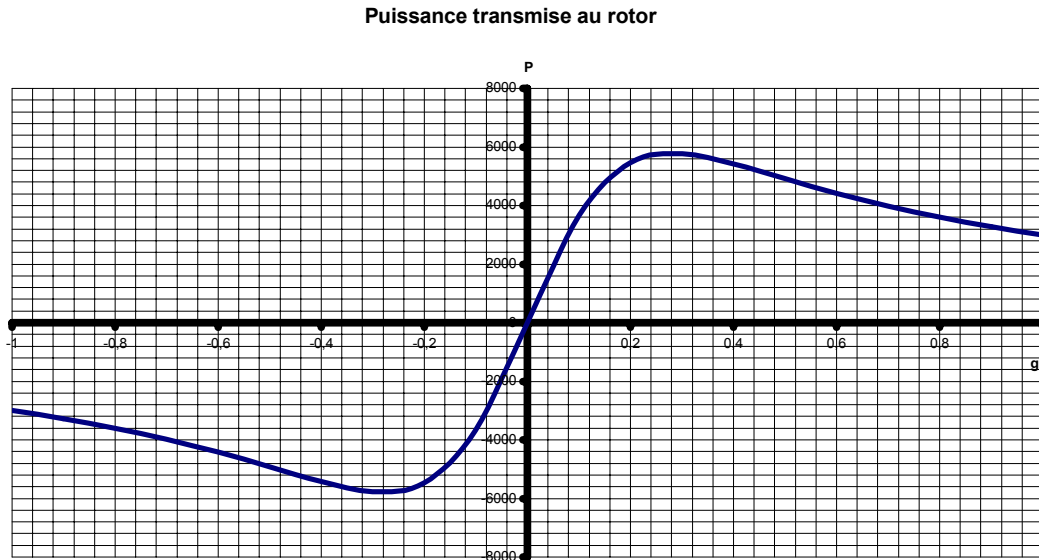


Éléments de correction génératrice asynchrone

1. Machine couplée au réseau :

1.1 Représentation de $P_{tr} = f(g)$



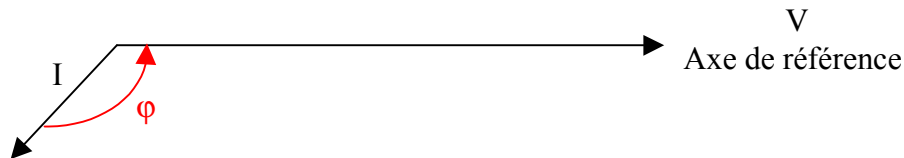
1.2 Les limites de fonctionnement de l'éolienne sont obtenues pour g compris entre 0 et -0.279 , la stabilité du point de fonctionnement étant garantie pour $(dP_{tr}/d\Omega) < 0$. Pour un

glissement inférieur à -0.279 le moteur décroche. Soit la vitesse de l'éolienne comprise entre 1500 et 1918 tr.min^{-1} .

1.3 La puissance au rotor étant négative cela signifie que la machine fournit de la puissance au réseau. La machine est en génératrice.

1.4 $Z = a + jb$ on obtient le courant dans une phase : $\underline{I} = \frac{V}{Z}$

En notant φ l'argument de Z on voit que $\sin\varphi$ est toujours positif. Ce qui implique que φ compris entre 0 et π le courant est donc en retard sur la tension.



Conclusion : La machine absorbe donc forcément de la puissance réactive.

2. Machine auto-excitée :

2.1 La machine étant à vide lorsqu'elle est entraînée par l'éolienne il y a apparition d'une tension à ses bornes si il existe un champ rémanent.

- 2.2 Cette tension pourrait être amenée à sa valeur nominale si on fournit à la machine de la puissance réactive suffisante pour sa magnétisation à l'aide d'une batterie de condensateur.
- 2.3 La relation (1) conduit à deux valeurs de C, seule une est raisonnable. $C_1 = 23.3\mu\text{F}$ (l'autre $C_2 = 251\mu\text{F}$). En effet pour C_1 cela correspond à une puissance réactive fournie par phase de **386 Vars** et C_2 12514 Vars (à rejeter).
- 2.4 A vide le courant dans le rotor est pratiquement nul. Par conséquent l'énergie réactive est absorbée uniquement par l'inductance magnétisante L_μ . Il faut donc que les capacités fournissent cette puissance réactive.

Soit par phase $Q = \frac{V_s^2}{L_\mu \omega}$ en négligeant la chute de tension dans R_s .

$Q = 397 \text{ VAR.}$

Valeur pratiquement identique à celle trouvée à la question 2.1

MANIPULATION

La machine asynchrone a les caractéristiques suivantes :

P = 1500 Watts ; 4 pôles.
 Tension étoile 380 V Courant $I_s = 3.5 \text{ A}$
 Tension triangle 220 V
 Cos $\varphi = 0.82$.

Le couplage choisi sera étoile compte tenu de la tension du réseau et des indications de la plaque signalétique.

Deux essais préalables alimentation (exclusivement tour à tour) ont permis de vérifier que les deux machines ont le même sens de rotation. Si ce n'est pas le cas on peut soit inverser 2 phases de la machine asynchrone soit inverser l'inducteur de la machine à courant continu soit l'induit.

La mesure de puissance a été réalisée par la méthode des 2 Wattmètres.

Procédure : On excite au point nominal la machine à courant continu on couple alors la machine asynchrone au réseau puis on augmente progressivement la tension aux bornes de l'induit jusqu'à $I_s = 3.5 \text{ A}$.

3. Couplage au réseau :

L'indication du premier Wattmètre sera notée : W_1 et le deuxième W_2 .

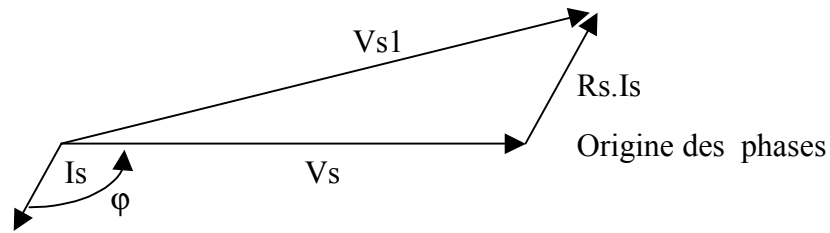
3.1 Rappel Puissance active de la machine $P = W_1 + W_2$ et la Puissance réactive

$$Q = \sqrt{3} \times (W_1 - W_2)$$

On mesure alors $W_1 = -130$ et $W_2 = -1240$ d'où $P = -1370 \text{ W}$

$Q = 2095$ Vars. Facteur de puissance $\cos\varphi = -0.547$ La machine absorbe de la puissance réactive et fournit de la puissance au réseau.

3.2 Vérification avec le modèle proposé, on réalise le diagramme de Fresnel pour une



phase :

On peut écrire que $V_{s1} = \sqrt{V_s^2 + (R_s \times I_s)^2 - 2 \times R_s \times I_s \times V_s \times \cos\varphi}$

$V_{s1} = 238.8$ Volts supérieur à 230 Volts du secteur ce qui confirme encore le fonctionnement en génératrice.

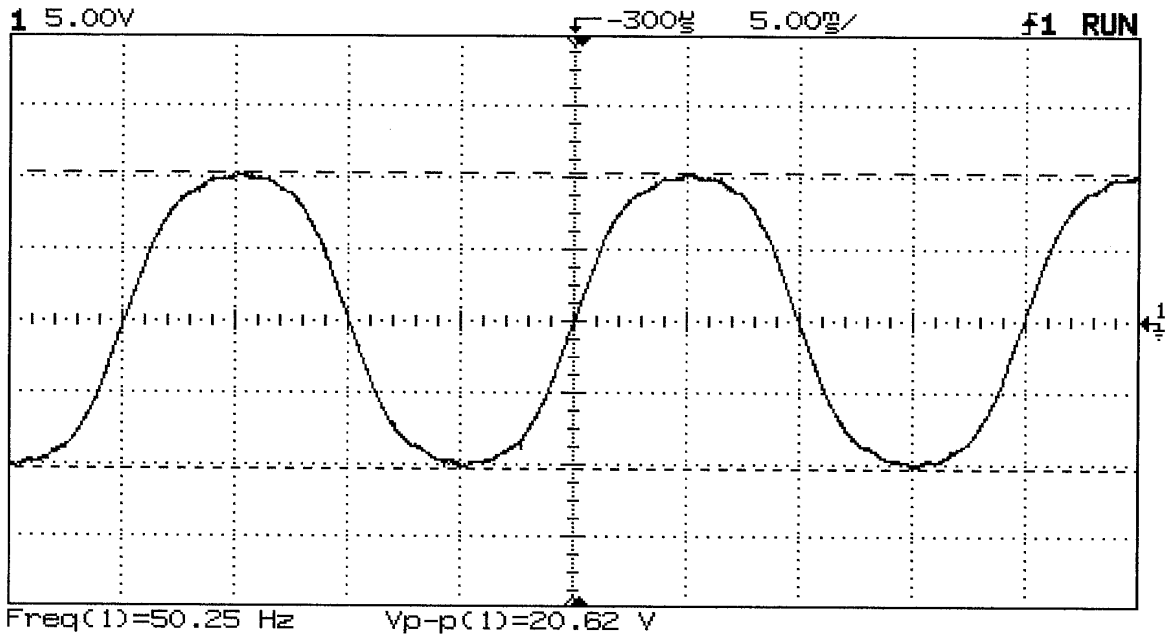
La vitesse de rotation est alors de 1550 tr.min⁻¹ ce qui implique un glissement de - 4%. **La puissance transmise au rotor est alors 1770 Watts** est donc supérieure à **la puissance mesurée 1370 watts**. La différence est due aux pertes dans le moteur (pertes joules rotoriques, pertes ferromagnétiques, pertes joules statoriques).

3.3 Le paramètre qui fait varier la puissance transmise au réseau est la vitesse de rotation qui doit être supérieure à la vitesse de synchronisme. Le facteur de puissance est négatif le courant a un déphasage arrière supérieur à 90°. La machine absorbe donc de la puissance réactive qui est fournie par le réseau.

4. Machine auto-excitée :

4.1 Visualisation à l'aide d'un oscilloscope de la tension générée au stator de la machine découplée du réseau et à vide avec une excitation nulle (voir page suivante). Cette tension est relativement faible elle est due à la rémanence et au fait que le rotor est mis en rotation. Sa fréquence F de 50 Hz est justifiée par la relation suivante :

$$F = \frac{P \times N}{60} \text{ où } N \text{ est la vitesse en tr.min}^{-1}$$



4.3 Il faut donc l'amener à une valeur exploitable en augmentant le flux magnétique dans la machine, en connectant une batterie de condensateur. On dispose d'un banc de 2 kvars. La machine asynchrone est entraînée à une vitesse de 1500 tr.min^{-1} constante. On met en fonctionnement graduellement les condensateurs en attendant une stabilité de la valeur efficace de la tension entre phases.

%C	0	5	10	15	20	25	30	40	45
U	11	14	15	16	17.4	18.8	20.8	27.3	33.2

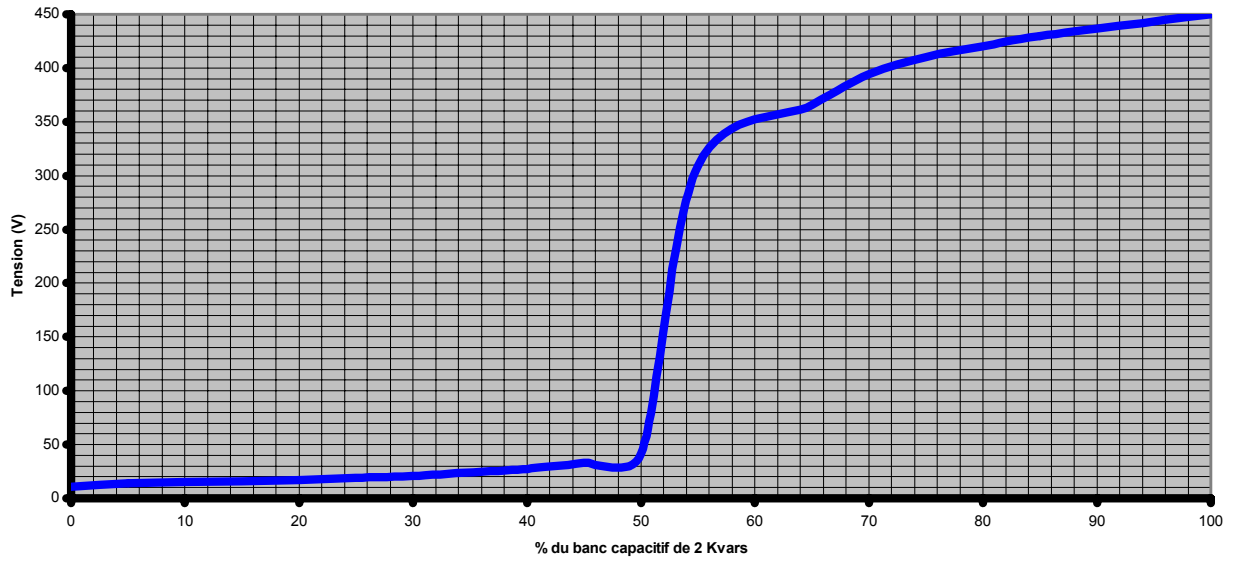
%C	50	55	65	70	75	80	85	100
U	42	309	366	394	410	420	430	450

Caractéristique $V_s = f(\%C)$ voir page suivante:

La génératrice s'amorce véritablement à partir de 55 % du banc capacitif en service soit une capacité de $7.3 \mu\text{F}$ (La capacité nominale vaut $13.26 \mu\text{F}$) et une tension entre phases de 309 Volts. Ce qui représente une puissance réactive fournie de 657 Vars. On peut comparer cette valeur avec la puissance réactive consommée par l'inductance magnétisante L_μ noté Q_μ pour les trois phases.

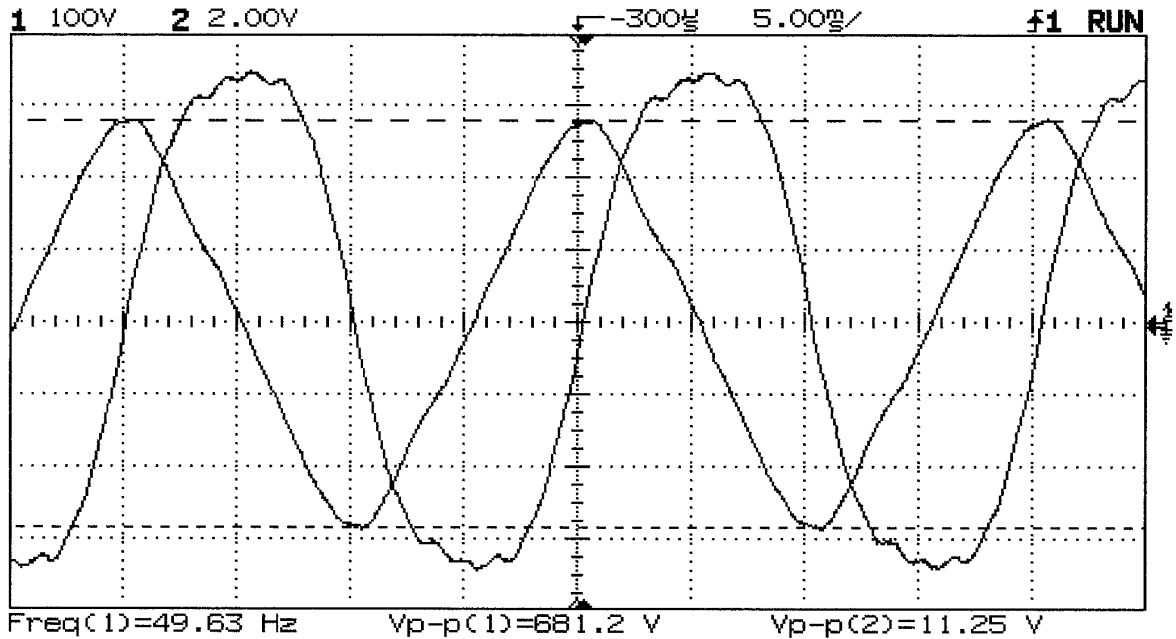
$$Q_\mu = \frac{3 \times V_s^2}{L_\mu \times W} = 644 \text{ Vars.}$$

Tension en fonction de l'excitation



Oscillogramme de V_s et I_s relatif à un enroulement du stator pour 100% d'excitation et 0 % du plan de charge résistif :

Voie 1 tension entre phase et neutre.
Voie 2 image du courant 1V pour 1A.



Cet oscillogramme permet de mettre en évidence le déphasage de 90° avant du courant sur la tension.

La valeur efficace est d'environ $V_s = \frac{681.2}{2 \times \sqrt{2}} = 241$ Volts, soit $U_s = 417$ Volts valeur cohérente avec celle relevée dans le tableau 450 Volts.

4.3 Par analogie avec la machine synchrone, on peut dire que la capacité joue le rôle analogue du courant d'excitation c'est donc la grandeur de réglage de la tension aux bornes de la génératrice.

La courbe n'est pas linéaire et montre donc la difficulté de contrôle de la tension de sortie et ce d'autant qu'en charge il faudra tenir compte de l'énergie réactive du rotor. En effet il n'existe pas de relation simple entre l'excitation et la tension de sortie.

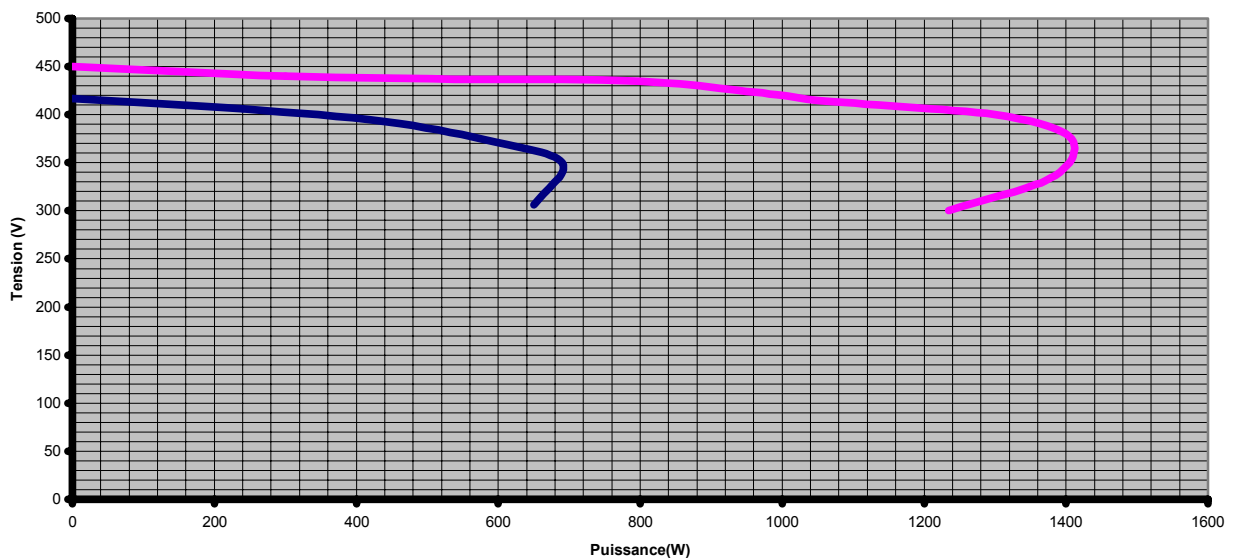
4.4 La tension nominale entre phases est obtenue pour 75% du banc capacitif connecté ce qui représente 1500 Vars soit par phase 500 vars .

On peut comparer cette valeur à celle trouvée à la question 2.4 environ 400 vars. La différence provient du courant dans le rotor qui n'a pas été pris en compte en considérant une valeur correcte de l'inductance magnétisante.

On garde l'excitation de **75% du banc de 2 kvars** avec V_s à vide égale à **410 Volts**. La charge est constituée d'un banc résistif d'une puissance nominale de 4 kW. (Voir document réponse).

4.5 et 4.6 La caractéristique tension en fonction de la puissance est représentée dans le même repère ci-dessous pour une excitation de 75 %C et 100% C respectivement de couleur bleue et rose.

Caractéristiques $U_s = f(P)$



Lorsque l'excitation est de 75% C, on constate que le décrochage de la génératrice intervient à partir d'une puissance maximale de 690 Watts.

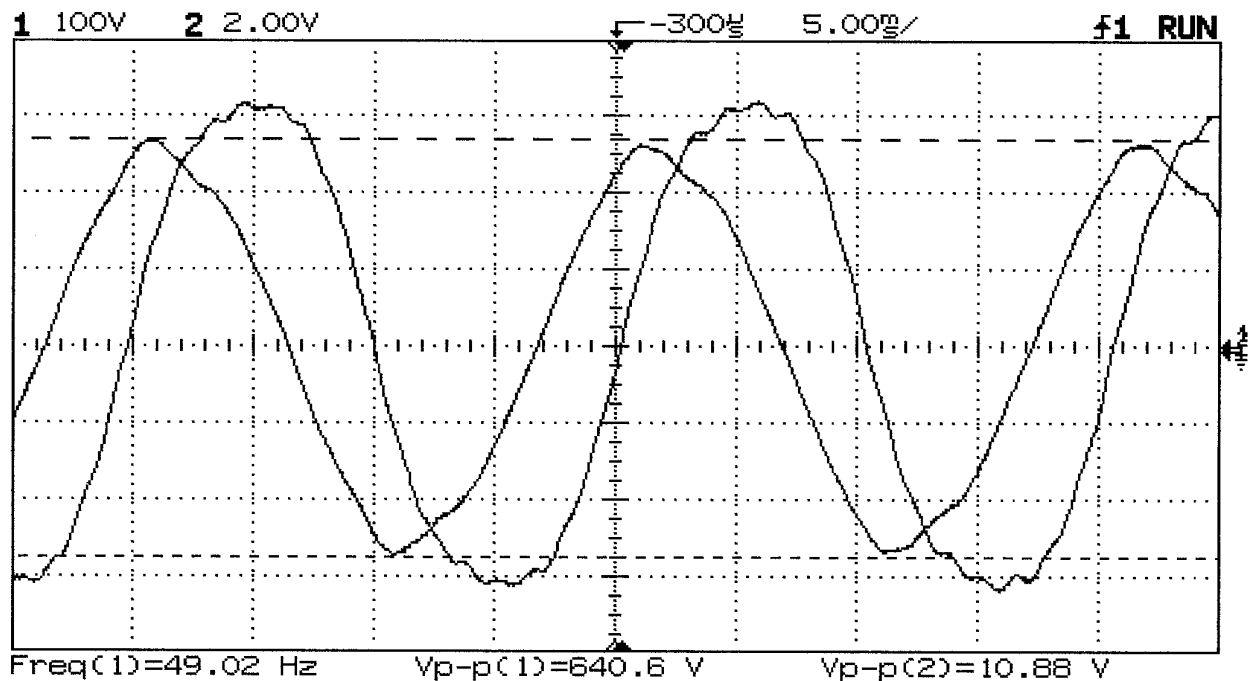
Pour une excitation de 100% C le point de décrochage est repoussé à une puissance maximale de 1410 Watts.

En revanche on observe des valeurs plus importantes de la tension aux bornes des enroulements du stator, il ne faudrait donc pas « sur-exciter » la machine notamment à faible charge.

Dans tous les cas on s'aperçoit que la tension diminue et de ce fait la puissance réactive aussi. Il aurait fallu adapter continuellement l'excitation.

Visualisation de la tension et du courant pour une excitation de 100 % C et 25 % R.
(Voir oscillogramme page suivante)

On lit un déphasage d'environ 30 ° avant (capacitif). Ce résultat est cohérent avec les points relevés dans le tableau à la manipulation 4.5 Avec $P = 1050$ Watts et $Q = - 2340$ vars (en se plaçant du **point de vue du récepteur** constitué de R et C) Ce qui correspond à un déphasage de 24 ° Avant.



4.5 et 4.7 Influence de la vitesse du vent à charge fixe (25% R) avec une excitation constante (100%C).

Sur le graphe de la page suivante est regroupé l'évolution de la tension(en rouge) et de la puissance (en vert) en fonction de la variation de vitesse du rotor.

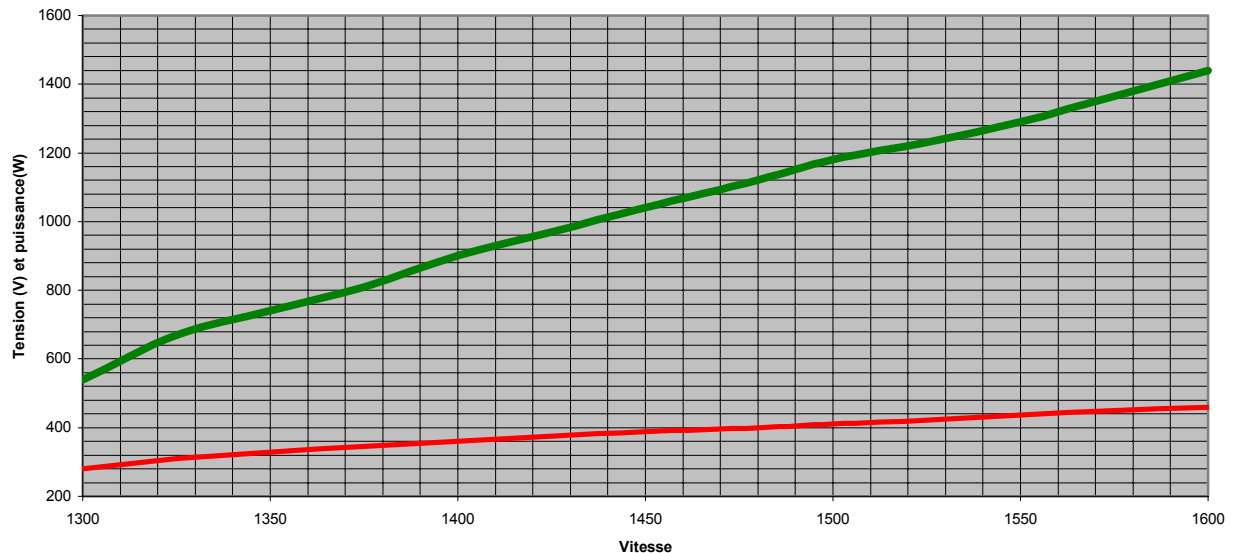
Le décrochage de la génératrice intervient pour une vitesse inférieure à 1300 tr.min⁻¹. La vitesse fait varier la tension délivrée par la génératrice et par la même occasion la puissance fournie au récepteur.

La puissance réactive est proportionnelle à V^2 et dans notre cas peut s'exprimer : $Q = 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot V^2$ on comprend donc l'importance d'une diminution de la tension.

Il faudrait donc limiter l'excursion de la tension en mettant hors tension la charge par exemple +10/-15% de la tension nominale par exemple.

Ce qui correspond alors à une plage de variation de vitesse de 1400 à 1550 tr.min⁻¹. Cela met en évidence la faible plage de variation de la vitesse

Puissance et tension en fonction de la vitesse.



L'ensemble des mesures a montré que la tension générée dépendait de 3 variables.

- l'excitation.
- La vitesse
- La puissance prélevée à la génératrice.

La vitesse est un paramètre indépendant sur l'éolienne car elle est liée au vent. En revanche on pourrait adapter l'excitation en utilisant par exemple des condensateurs montés en gradins.

Synthèse

Grandeurs de réglage de V_s et de P :

En mode couplé au réseau la grandeur de réglage de la puissance est la vitesse de rotation du rotor et donc celle du vent. La tension est par ailleurs fixée par le réseau ainsi que sa fréquence.

En mode isolé sur charge résistive :

En mode isolé les deux grandeurs sont liées, et par conséquent une variation de la vitesse entraîne une variation de V_s et de la puissance.

Une variation d'excitation entraîne une variation de la tension de sortie et par conséquent la puissance.

Si un récepteur absorbe une puissance fixe il faut alors agir sur l'excitation pour contrôler la tension.

On ne peut pas atteindre le point de fonctionnement nominal avec cette génératrice car la tension de départ est trop faible pour alimenter les condensateurs d'excitation et en même temps les récepteurs.

- ⇒ Les risques générés par l'emploi de batterie de condensateur pour compenser les moteurs asynchrones sont : surtensions aux bornes des enroulements lors de la phase d'arrêt si les batteries restent connectées (machine à forte inertie). Surtout, il ne suffit pas de déconnecter le moteur de sa source afin d'être protégé lors des interventions pendant l'arrêt car la machine est auto-excitée par la batterie de condensateur.
- ⇒ On a mis en évidence avec les manipulations 4.6 et 4.7 qu'on ne peut pas utiliser la génératrice sur une grande plage de vitesse, c'est donc un inconvénient.
- ⇒ Les condensateurs en série avec les récepteurs constituent une source d'excitation. En effet :

$Q_c = -\frac{I_c^2}{C \times W}$ donc en compensant ainsi la puissance réactive en fonction du courant dans les récepteurs on peut espérer stabiliser la tension V_s .

4.4 Manipulation avec excitation de 75 % de C et à vitesse constante 1500 tr.min⁻¹.

% Charge P	5	10	15	20	25	30
W1	380	250	135	20	-50	0
W2	-620	-690	-715	-710	-600	0
P	-240	-440	-580	-690	-650	0
Q	1732	1628	1472	1264	952	0
Is	0.5	0.7	1	1.2	1.3	0
Us tension entre phases	406	393	374	350	306	0

4.5 Manipulation avec 100% de C.

% P	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Ucc	216	226	230	233	233	235	235	235	235	231	231
Icc	1.79	3.19	4.4	5.5	6.5	7.4	8.3	8.6	9	8.7	7.7
W1	740	660	510	360	200	100	0	-130	-210	-260	-265
W2	-760	-960	-1080	-1160	-1200	-1250	-1300	-1370	-1200	-1110	-970
P	-20	-300	-570	-800	-1000	-1050	-1300	-1400	-1410	-1370	-1235
Q	2600	2800	2762	2640	2425	2340	2251	2148	1715	1472	1221
Is	0	0.4	0.7	0.9	1.3	1.5	1.8	2	2.2	2.3	2.4
Us	437	450	440	435	420	410	400	380	356	331	300

4.6 Influence d'une diminution de la vitesse :

N	1500	1480	1450	1425	1400	1375	1350	1325	1300
Ucc	225	220	217	213	208	203	200	195	189
Icc	7.9	7.6	7.2	6.8	6.4	5.9	5.5	5	4.24
W1	90	80	70	60	40	30	20	0	0
W2	-1260	-1200	-1110	-1030	-940	-840	-760	-670	-540
P	-1170	-1120	-1040	-970	-900	-810	-740	-670	-540
Q	2340	2217	1983	1890	1700	1500	1350	1160	935
Is	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2
Us	400	400	388	375	360	345	328	310	280

4.7 Influence d'une augmentation de la vitesse :

Augmentation de la vitesse :N	1500	1525	1550	1575	1600
Ucc	228	228	226	230	235
Icc	7.7	8.2	8.7	9	9.5
W1	90	110	130	155	190
W2	-1280	-1340	-1420	-1320	-1630
P	-1190	-1230	-1290	-1365	-1440
Q	2370	2511	2680	2900	3150
Is	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9
Us	411	422	436	450	460