

CONTEXTE INDUSTRIEL

1. *Que contient également la canne à sucre qui n'a pas été précisé ci-dessus ?*

De l'eau

2. *Quel nom donne-t-on au concept réalisé par ce site industriel : production d'électricité et de vapeur en échange d'énergie ?*

Cogénération

CONDUCTEUR DE CANNES

3. *Calculer le travail de la sucrerie A en considérant 26 semaines de campagne.*

$$Pro = 1 \times 10^6 t \text{ en } 26 \text{ semaines} ; \text{ durée} = (26 \times 24 \times 7) - (19 \times 26) - (5 \times 13) = 4368 - 494 - 65 = 3809 \text{ h}$$

$$A = \frac{1 \times 10^6}{3809} = 262,5 \text{ tc / h}$$

4. *Exprimer littéralement le travail de la sucrerie A en fonction des caractéristiques du conducteur de cannes et de la densité de la canne sur le conducteur.*

$$A = \frac{60 \times vc \times l \times h \times d}{1000}$$

5. *La hauteur moyenne de la canne dans le conducteur étant de 1,25 m calculer la vitesse maximale du conducteur si on veut être certain de respecter les objectifs de production quelque soit la densité de la canne.*

$$vc = \frac{A \times 1000}{60 \times l \times h \times d \text{ mini}} ; vc = \frac{262,5 \times 1000}{60 \times 2 \times 1,25 \times 125} = 14 \text{ m/min}$$

6. *Exprimer littéralement la puissance nécessaire pour élever la canne jusqu'à l'entrée du shredder.*

$$Pe = \frac{A \times g \times H}{3600}$$

7. *Sachant que la puissance nécessaire pour vaincre les frottements est égale à celle nécessaire pour élever la canne jusqu'au shredder, calculer la puissance du moteur à installer pour entraîner le conducteur.*

$$Pc = Pf + Pe = Pe \times 2 = \frac{262 \times 9,81 \times 8 \times 2}{3600} = 11,45 \text{ kW.}$$

SHREDDER

$$Pth = 91 \times Mm \times R \times h \times n^3 \times N \times (\psi + 2\delta) \times \theta$$

8. *Déterminer la puissance théorique Pth du moteur pouvant entraîner le shredder avec tous ses marteaux.*

$$Mm = 7,8 \times 10^3 \times 0,55 \times 0,15 \times 0,05 = 32,175 \text{ kg.}$$

$$Pth = 91 \times 32,175 \times 0,5 \times 0,2 \times 0,988^3 \times 160 \times \left(\frac{\pi}{2} + 2\frac{\pi}{2}\right) \times 0,02 = 4258 \text{ kW} \quad \text{Avec } 32 \text{ kg} ; Pth = 4235 \text{ kW}$$

9. *Si la puissance théorique calculée ci-dessus est supérieure à celle du moteur, que proposez-vous comme modification pour réaliser l'adaptation ?*

Réduire le nombre de marteaux, plus exactement ne mettre que la moitié des marteaux, ainsi la puissance théorique se trouve divisée par 2 : 2129 kW

CALCULS DE MOMENTS D'INERTIE

10. *Calculer les moments d'inertie de la surface ab par rapport à x et à y : Js/x et Js/y.*

$$J_{S/x} = \sigma \int_0^b y^2 \times a \times dy = \sigma \times a \left[\frac{y^3}{3} \right]_0^b = \sigma \times a \times \frac{b^3}{3} = \frac{M_S}{3} b^2 \quad \text{et} \quad J_{S/y} = \sigma \int_0^a x^2 \times b \times dx = \sigma \times b \left[\frac{x^3}{3} \right]_0^a = \sigma \times b \times \frac{a^3}{3} = \frac{M_S}{3} a^2$$

11. *Calculer le moment d'inertie de la surface ab par rapport à O : Js/O.*

$$J_{S/O} = \frac{\sigma \times a \times b}{3} (a^2 + b^2) = \frac{M_S}{3} (a^2 + b^2)$$

12. *Calculer le moment d'inertie de la surface "a b" par rapport à G : Js/G.*

$$J_{S/G} = \frac{M_S}{3}(a^2 + b^2) + M_S \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \right)^2 = \frac{M_S}{12}(a^2 + b^2) = \frac{\sigma \times a \times b}{12}(a^2 + b^2)$$

13. Calculer le moment d'inertie de masse du volume "a b e" par rapport à G : J_v/G .

$$J_{v/G} = \int_0^e J_{S/G} \times de = \frac{\sigma \times a \times b}{12}(a^2 + b^2) \times e = \frac{M_v}{12}(a^2 + b^2)$$

DETERMINATION DES MOMENTS D'INERTIE DES PARTIES ENTRAINEES

14. Calculer le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation G d'une plaque carrée J_{pca} , d'une plaque circulaire J_{pcy} et d'un marteau J_{ma} . On considère que les marteaux sont déjà en position finale comme sur le dessin ci-dessus.

$$J_{pca} = \frac{7,8 \times 10^3 \times 0,9^2 \times 0,052}{12} \times 2 \times 0,9^2 = 44,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{pcy} = \frac{7,8 \times 10^3 \times \pi \times 0,61^2 \times 0,03}{2} \times 0,61^2 = 50,89 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{ma/g} = \frac{7,8 \cdot 10^3 \times 0,55 \times 0,15 \times 0,05}{12} \times (0,55^2 + 0,15^2) = 0,87 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{ma/G} = J_{ma/g} + Md^2 = 0,87 + (7,8 \times 10^3 \times 0,55 \times 0,15 \times 0,05 \times 0,7^2) = 16,63 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

15. Calculer le moment d'inertie total des masses en rotation autour de l'axe tous les marteaux en place. On considère qu'avec les pièces simplifiées, le moment de l'axe est compris dans les calculs des plaques

$$J_t = J_{pca} \times 40 + J_{pcy} \times 2 + J_{ma/G} \times 160 = 4536 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Rajouter le moment d'inertie du moteur $J_m = 143 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $J_T = 4536 + 143 = 4680 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Sans les 2 plaques $J_T = 4577 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE LUBRIFICATION SHREDDER

16. A l'aide des documents fournis en annexe compléter :

- ♦ La fiche projet DR1, nombre d'étudiants concernés, présentation....
- ♦ La fiche contrat DR2 en précisant, au niveau des lignes « Sous total », le temps en heures à accorder aux différentes phases. Placer des croix dans les colonnes « étudiants » en face des activités afin de faire ressortir les contrats collectifs et individuels. Noter le nombre de revues de projet et le temps à y consacrer.
- ♦ La fiche planification des tâches DR3 en définissant les zones de début et de fin des tâches. Vous préciserez les dates des revues de projet.
- ♦ Spécifier d'autres documents qui vous semble nécessaires : documents administratifs...

Le document DR1 doit faire apparaître le nombre d'étudiants concernés. Trois semble idéal en fonction des tâches à exécuter : commande, puissance et dialogue, choix de l'A.P.I. de la console, de l'interface de communication. Etre capable de donner le nombre approché d'entrées sorties de l'A.P.I. Le fait d'identifier le système comme un normal secours pour la lubrification est intéressant. L'énoncé des tâches peut-être copié sur le document réponse DR2. Voir correction DR1.

Sur la fiche contrat c'est surtout le travail collectif et individuel qu'il est important de mettre en évidence : La pré étude, le GEMMA, le GRAFCET, l'élaboration des bons de commande, la mise en place des plannings, la mise en service... doivent être de travail collectif. Le travail individuel peut-être partagé ainsi : étudiant A puissance et interface de communication, étudiant B commande et dialogue homme machine, étudiant C API. Les temps passés pour chaque phase doivent être équilibrés pour chaque étudiant. Le temps passé pour chaque phase doit être cohérent, voir correction DR2.

Sur la fiche planification on ne tiendra pas compte de l'horaire exact donné sur la fiche contrat, mais il faut mettre en évidence que l'analyse, les dossiers sont en charge durant toute l'année, que le cahier des charges peut évoluer il faut donc le redéfinir en fonction des essais, que des bons de commande peuvent être édités lors de la mise au point, ... Voir correction DR3.

17. Spécifier d'autres documents qui vous semble nécessaires : documents administratifs, évaluations...

Une convention doit être établie entre l'entreprise et le lycée. Eventuellement des documents de confidentialité, des autorisations de sortie.

Les étudiants doivent être évalués tout le long de la réalisation afin de proposer au jury une note qui pourra servir à vérifier le travail scolaire de l'élève et éviter des jugements ponctuels tenant compte de comportements émotifs pour certains candidats.

18. Exposer les principaux intérêts que présentent les revues de projet.

- Présentation des travaux réalisés à l'échéance fixée.
- Validation des propositions conformes.
- Discussion sur les propositions non adaptées.
- Conseils sur les actions futures.
- Besoins en apprentissages techniques et autres.
- Justificatifs du temps passé (fiches d'activité journalière).
- Ajustement par rapport au planning général.

MOTEUR DU SHREDDER

19. Quelle est l'utilité des éléments de chauffage mis en service à l'arrêt ?

Prévenir la condensation de l'humidité. Le moteur peut être arrêté 6 mois de l'année, les enroulements perdraient leur niveau d'isolement.

20. Calculer les valeurs nominales du couple électromagnétique, du rendement, du glissement et le nombre de paires de pôles du moteur.

$$\Gamma_n = \frac{P_n}{\Omega_n} = \frac{2500 \times 10^3 \times 60}{2\pi \times 988} = 24163 \text{ Nm} ; \quad \eta = \frac{P_n}{UI\sqrt{3} \cos \varphi} = \frac{2500 \times 10^3}{5500 \times 315 \times \sqrt{3} \times 0,87} = 0,957$$

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 988}{1000} = 1,2\% ; \quad p = \frac{f}{n} = \frac{50 \times 60}{988} = 3$$

21. Calculer le couple accélérateur C_a du moteur nécessaire au démarrage.

En supposant que le moteur démarre en 20'', on peut calculer le couple accélérateur :

$$C_a = J \frac{d\Omega}{dt} = 4680 \frac{2\pi \times 988}{60 \times 20} = 24210 \text{ Nm} \quad P_m = \frac{C_a \times \Omega}{2} = 24210 \frac{2\pi \times 988}{60 \times 2} = 1252660 \text{ W}$$

22. Calculer la puissance due aux pertes mécaniques.

La puissance dissipée lors de l'arrêt est due aux pertes mécaniques.

$$P_m = \frac{W}{t} = \frac{J \times \Omega^2}{2 \times t} = 4860 \left(\frac{2\pi \times 988}{60} \right)^2 \times \frac{1}{1200 \times 2} = 20877 \text{ W}$$

23. Calculer la puissance due aux pertes fer.

La puissance consommée à vide est $P_0 = P_{f1} + P_m + P_{js1}$

Les pertes joule stator sont négligeables. $P_f = 3P_0 - P_m = 34,6 \text{ kW}$

24. Calculer la résistance de chaque enroulement stator et rotor à la température de fonctionnement.

Couplage étoile au stator et au rotor. Température de fonctionnement 15 °C.

$$r_s = \frac{1}{2} R_{s25,8} \times \frac{\frac{1}{\alpha} + 15}{\frac{1}{\alpha} + 25,8} = \frac{1}{2} \times 0,113 \times \frac{254,45 + 15}{254,45 + 25,8} = 0,054 \Omega$$

$$r_r = \frac{1}{2} R_{r25,8} \times \frac{\frac{1}{\alpha} + 15}{\frac{1}{\alpha} + 25,8} = \frac{1}{2} \times 0,025 \times \frac{254,45 + 15}{254,45 + 25,8} = 0,012 \Omega$$

25. Préciser ce que représente habituellement chaque élément de ce schéma.

r_s résistance d'un enroulement statorique.

r'_r résistance d'un enroulement rotorique ramenée au stator.

X_μ inductance magnétisante.

R_μ résistance fictive proportionnelle aux pertes dans le fer, généralement négligeables.

l_s ω réactance de fuite au stator.

l'_r ω réactance de fuite au rotor ramenée au stator.

I_μ intensité magnétisante.

g glissement.

I_r intensité au rotor ramenée au stator. I_s intensité dans un enroulement du stator.

26. Montrer que le schéma équivalent peut se simplifier suivant le schéma ci-contre. Calculer les éléments du schéma équivalent.

En fonctionnement normal la chute de tension engendrée par r_s et $X_s = l_s \omega$ est très faible, on peut déplacer la branche magnétisante à l'entrée du schéma.

La chute de tension engendrée par r_s est négligeable dans la branche de l'impédance magnétisante.

$jX = l \omega$ est la somme $l_s \omega + l_r' \omega$.

L'intensité dans R_μ est négligeable devant celle dans X_μ . A vide sans courant dans le rotor on calcule :

$$R_\mu = \frac{U_0^2}{P_0} = \frac{\left(\frac{5490}{\sqrt{3}}\right)^2}{11500} = 870 \Omega ; Z_\mu = \frac{U}{\sqrt{3} \times I_0} = \frac{5490}{\sqrt{3} \times 40} = 79,2 \Omega ; X_\mu = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_\mu^2} - \frac{1}{R_\mu^2}}} \approx Z_\mu = 79 \Omega ; r_s = 0,054 \Omega$$

En court-circuit le courant I_μ est négligeable devant I_{cc} et $g = l$, $P_{cc} = (r_s + r_r') I_{cc}^2$, on en déduit r_r' .

$$r_r' = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} - r_s = \frac{25800}{380^2} - 0,054 = 0,125 \Omega ; \frac{U_{cc}}{\sqrt{3} \times I_{cc}} = \sqrt{(r_s + r_r')^2 + X^2} \text{ d'où } X = 2,35 \Omega$$

27. A partir des éléments du schéma 2, exprimer littéralement la valeur du couple électromagnétique.

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{V}_1}{\left(r_s + \frac{r_r'}{g}\right) + jX} ; P_{em} = C_{em} \times \Omega = C_{em} \times 2\pi \times \frac{f}{p} = 3 \times \frac{r_r'}{g} \times (I_r')^2$$

$$C_{em} = \frac{3V_1^2 \times p}{2\pi \times f} \times \frac{\frac{r_r'}{g}}{\left(r_s + \frac{r_r'}{g}\right)^2 + X^2} = \frac{9V_1^2}{100\pi} \times \frac{\frac{r_r'}{g}}{\left(r_s + \frac{r_r'}{g}\right)^2 + X^2}$$

28. Pour $C_{em} = \frac{V_1^2}{35} \frac{\frac{r_r'}{g}}{\left(r_s + \frac{r_r'}{g}\right)^2 + X^2}$ **Calculer la valeur de g qui rend le moment du couple électromagnétique maximal**

et la valeur du moment correspondant.

$$C_{em} = \frac{9 \times V_1^2}{100\pi} \times \frac{\frac{r_r'}{g}}{\left(r_s + \frac{r_r'}{g}\right)^2 + X^2} = \frac{9 \times V_1^2}{100\pi} \times \frac{r_r'}{\left(g \times r_s + r_r'\right)^2 + gX^2} = \frac{9 \times V_1^2}{100\pi} \times \frac{r_r'}{\left(r_s^2 + X^2\right) \times g + \frac{\left(r_r'\right)^2}{g} + 2 \times r_s \times r_r'}$$

Le produit $\left(r_s^2 + X^2\right)g \times \frac{\left(r_r'\right)^2}{g}$ est constant donc le dénominateur est minimal lorsque $\left(r_s^2 + X^2\right)g = \frac{\left(r_r'\right)^2}{g}$

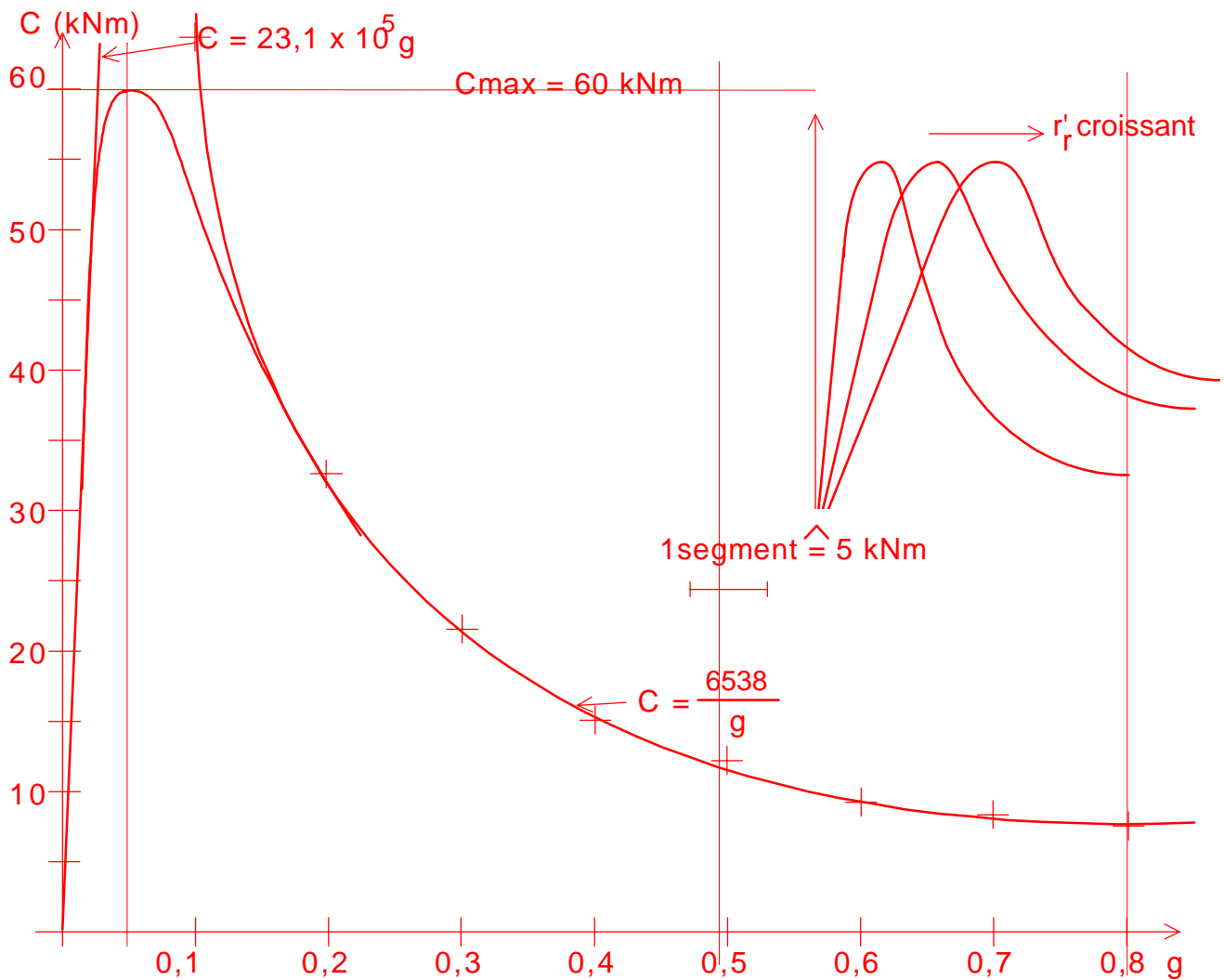
$$C_{\max} = \frac{9 \times V_1^2}{100\pi} \times \frac{1}{2\left[r_s + \sqrt{r_s^2 + X^2}\right]} \approx \frac{9 \times V_1^2}{100\pi} \times \frac{1}{2\left[r_s + X\right]} \text{ pour } g = \frac{r_r'}{\sqrt{r_s^2 + X^2}} \approx \frac{r_r'}{X}$$

Le couple maximum est indépendant de r_r' . $g = 0,0532$ et $C_{\max} = 60 \times 10^3 \text{ Nm}$

29. Comment se comporte la caractéristique $C_{em} = f(g)$ pour les glissements faibles et importants ? Tracer l'allure de la courbe pour g positif, indiquer les points caractéristiques.

Pour les g faibles la caractéristique est une fonction linéaire de g car $\frac{\left(r_r'\right)^2}{g} \gg r_s^2$ et X^2 , $C_{em} = \frac{V_1^2}{35} \times \frac{g}{r_r'}$

Pour les valeurs importantes de g c'est une hyperbole car $X^2 \gg \left(r_s + \frac{r_r'}{g}\right)^2$, $C_{em} = \frac{V_1^2}{35} \times \frac{r_r'}{g \times X^2}$



30. Comment se modifie la courbe si r'_p augmente ?

La valeur du moment maximum reste constante.

EXPLOITATION PEDAGOGIQUE MOTEUR SHREDDER

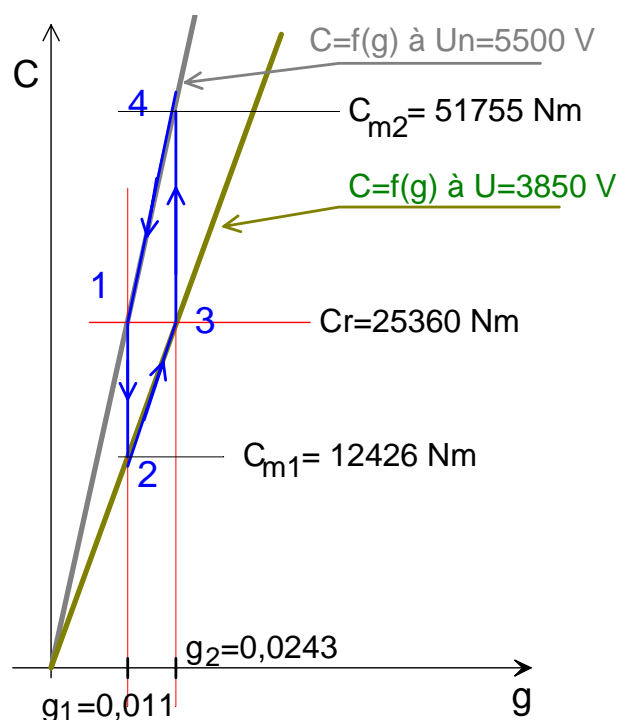
31. Réaliser un document pédagogique sur une feuille A4 pour présenter ce phénomène dans lequel vous devrez tracer et décrire, dans le plan $C=f(g)$, la trajectoire du point de fonctionnement lors de la baisse et du rétablissement de la tension nominale en précisant les coordonnées des points caractéristiques.... Les calculs en particulier du temps mis par l'ensemble moteur charge pour revenir à la vitesse correspondant à la tension nominale devront apparaître sur cette feuille.

De 1 à 2, lorsque la tension chute de 30%, la vitesse n'a pas le temps de varier, le point se retrouve sur la caractéristique à la tension de 3 850 V.

De 2 à 3 le couple moteur augmente jusqu'au point d'intersection avec le couple résistant.

De 3 à 4 lors du rétablissement de la tension nominale, la vitesse n'a pas le temps de varier, le point se retrouve sur la caractéristique à la tension de 5 500 V.

De 4 à 1 le couple moteur diminue jusqu'au point de fonctionnement nominal.



$$C = \frac{V_1^2}{35 \times r_r'} g = \frac{V_1^2}{35 \times 0,125} g = \frac{V_1^2}{4,375} g = K \times V^2 \times g \text{ avec } K = \frac{1}{4,375} ; g \text{ aux points 1 et 2 } g = \frac{C_r}{K \times V_n^2} = \frac{25\,360 \times 4,375}{\left(\frac{5\,500}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,011$$

$$C_{m1} \text{ au point 2 } C_m = \frac{C_r \times V^2}{V_n^2} = \frac{25\,360 \times 3\,850^2}{5\,500^2} = 12\,426 \text{ Nm} ; g \text{ aux points 3 et 4 } g = \frac{C_1}{K \times V^2} = \frac{25\,360 \times 4,375}{\left(\frac{3\,850}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,0243$$

$$C_{m2} \text{ au point 4 } C_{m2} = \frac{C_r \times V_n^2}{V^2} = \frac{25\,360 \times 5\,550^2}{3\,850^2} = 51\,755 \text{ Nm}$$

Calcul du temps mis par le moteur pour atteindre la vitesse correspondante à la tension nominale entre les points 4 et 1 :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r ; \text{ avec } \Omega = (1-g)\Omega_s ; J \times \Omega_s \frac{dg}{dt} + K \times V_n^2 \times g = C_r$$

Equation sans second membre, régime transitoire : $J \times \Omega_s \frac{dg}{dt} + K \times V_n^2 \times g = 0 ;$

$$g = k \times e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ avec } \tau = \frac{J \times \Omega_s}{K \times V_n^2} = 0,21 \text{ s} ; \text{ Solution particulière : } g = \frac{C_r}{K \times V_n^2} = g_1$$

Solution générale : $g = k \times e^{-\frac{t}{\tau}} + g_1$, en prenant l'origine des temps au point 4 : $k = g_2 - g_1$ $g = (g_2 - g_1) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + g_1$

Le temps pour passer de g_2 à g_1 est $t = \tau \times \ln\left(\frac{g_2 - g_1}{g - g_1}\right)$, il est infini en théorie, pour trouver une valeur pratique on prend une valeur de g proche de g_1 exemple 0,0115 (95%), on trouve $t = 0,63 \text{ s}$.

Conclusion : Lors d'une baisse de tension, le couple peut-être réduit de façon importante : $C_1 = C_2 \frac{V_1^2}{V_2^2}$, le glissement

augmente. Lorsque la partie linéaire de la caractéristique à un coefficient directeur élevé les temps de passage en régime permanent sont très courts. Des appels de courant apparaissent qui nécessitent des protections adaptées.

32. Proposer la réalisation d'un essai pour une classe de 1 TS électrotechnique mettant en évidence le phénomène. Vous devrez préciser le temps prévu, les prés requis nécessaires, le montage à réaliser, le matériel et les appareils de mesure à utiliser.

Les équations différentiels et intégrales auront été vues en mathématiques et la dynamique en mécanique et construction.

Prévenir les enseignants concernés par ces matières de votre intervention sur le sujet.

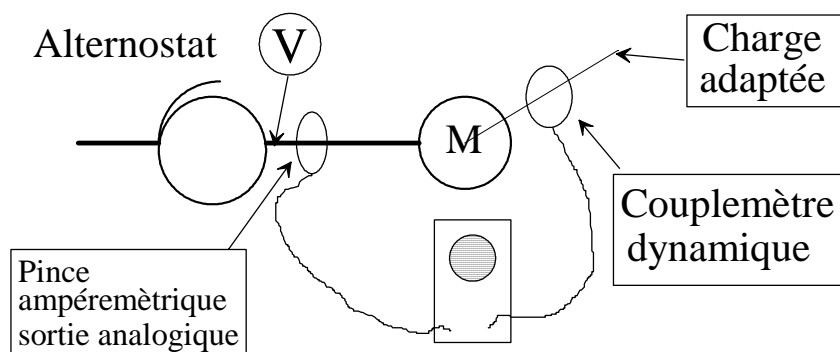
L'essai peut être abordée en parallèle avec un cours sur les moteurs voir même sur les perturbations pour donner un exemple de leurs conséquences sur le fonctionnement des machines.

Trois heures. Réaliser en fin de 2^{ème} semestre de 1 TS électrotechnique.

Prévoir un document réponse à compléter par les étudiants.

L'alternostat peut disposer de 2 cales de réglage permettant le passage rapide vers les deux valeurs de tension.

Peut-être faut-il prendre en compte le temps d'action sur l'appareil de réglage ?



DEMARREUR ELECTROLYTIQUE

33. Calculer la concentration C_A en moles par m^3 de la solution.

Masse d'une mole de Na_2CO_3 : $M_S = (2 \times 23) + (1 \times 12) + (3 \times 16) = 106 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Nombre de moles de la solution : $N_m = \frac{18\,000}{106} = 170 \text{ moles}$

Concentration : $C_A = \frac{170}{3} = 56,6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$

La conductivité de la solution s'obtient par la relation : $\sigma = \lambda N_a^+ \times [N_a^+] + \lambda CO_3^{2-} \times [CO_3^{2-}]$, avec entre crochets la concentration des ions correspondants.

34. Calculer la conductivité de la solution.

$$\sigma = 5,01 \times [56,6 \times 2] + 13,86 \times [56,6] = 1351 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1} ; \sigma = 1,35 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$$

35. Retrouver en le démontrant, l'expression de la résistance radiale d'une couronne.

On considère un anneau élémentaire de résistance dR , entre les rayons r et $r + dr$, sa longueur est dr et sa section

$2\pi \cdot e$. Donc $dR = \rho \frac{dr}{2\pi \times r \times e}$. Tous les anneaux élémentaires sont en série et $R_T = \int_{r_1}^{r_2} \rho \frac{dr}{2\pi \times r \times e} = \rho \frac{1}{2\pi \times e} \ln \frac{r_2}{r_1}$

36. Calculer les résistances du rhéostat de démarrage au début et en fin de démarrage pour une phase si les électrodes ont la forme et les caractéristiques données annexe 10.

Dans les deux cas il y a deux résistances radiales en parallèle. Les diamètres du premier anneau sont (électrode fixe) $r_1 = 460 \text{ mm}$ et (électrode mobile) $r_2 = 540 \text{ mm}$, pour le deuxième anneau (électrode fixe) $r_2 = 450 \text{ mm}$ et (électrode mobile) $r_1 = 370 \text{ mm}$.

$$R_{1\text{début}} = \frac{1}{1,35 \times 2\pi \times 10 \times 10^{-3}} \ln \frac{540}{460} = 1,88 \Omega ; R_{2\text{début}} = \frac{1}{1,35 \times 2\pi \times 10 \times 10^{-3}} \ln \frac{450}{360} = 2,3 \Omega$$
$$R_{\text{début}} = R_h = \frac{1}{\frac{1}{1,88} + \frac{1}{2,3}} = 1,038 \Omega$$
$$R_{1\text{fin}} = 1,88 \frac{10}{300} = 0,063 \Omega ; R_{2\text{fin}} = 2,3 \frac{10}{300} = 0,076 \Omega ; R_{\text{fin}} = 1,038 \frac{10}{300} = 0,0346 \Omega$$

37. Calculer l'intensité et le couple au démarrage du moteur avec le rhéostat.

$Z = \sqrt{(r_s + r_r' + R_h)^2 + X^2} ; I_d = \frac{V_1}{Z} = 1\,200 \text{ A}$ On ne peut plus considérer que $X^2 \gg \left(r_s + \frac{r_r' + R_h}{g}\right)^2$, on prend la

relation complète $C_{em} = \frac{9 \times V_1^2}{100\pi} \times \frac{\frac{r_r' + R_h}{g}}{\left(r_s + \frac{r_r' + R_h}{g}\right)^2 + X^2} ; \text{ et } C_d = 48 \text{ kNm}$

38. Justifier la présence de la couche d'huile en surface de l'électrolyte.

Anti-évaporation, permet de maintenir la concentration constante.

39. Lors de la première mise en service du démarreur si vous constatez que le couple de démarrage est insuffisant, comment comptez-vous agir pour régler ce problème sachant que la position de départ des électrodes ne peut être inchangée ?

Le carbonate de sodium ajouté à l'eau à pour effet de diminuer la résistivité du mélange. Pour obtenir un démarrage plus important il faut augmenter la résistance donc réduire le pourcentage de carbonate de sodium. Il faut donc vider une partie de la cuve et refaire le niveau avec de l'eau potable, la concentration va diminuer la résistivité va diminuer, le couple de démarrage sera plus élevé.

EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE DEMARREUR

40. Rédiger un exercice de type avant-projet pour une classe de 1 TS électrotechnique dans le cadre des cours de technologie et schéma, voire à utiliser dans d'autres matières. Vous préciserez les prés requis nécessaires, les capacités et savoirs visés, les contenus d'enseignements associés, les documents fournis, et la durée prévue. Cet exercice pourra comprendre : Les recherches des fonctions, des références de l'appareillage installé : choix des contacteurs..., des questions permettant la compréhension du fonctionnement du système : A quelles conditions les agitateurs se mettent-ils en marche ?..., chronogramme, GRAFCET... Chaque question posée devra avoir son corrigé ou la méthode précise permettant d'obtenir le résultat.

Pré requis : Cours sur la technologique et les choix des matériels, sur le GRAFCET et les outils de description d'automatisme. Sur le démarrage des moteurs asynchrone.

Documents fournis : Présentation sommaire de l'usine et du shredder. Document AOIP. Dossier technique de réalisation avec les schémas. Catalogue Télémécanique ou autres, l'accès à Internet permet de voir d'autres réalisations de démarreur.

Multidisciplinarité : Le sujet peut être utilisé par le prof d'anglais comme support d'exercice. Le professeur de mécanique peut également traiter des questions sur le déplacement des électrodes entraînées par un système vis-écrou...

Capacités et savoirs :

C1.2 : Justifier les éléments techniques relatifs à l'équipement de pilotage d'un automatisme. S2.

C7 : Concevoir le diagramme fonctionnel et la structure algorithmique d'un automatisme Fournir les algorithmes, diagrammes. S5.

C9 : Décoder les notices techniques et les documents constructeurs (éventuellement rédigés en langue anglaise), les documents du dossier technique. S2.

Durée : 4 heures

Justification du choix du matériel :

Rôle du relais PS1. Réponse : surveiller le bon sens de rotation des phases afin que le déplacement des électrodes soit correct.

Rôle du relais LL. Réponse : contrôle par l'intermédiaire de capteurs le niveau de l'électrolyte dans la cuve.

Rôle des relais TH1 et TH2. Réponse : contrôlent par l'intermédiaire des capteurs la température de l'électrolyte. TM1 s'ouvre si $\theta > 50^{\circ}\text{C}$ et TM2 s'ouvre si $\theta > 70^{\circ}\text{C}$.

Rôle de VCR. Réponse : les contacts de ce relais sont à utiliser dans le circuit de commande du stator du moteur pour l'informer de l'état de fonctionnement du démarreur et d'éventuels défauts.

Rôle des relais OR1 à OR3. Réponse : surveillent les états des relais de protections thermique OL1 à OL3 des moteurs agitateurs et montée/descente des électrodes.

Rôle des contacteurs, CC, M et D. Réponse : P1 et P2 contacteurs de mise en marche des agitateurs, CC contacteur de court-circuitage du rotor du moteur asynchrone, M et D contacteurs de montée et descente des électrodes.

Préciser la nature des temporisations intégrées aux relais T1 et CHT. Réponse : T1 temporisation à l'action, CHT temporisation au relâchement.

Pourquoi avoir doublé les fins de course qui contrôlent la position des électrodes ? Réponse : On réalise ainsi une redondance active homogène afin de pallier au dysfonctionnement de l'un en espérant que l'autre fonctionne.

Justifier le choix des matériels :

A l'aide des catalogues et documentations fournis rechercher les références des contacteurs et relais de protection des circuits de puissance.

Compréhension du fonctionnement :

A l'arrêt, en fonctionnement normal, le disjoncteur CB1 est fermé, les électrodes sont en position haute, la température de l'électrolyte est $< 50^{\circ}\text{C}$, aucun relais de protection thermique n'est déclenché, le niveau de l'électrolyte est correct.

Dans ces conditions quels sont les relais sous tension. Réponse : RP = 1, CHT = 1, CTA = 1, RD = 1, VCR = 1.

Localiser les bornes du contact donnant l'ordre de démarrage. Réponse : Le contact STATOR STARTER colonne 12.

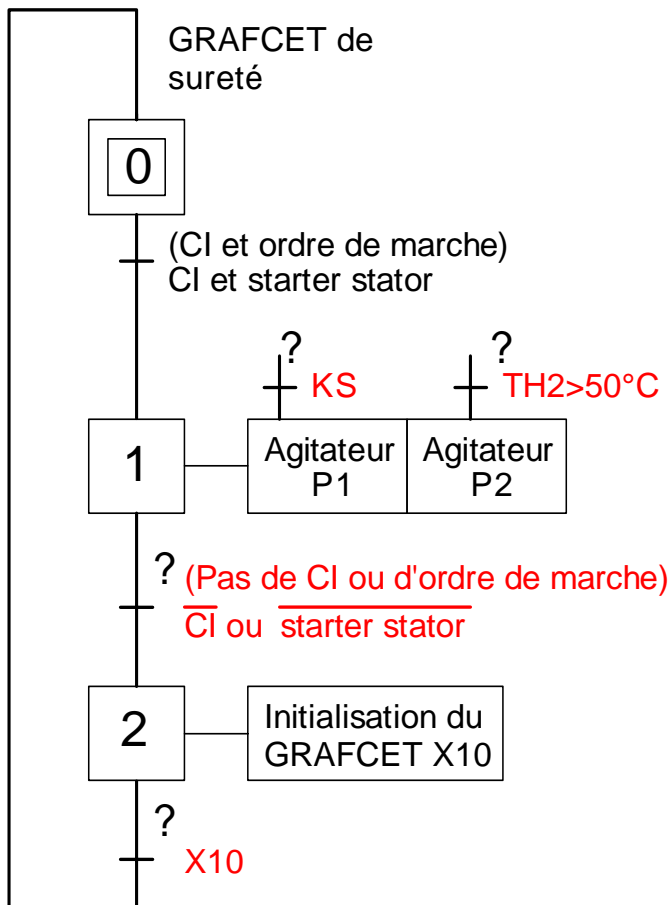
Compléter le chronogramme de l'état des relais et contacteurs sur le document réponse fourni pour un démarrage normal sans apparition de défaut.

Quel est le rôle de la temporisation CHT ? Réponse : Cette temporisation contrôle le temps total du démarrage, si celui-ci est supérieur à une limite, le démarrage est stoppé.

Préciser les conditions de mise en marche des agitateurs. Réponse : Les deux agitateurs ne se mettent en marche que lors d'un démarrage, pour P1 si l'interrupteur à clé KS est fermé, on peut ainsi forcer un agitateur en permanence. L'agitateur P2 ne fonctionne que si la température de l'électrolyte est $> 50^{\circ}\text{C}$.

Pourquoi parle-t-on de protection à action positive concernant RD, TH1, TH2, LL, OR1.... Réponse : Dans le cas d'une anomalie sur le relais ou un fil coupé dans le circuit le concernant, cela sera pris comme un défaut, la sécurité de fonctionnement sera assurée.

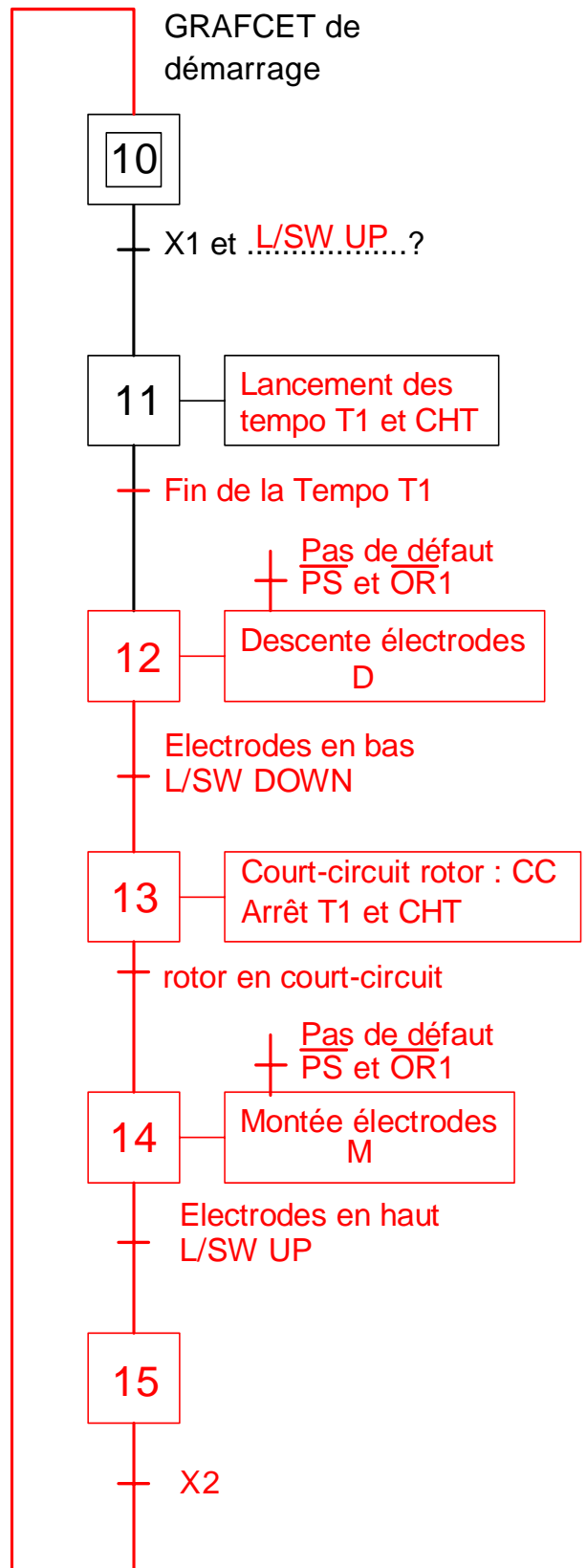
Compléter le GRAFCET point de vue système du démarreur.

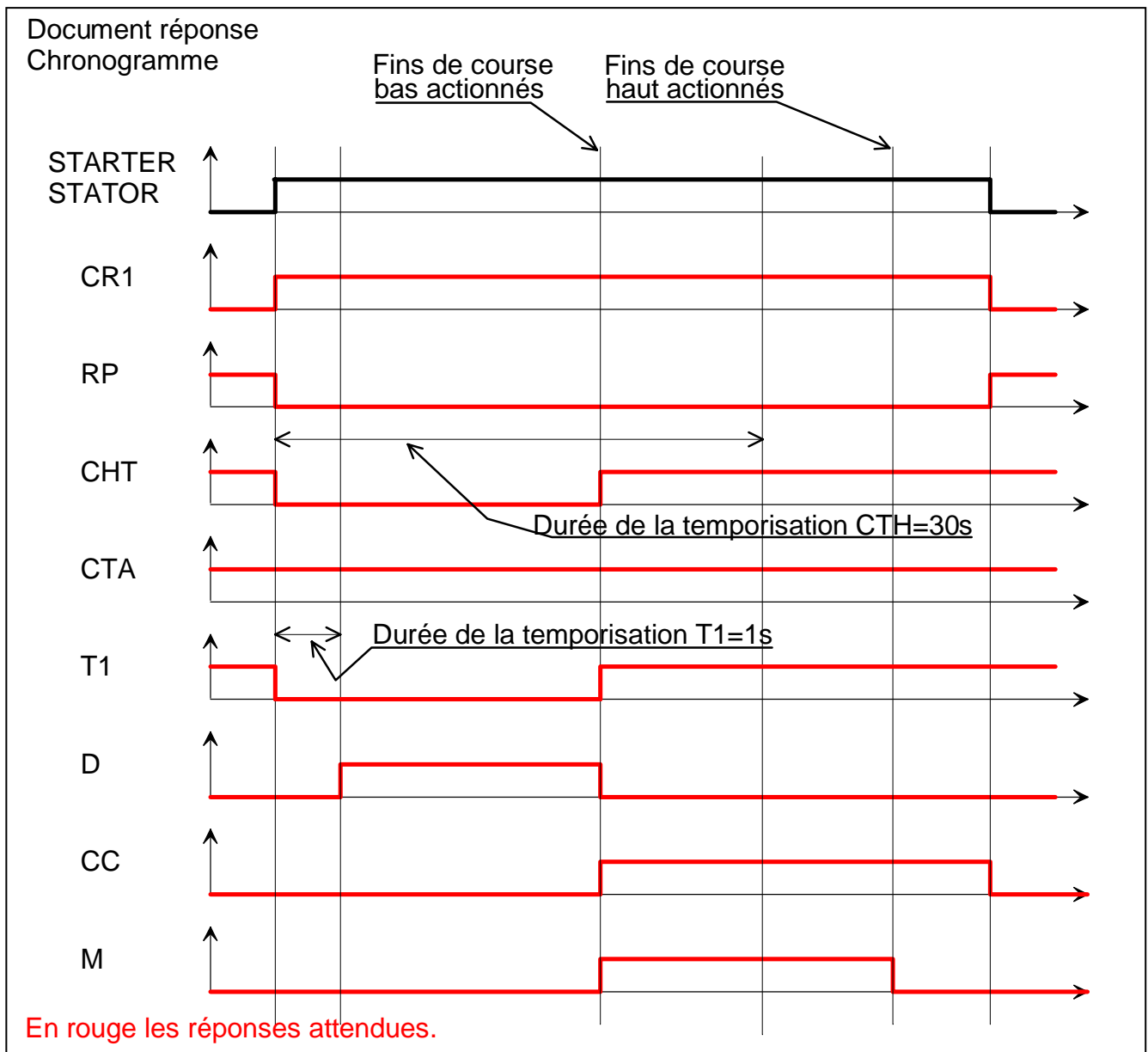


CI : conditions initiales
à préciser :
TH1 < 70°C et pas de
défaut thermique $\overline{OR1}$ à $\overline{OR3}$

Si dépassement du temps de recouvrement
CHT ou niveau d'électrolyte trop bas, l'ordre
de marche disparaît.

En rouge les corrections





BOBINAGE DU MOTEUR DE SHREDDER

41. Pourquoi les nombres d'encoches au stator et au rotor doivent-ils être différents ?

Si le nombre d'encoches au stator et au rotor sont identiques, les états successifs de réluctance maximale (lorsque les dents sont en regard) et minimale vont créer des pulsations périodiques du flux qui produiront des **bruits et vibrations**. Ces pulsations peuvent être à l'origine dans le courant absorbé d'**harmoniques de denture** créant des couples antagonistes.

Dans la position à réluctance minimale le flux du stator ne coupe pas de façon optimale les conducteurs du rotor, il tend à passer par les dents, il y a risque de **création de points morts** qui réduisent le couple au démarrage.

42. Quelle solution est adoptée, surtout sur les moteurs à rotor en court-circuit pour réduire les problèmes ci-dessus ? Donner une équivalence dans le domaine mécanique ?

Les inconvénients décrits ci-dessus peuvent être réduits en inclinant les encoches du rotor par rapport à celles du stator d'un demi pas à deux pas dentaire d'une face frontale à l'autre.

Cette solution est comparable en mécanique à la substitution d'un engrenage droit par un engrenage hélicoïdal.

43. Calculer la valeur du pas polaire.

$$\tau = \frac{2\pi}{2p} = \frac{\pi}{p} = \frac{\pi}{3}$$

44. Exprimer littéralement la valeur du nombre total d'encoches au stator et au rotor.

Au stator $N_{es} = 2pm_s q$, au rotor $N_{er} = 2pm_r q$

45. Exprimer littéralement et calculer les valeurs des pas dentaires au stator et au rotor.

$$\tau_{ds} = \frac{2\pi}{2 \times p \times m_s \times q} = \frac{2\pi}{72} = \frac{\pi}{36} ; \tau_{dr} = \frac{2\pi}{2 \times p \times m_r \times q} = \frac{2\pi}{54} = \frac{\pi}{27}$$

46. Calculer les nombres d'encoches par pôle et par phase au stator et au rotor.

$$m_s = \frac{72}{2 \times p \times q} = 4 ; m_r = \frac{54}{2 \times p \times q} = 3$$

47. Indiquer sur le document DR4 : le pas polaire, l'espace couvert par les différentes phases et les sens des courants par des flèches sur les traits et par des points ou des croix dans les cercles correspondants représentant les conducteurs dans les encoches au stator et au rotor.

Voir DR4. La phase 1 est décalée de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport à la phase 2 etc...

Réaliser sur le document DR5 les schémas développés des bobinages stator et rotor. Pour représenter le schéma complet, les conducteurs d'une même phase sous un même pôle et à un même niveau d'encoche ont été représentés par un seul trait, continu pour le haut des encoches, pointillé au fond des encoches. Vous distinguerez les phases par des couleurs ou des signes différents. Voir DR5.

EXPLOITATION PEDAGOGIQUE BOBINAGE

48. Dessinez autour des conducteurs des lignes d'induction orientées et rappelez le théorème d'Ampère qui s'y applique.

Voir DR6.
$$\varepsilon = n \times i = \int H \times dl = \int H_f \times dl + \int H_e \times dl \approx \int H_e \times dl = \int \frac{B}{\mu_0} dl = 2 \frac{B \times e}{\mu_0}$$

49. Rappelez les principales hypothèses justifiant le tracé fourni de l'allure de la force magnétomotrice $\varepsilon = f(\theta)$ le long de l'entrefer créée par un courant i d'une phase.

Voir DR6. La bobine crée "ni" ampères-tours au total.

50. Tracer l'allure de la fmm dans le cas de plusieurs encoches.

Voir DR6.

51. Précisez les amplitudes et les angles électriques.

Voir DR6.

52. Etablir l'expression du développement en série de Fourier de la force magnétomotrice $\varepsilon(\theta)$ en choisissant l'origine des abscisses au droit de la première encoche.

La fonction $\varepsilon(\theta)$ est impaire, valeur moyenne nulle, seuls les termes en sinus existent.

$$\varepsilon(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \times \sin k\theta \quad \text{avec} \quad b_k = \frac{4}{2 \times \pi} \int_0^{\pi} \frac{n \times i}{2} \times \sin k\theta \times d\theta = \frac{n \times i}{k \times \pi} [\cos k\pi - 1] = \frac{n \times i}{k \times \pi} [(-1)^k - 1]$$

Et suivant la parité de k ,

$$b_{2d} = 0 ; b_{2d+1} = -\frac{2 \times n \times i}{(2d+1)\pi} \quad \varepsilon(\theta) = -\sum_{d=0}^{\infty} \frac{2 \times n \times i}{(2d+1)\pi} \times \sin(2d+1)\theta = -\frac{2 \times n \times i}{\pi} \left[\sin \theta + \frac{1}{3} \sin 3\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \dots + \frac{1}{d} \sin d\theta \right]$$

53. Généraliser le résultat du développement ci-dessus pour p paires de pôles.

$$\varepsilon(\theta) = -\sum_{d=0}^{\infty} \frac{2 \times n \times i}{(2d+1)\pi} \times \sin p(2d+1)\theta = -\frac{2 \times n \times i}{\pi} \left[\sin p\theta + \frac{1}{3} \sin 3p\theta + \frac{1}{5} \sin 5p\theta + \dots + \frac{1}{d} \sin dp\theta \right]$$

54. A partir de l'expression de $\varepsilon(\theta) = A[\sin p\theta + \frac{1}{3} \sin 3p\theta + \frac{1}{5} \sin 5p\theta + \dots]$, établir l'expression du développement en série de Fourier de la force magnétomotrice $\varepsilon_m(\theta)$.

La fmm $\varepsilon_m(\theta)$ engendrée par une phase résulte de la superposition de m_s fmm $\varepsilon(\theta)$ d'amplitudes $\frac{ni}{2m_s}$ décalées angulairement de τ_{ds} .

$$\varepsilon_m(\theta) = -\frac{2 \times n \times i}{m_s \times \pi} \left\{ \sin p\theta + \sin p(\theta - \tau_{ds}) + \dots + \sin p[\theta - (m_s - 1)\tau_{ds}] \right. \\ \left. \frac{1}{3} [\sin 3p\theta + \sin 3p(\theta - \tau_{ds}) + \dots + \sin 3p[\theta - (m_s - 1)\tau_{ds}]] \right. \\ \left. \frac{1}{5} [\sin 5p\theta + \sin 5p(\theta - \tau_{ds}) + \dots + \sin 5p[\theta - (m_s - 1)\tau_{ds}]] + \dots \right\}; \text{ avec } A = -\frac{2 \times n \times i}{\pi}$$

55. **Ecrire l'expression du développement en série de Fourier de la composante fondamentale de la force magnétomotrice $\varepsilon_m(\theta)$ sous la forme :** $\varepsilon_{m0}(\theta) = A' \sum_{k=1}^{m_s} \sin p[\theta - (k-1)\tau_{ds}]$, où la valeur de A' sera précisée.

La composante fondamentale de la fmm $\varepsilon_m(\theta)$ engendrée par une phase résulte de la superposition de m_s composantes fondamentales de la fmm $\varepsilon(\theta)$ d'amplitudes $\frac{ni}{2m_s}$ décalées angulairement de τ_{ds} .

$$\varepsilon_{m0}(\theta) = -\frac{2 \times n \times i}{m_s \times \pi} \left\{ \sin p\theta + \sin p(\theta - \tau_{ds}) + \dots + \sin p[\theta - (m_s - 1)\tau_{ds}] \right\} \text{ et } \varepsilon_{m0}(\theta) = -\frac{2 \times n \times i}{m_s \times \pi} \sum_{k=1}^{m_s} \sin p[\theta - (k-1)\tau_{ds}]; A' = -\frac{2 \times n \times i}{m_s \times \pi}$$

56. **Sachant que..... donner l'expression du développement en série de Fourier de la composante fondamentale de la force magnétomotrice $\varepsilon_m(\theta)$ sous la forme :..... La valeur de K_0 sera exprimée en fonction de m_s .**

$$a = p \times \theta \text{ et } b = p \times \tau_{ds} \text{ on obtient } \varepsilon_{m0}(\theta) = \left(-\frac{2 \times n \times i}{\pi} \right) \times \frac{\sin m_s \frac{p \times \tau_{ds}}{2}}{m_s \times \sin \frac{p \times \tau_{ds}}{2}} \sin p[\theta - (m_s - 1) \frac{\tau_{ds}}{2}] \text{ Sachant que } \tau_{ds} = \frac{\pi}{p \times m_s \times 3} \text{ on}$$

obtient $K_0 = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{m_s \sin \frac{\pi}{6m_s}}$ pour un moteur triphasé.

57. **L'abscisse du centre géométrique de la phase vaut $\theta_c = \frac{\tau}{2} + \frac{m-1}{2} \tau_{ds}$. Ecrire la relation précédente en fonction**

$$\text{d'un cosinus. } \varepsilon_{m0}(\theta) = A \times K_0 \times \sin p\left[\left(\theta + \theta_c\right) - (m_s - 1) \frac{\tau_{ds}}{2}\right] = A \times K_0 \times \sin p\left[\left(\theta + \frac{\tau}{2}\right)\right] = A \times K_0 \times \cos p\theta$$

58. **A partir de K_0 déduire le coefficient K_{2d+1} associé à l'harmonique de rang $2d+1$ en fonction de m_s et de d et l'expression générale de la force magnétomotrice $\varepsilon_m(\theta)$ rapportée au centre de la phase.**

$$K_{2d+1} = \frac{\sin(2d+1) \frac{\pi}{6}}{m_s \sin(2d+1) \frac{\pi}{6m_s}} \text{ et } \varepsilon_m(\theta) = -\frac{2 \times n \times i}{\pi} \left[K_0 \cos p\theta + \sum_{d=1}^{\infty} \frac{(-1)^d}{2d+1} \times K_{2d+1} \times \cos p(2d+1)\theta \right]$$

59. **Que représentent les coefficients K_0 et K_{2d+1} ?**

K_0 représente le facteur de distribution (de bobinage) associé à la composante fondamentale de la fmm.

K_{2d+1} représente le facteur de distribution (de bobinage) associé à l'harmonique de rang $2d+1$ de la fmm.

Ils correspondent au rapport entre ce que donne le bobinage réel avec m_s encoches et ce que l'on obtiendrait si tous les conducteurs d'une phase pour une paire de pôles étaient dans deux encoches.

60. **Conclure sur les conséquences de la multiplication du nombre d'encoches par pôle et par phase.**

La valeur efficace de la fmm est très peu inférieure à celle obtenue avec deux encoches.

La forme de la fmm est plus proche de la sinusoïde donc réduction importante de l'amplitude des harmoniques (voir tableau ci-dessous).

61. **Définir votre stratégie pédagogique : le temps prévu, les pré requis nécessaires, méthode d'explication de l'obtention du tracé de la fmm $\varepsilon_m(\theta)$...**

Prévoir d'intégrer ce document lors de l'étude des machines tournantes et des harmoniques.

L'étude théorique des machines tournantes aura été abordée en physique, les développements en série de Fourier abordés en mathématiques.

Une heure devrait suffire en fin de 1 semestre de 2 TS électrotechnique en cours de technologie.

Prévoir de répondre à des questions concernant les développements en série des fmm.

Pour expliquer le tracé de la fmm $\varepsilon_m(\theta)$ il faut dessiner dans un premier temps les fmm élémentaires créées par chaque bobine (identiques à la fmm $\varepsilon(\theta)$ mais amplitudes $\pm \frac{n \times i}{2 \times m}$) puis faire leur somme.

Un diaporama avec apparition progressive du texte du document réponse 6 ou des transparents superposables, ou compléter l'image projetée sur le tableau blanc sont des techniques pédagogiques adaptées. Prévoir un tableau contenant les valeurs des coefficients de distribution pour quelques valeurs de m_s afin de montrer les effets ci-dessus.

m_s	1	2	3	4
$d = 0$, fondamental	1	0,966	0,96	0,958
$d = 1$, harmonique 3	1	0,707	0,666	0,653
$d = 2$, harmonique 5	1	0,259	0,217	0,205

CENTRIFUGEUSE

MÉCANIQUE GIRATOIRE

63. Exprimer le vecteur vitesse du point A, $\vec{V}_i(A)$ après avoir exprimé $\vec{O}_iA = f(\rho, z, \vec{x}_i, \vec{z}_i)$.

$$\vec{O}_iA = \rho \times \vec{x}_i + z \times \vec{z}_i \quad \vec{V}_iA = \frac{d\vec{O}_iA}{dt} = \frac{d\rho}{dt} \vec{x}_i + \rho \frac{d\vec{x}_i}{dt} + \frac{dz}{dt} \vec{z}_i$$

$$\vec{O}_iA = \begin{bmatrix} \rho \\ z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vec{x}_i \\ \vec{z}_i \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{V}_iA = \begin{bmatrix} \rho' \\ \rho \cdot \Omega \\ z' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vec{x}_i \\ \vec{y}_i \\ \vec{z}_i \end{bmatrix}$$

64. Réécrivez les coefficients de la matrice accélération ci-dessous dans le cas où le mouvement du point A s'effectue dans le plan $(O_i, \vec{x}_i, \vec{y}_i)$:

Pas de mouvement sur z

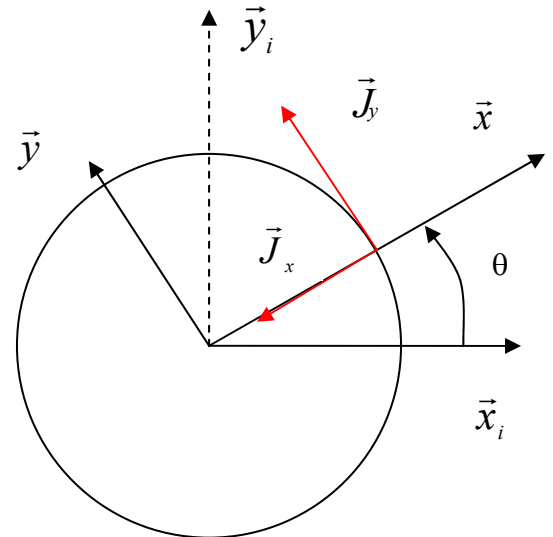
$$\vec{j} = \begin{bmatrix} \rho'' - \rho \cdot \Omega^2 \\ \rho \cdot \Omega' + 2\rho' \cdot \Omega \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vec{x}_i \\ \vec{y}_i \end{bmatrix}$$

65. Exprimer les coefficients de la nouvelle matrice d'accélération dans ce cas particulier.

ρ est une constante

$$\vec{j} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot \Omega^2 \\ \rho \cdot \Omega' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vec{x}_i \\ \vec{y}_i \end{bmatrix}$$

66. Représenter dans le plan $(O_i, \vec{x}_i, \vec{y}_i)$ le vecteur \vec{j} ainsi que ses composantes sur \vec{x}_i et \vec{y}_i . Comment appelle-t-on communément ses composantes ? Qu'implique une vitesse angulaire constante ? En déduire la force centrifuge appliquée à un élément de sucre de masse dm .



J_x accélération centripète. J_y accélération tangentielle. Une vitesse Ω constante implique $J_y = 0$.

Donc $\vec{F} = -dm \times \vec{J}_x = -dm \times \rho \times \Omega^2$

67. Exprimer le rapport noté G de la force centrifuge au poids de cet élément puis conclure sur l'intérêt de la grande vitesse dans une turbine centrifuge.

$$G = \frac{\rho \times dm \times \Omega^2}{dm \times g} = \frac{\rho \times \Omega^2}{g}$$

La séparation des cristaux sera d'autant plus efficace que la vitesse est grande.

MODÉLISATION DE LA CENTRIFUGEUSE

68. Pour le panier cylindrique ci-dessus exprimer littéralement la force centrifuge élémentaire df qui s'applique sur la hauteur H d'épaisseur dx de masse cuite, puis la force centrifuge totale.

$$df = \rho_{mc} \times 2\pi \times x \times dx \times H \times x \times \Omega^2 \quad \text{et} \quad F = \int_r^R df = \rho_{mc} \times 2\pi \times H \times \Omega^2 \frac{(R^3 - r^3)}{3}$$

69. Exprimer la masse totale de sucre en déduire l'expression de R_m en fonction des rayons de la masse cuite.

$$M = \rho_{mc} \times \pi \times H \times (R^2 - r^2) \quad \dots \quad F = M \times R_m \times \Omega^2 \quad \dots \quad R_m = \frac{2}{3} \times \frac{(R^3 - r^3)}{(R^2 - r^2)}$$

70. Déterminer la vitesse de rotation maximale du moteur correspondant à la pression admissible.

$$P = \frac{F}{S} = \frac{M \times R_m \times \Omega^2}{2\pi \times R_m \times H} \quad \dots \quad \Omega = \sqrt{\frac{2 \times P}{\rho_{mc} (R^2 - r^2)}} \quad \dots \quad \Omega = 122 \text{ rd/s}$$

71. Exprimer puis calculer le couple que devra développer le moteur pour amener le panier de la vitesse 200 tr.min⁻¹ à la vitesse de 1200 tr.min⁻¹ en 60 secondes.

$$C_r = D^4 \times H \times g \times n \times (1 + 4n) = 243 \text{ Nm} \quad \text{où } n \text{ est exprimé en milliers de tours par minute...}$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r \quad \dots \quad C_m = I_t \frac{d\Omega}{dt} + C_r = 850 \frac{1200 - 200}{60} \times \frac{\pi}{30} + 243 = 1727 \text{ Nm}$$

72. En déduire la puissance moyenne nécessaire à l'accélération de l'ensemble en 60 secondes. Justifier alors la puissance installée du moteur de 215 kW et de vitesse nominale de 1200 tr.min⁻¹.

$$P_m(t) = C_m \times \Omega(t) = J \times \Omega(t) \frac{d\Omega}{dt} + C_r \times \Omega(t) \quad \dots \quad W = \int_0^{t_f} P_m \times dt = I_t \int_{\Omega_i}^{\Omega_f} \Omega \times d\Omega + C_r \int_0^{t_f} \Omega(t) \times dt$$

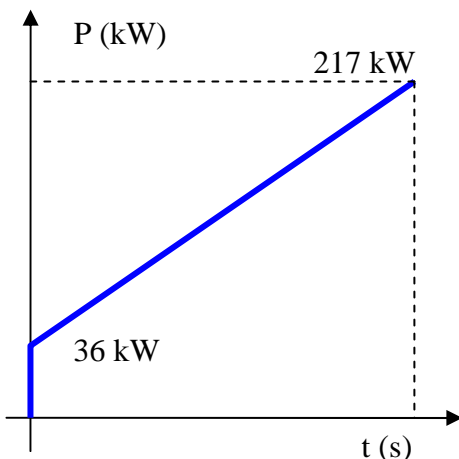
$$\text{avec } \Omega(t) = \frac{104,7}{60} t + 20,9 \quad \dots \quad W = \frac{I_t}{2} (\Omega_f^2 - \Omega_i^2) + \frac{104,7}{60} t_f^2 + 20,9 \times t_f = 7592500 \text{ J}$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{7592500}{60} = 126540 \text{ W}$$

$$\text{ou } P = 1727 \times \frac{\Omega_f - \Omega_i}{2} = 126 \text{ kW}$$

La puissance max 217 kW et la moyenne 126 kW justifie la valeur de 215 kW du moteur.

Le couple est de $\frac{215000 \times 60}{2\pi \times 1200} = 1710 \text{ Nm}$ correspondant au couple demandé pour l'accélération. Le moteur convient.



EXPLOITATION PEDAGOGIQUE CENTRIFUGEUSE

73. Compléter le document réponse DR7 comme s'il s'agissait d'un document pédagogique destiné à une classe de baccalauréat STI. Tracer sur la partie vierge l'évolution du couple en fonction du temps. Traduire les énergies en matière de choix de variateur. Rapprochez ce choix à des installations existantes. Préciser les pré requis... Conclure.

A destination d'une classe de terminale STI Génie électrotechnique. Cours classe entière durant le 2^{ème} trimestre. On peut utiliser comme support le système transgerbeur, à défaut l'axe Z. Voir DR7.

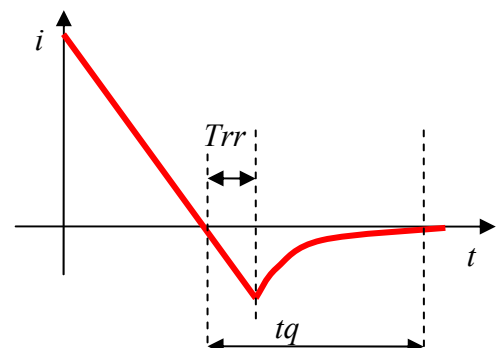
Le cycle de vitesse étant fourni, profil trapézoïdal, le but est de mettre en évidence la réversibilité de la chaîne de conversion d'énergie, réversibilité au niveau de la machine à courant continu.

Pré requis : Notion d'inertie et principe fondamental de la dynamique. A voir avec le collègue qui enseigne la mécanique afin de placer cette activité.

On peut envisager de donner aux élèves des relevés afin qu'ils tracent dans un premier temps le profil de vitesse. Il peut être intéressant de relever par l'intermédiaire de $i(t)$ le couple moteur et leur faire remarquer la différence qui existe entre les deux (coefficient K de couple). On peut aussi leur fournir la puissance $P(t)$.

ETUDE DU CONVERTISSEUR D'ÉNERGIE

74. Rappeler les conditions d'amorçage et de désamorçage d'un thyristor. Donner la définition du courant de maintien et du courant d'accrochage. Quels sont les principaux critères de choix d'un thyristor ? Qu'appelle-t-on temps de récupération t_q d'un thyristor ?



Conditions d'amorçage : $V_{ak} > 0$ et impulsions de gâchette suffisantes énergiquement.

Courant de maintien : en décroissance de i , valeur de l'intensité du courant pour lequel le thyristor se bloque.

Courant d'accrochage : en croissance de i , valeur de l'intensité du courant à partir de laquelle le thyristor reste amorcé. Si la durée de l'impulsion de gâchette ne permet pas au courant d'atteindre cette valeur, compte tenu des conditions d'utilisation, le thyristor ne s'amorce pas. D'où l'habitude d'injecter des trains d'impulsions.

Principaux critères de choix : I efficace, I moyen, V_{RRMS} tension inverse max répétitive.

Temps de récupération tq : Temps entre l'instant où $i = 0$ et l'instant où l'application d'une tension $V_{AK} > 0$ provoque un amorçage intempestif sans impulsion de gâchette. Trr étant le temps de recouvrement inverse dû à la charge stockée dans la jonction.

75. Représenter sur chaque document réponse DR8 et DR9, pour des angles $\alpha = 30^\circ$ et $\alpha = 150^\circ$, les allures de :

- La tension $V_{AN}(t)$ délivrée par le commutateur à cathode commune,
- la tension $V_{BN}(t)$ délivrée par le commutateur à anode commune,
- la tension $u_c(t)$ qui s'en déduit,
- la tension présente aux bornes du thyristor Th_1 ,
- l'intensité qui circule dans le thyristor Th_1 ,
- le courant véhiculé par la phase 1 noté $i_1(t)$.

Voir DR8 et DR9.

$$\frac{\pi}{6} + \alpha \text{ le thyristor TH1 conduit jusqu'à } \frac{5\pi}{6} + \alpha$$

Règle de commutation : Sur le commutateur à cathode commune, le thyristor dont l'anode est au potentiel le plus > 0 peut conduire.

$$V_{TH1} = v_1(t) - v_{AN}(t) \quad \dots \quad i_1(t) = i_{TH1} - i_{TH2}$$

Lorsque TH1 conduit $V_{TH1} = 0$.

Si TH3 conduit $V_{TH1} = u_{12}$.

Si TH5 conduit $V_{TH1} = u_{13}$.

76. Pour un angle $\alpha = 150^\circ$ quel est le type de fonctionnement du pont. Quelles sont les conséquences d'un angle d'amorçage $\alpha = 180^\circ$ et $\alpha = 0^\circ$ dans le cas de thyristors imparfaits.

Le pont fonctionne en onduleur $P < 0$.

Conséquences de $\alpha = 180^\circ$ ou 0° , l'amorçage se fait au zéro de tension (risque de non amorçage). Au désamorçage du thyristor la tension devient tout de suite positive d'où risque de réamorçage intempestif dû au tq du thyristor et cela sans impulsion de gâchette. Le thyristor reste donc conducteur perte de contrôle du pont.

Il faut fixer un angle de garde $\alpha_{max} = \Psi - \gamma$, avec γ angle de garde.

77. Après avoir exprimé les valeurs moyennes de $V_{AN}(t)$ et $V_{BN}(t)$ notées respectivement $\langle V_{AN} \rangle$, $\langle V_{BN} \rangle$ en déduire $\langle U_c \rangle$. Préciser la fonction de linéarisation de $\langle U_c \rangle$ lorsque le pont est assujéti à une tension de consigne V_c variant entre -10 et $+10$ Volts continu.

$$\langle V_{AN} \rangle = \frac{1}{2\pi/3} \times \int_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+5\pi/6} v_1(\theta) \times d\theta = \frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{2\pi} \times \cos \alpha$$

$$\langle V_{BN} \rangle = -\frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{2\pi} \times \cos \alpha \quad \langle U_c \rangle = \langle V_{AN} \rangle - \langle V_{BN} \rangle = \frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{\pi} \times \cos \alpha$$

On veut $\langle U_c \rangle = K \cdot V_c$, la fonction de linéarisation sera :

$$\alpha = \text{Arc cos} \left(\frac{K \times \pi \times V_c}{3 \times V \times \sqrt{6}} \right) = \text{Arc cos} \left(\frac{V_c}{10} \right)$$

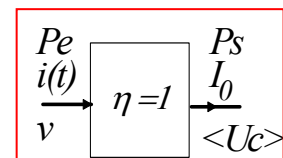
On considère que l'ensemble du pont n'est le siège d'aucune perte.

78. Exprimer le courant fondamental $i_{1f}(t)$.

$$Pe = Ps = \langle U_c \rangle \times I_0 = \frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{\pi} \times I_0 \cdot \cos \alpha = 3 \times V \times I_{1f} \times \cos \Psi$$

$\alpha = \psi$ déphasage entre le courant fondamental et la tension simple du réseau

$$\text{d'où } I_{1f} = \frac{I_0 \times \sqrt{6}}{\pi} \text{ valeur efficace du fondamental. } i_{1f}(t) = \frac{I_0 \times \sqrt{6}}{\pi} \times \sqrt{2} \times \sin(\omega t - \alpha)$$



79. Exprimer le facteur de puissance F_p , la puissance réactive Q , le facteur de déplacement noté $\cos \varphi$, le taux de distorsion harmonique et la puissance déformante D . Exprimer plus particulièrement le rapport de D à P puissance active puis conclure.

$$I_{eff}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{5\pi}{6}} I_0^2 \cdot d\theta \dots I_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_0 \text{ et } F_p = \left(3 \cdot V \cdot \frac{I_0 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot \cos \alpha \right) \cdot \frac{1}{3 \cdot V \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_0} = \frac{3}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

$$Q = 3 \times V \times \frac{I_0 \times \sqrt{6}}{\pi} \cdot \sin \alpha \text{ ; Facteur de déplacement } \cos \psi = \cos \alpha$$

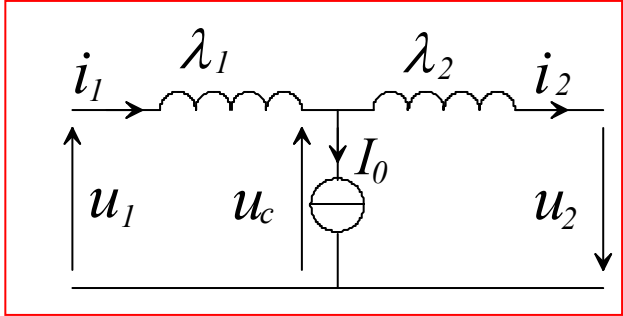
$$THD_F = \sqrt{\frac{I_{eff}^2 - I_{1f}^2}{I_{1f}^2}} = \sqrt{\frac{\pi^2 - 9}{9}} = 31\% \text{ et } THD_{RMS} = \sqrt{\frac{I_{eff}^2 - I_{1f}^2}{I_{eff}^2}} = \sqrt{\frac{\pi^2 - 9}{\pi}} = 29,7\%$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{(3 \times V)^2 \times [I_{eff}^2 - I_{1f}^2]} = 3 \times V \times \sqrt{I_{eff}^2 - I_{1f}^2} = 3 \times V \times \sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} I_n^2}$$

ASSOCIATION DES 2 PONTS THYRISTORS

80. Quelle relation lie α_1 et α_2 lorsque les 2 ponts sont commandés simultanément ?

$$\langle u_1 \rangle = - \langle u_2 \rangle \text{ ; } u = \frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{\pi} \cos \alpha \text{ ; } \cos \alpha_1 = - \cos \alpha_2 \text{ d'où } \alpha_2 = \pi - \alpha_1$$



81. Exprimer l'équation différentielle qui lie $u_1(t)$, $i_1(t)$ et $u_c(t)$. Faire de même avec $u_c(t)$, $i_2(t)$ et $u_2(t)$.

$$u_1 - \lambda_1 \omega \frac{di_1(\theta)}{d\theta} = u_c(\theta) \quad (1)$$

$$u_2 - \lambda_2 \omega \frac{di_2(\theta)}{d\theta} = -u_c(\theta) \quad (2)$$

82. En déduire $u_c(t)$ en fonction de $u_1(t)$ et $u_2(t)$.

$$2 \cdot u_c = u_1 - u_2 - \lambda \omega \times \left(\frac{di_1}{d\theta} - \frac{di_2}{d\theta} \right), \text{ mais } i_1 = i_2 + I_0, \text{ donc } \frac{di_1}{d\theta} = \frac{di_2}{d\theta}, \text{ et } u_c(t) = \frac{(u_1(t) - u_2(t))}{2}$$

83. Dans l'intervalle angulaire $[(\pi/6 + \alpha) ; (\pi/2 + \alpha)]$, exprimer le courant instantané i_2 . On ne cherchera pas à exprimer la constante d'intégration. Quelles sont les conséquences de la circulation de ce courant ?

$$(1) + (2) \Rightarrow (u_1 + u_2) = 2 \times \lambda \omega \frac{di_2}{d\theta}$$

Sur l'intervalle $\left[\alpha + \frac{\pi}{6} ; \alpha + \frac{\pi}{2} \right]$ on a $u_1 = u_{12}$ et $u_2 = u_{31}$ donc $\frac{di_2}{d\theta} = \frac{u_{12} + u_{31}}{2 \times \lambda \omega} = \frac{u_{32}}{2 \times \lambda \omega}$

$$i_2 = \frac{V \times \sqrt{6}}{2 \times \lambda \omega} \sin \theta + A \text{ avec } u_{32} = V \times \sqrt{6} \times \cos \theta$$

84. Proposer une stratégie pour éviter les inconvénients de la commande à circulation de courant.

Ce courant de circulation provoque des pertes supplémentaires.
Nouvelle stratégie : logique d'inversion, seul un pont fonctionne à la fois, l'autre est bloqué.

ETUDE DU MOTEUR À COURANT CONTINU

85. Citer les avantages et inconvénients du moteur à courant continu par rapport au moteur asynchrone pour notre application.

Moteur à courant continu plus souple d'utilisation, variateur de vitesse plus simple. Grande plage de vitesse à couple important. Maintenance délicate à cause de l'usure des balais et du collecteur.
Moteur asynchrone ; difficile d'obtenir les cycles de vitesses pour une centrifugeuse.

86. Qu'est-ce que la réaction magnétique d'induit ? Quelles conséquences cela entraîne sur le fonctionnement de la machine ? Quelles solutions sont mises en œuvre couramment pour la limiter ?

Le courant dans l'induit provoque une réduction du flux utile par pôle, c'est la réaction d'induit.
 Conséquences : La force électromotrice est réduite ; le rendement diminue, augmentation de la difficulté de commuter ; des flashes destructeurs apparaissent entre balais et collecteur, l'inductance du circuit de l'induit provoque une augmentation de la constante de temps L/R ; réaction plus lente de la machine aux variations.
 Pour la réduire on emploie des enroulements de compensation parcourus par le courant d'induit et placés dans des encoches des pièces polaires de la machine.

87. Expliquer le rôle des pôles de commutation.

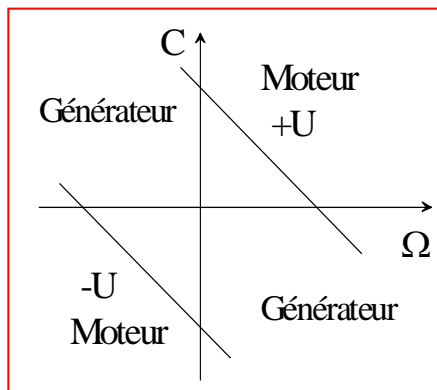
La commutation des sections s'accompagne d'un arc électrique dû à la f.e.m. née dans la section qui s'oppose à la disparition du courant.

Les pôles de commutation ont pour rôle d'annuler cette f.e.m. dans les sections en commutation. Ces enroulements sont parcourus par le courant d'induit.

88. Exprimer le couple électromagnétique développé par le moteur en fonction de la vitesse et d'autres paramètres à préciser.

$$C_e = k \times \Phi \times I = \frac{E \times I}{\Omega} = \frac{(U - RI) \times I}{\Omega} = \frac{k \times \Phi \times U}{R} - \frac{(k \times \Phi)^2}{R} \Omega$$

89. machine à courant continu. Indiquer le comportement de la machine dans les quatre quadrants du repère C-Ω.



90. Déterminer l'angle de démarrage noté α_d qu'il faut appliquer au pont lors du démarrage. Préciser la loi d'évolution de α en fonction du temps. Indiquer le temps t₁ mis pour atteindre la commande nominale.

$$\frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{\pi} \cos \alpha = R \times I_d = 43,85 \times 10^{-3} \times 1,2 \times 582 \text{ et } \alpha_d = 86,7^\circ$$

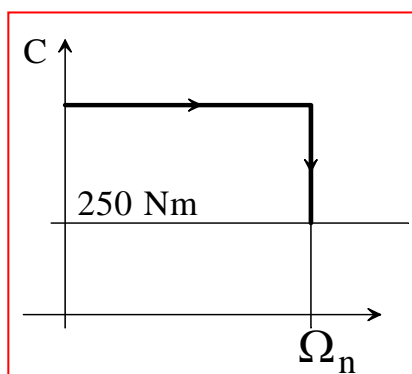
$$J \frac{d\Omega}{dt} = 1,2 \times C - 250 \Rightarrow \Omega = \frac{(1,2 \times C - 250)}{J} \times t \text{ et } t_1 = \frac{J \times \Omega_n}{(1,2 \times C - 250)} = 60s$$

$$U - E = R \times I_d = \frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{\pi} \cos \alpha - k \times \Omega = \frac{3 \times V \times \sqrt{6}}{\pi} \cos \alpha - k \frac{(1,2 \times C - 250)}{J} \times t$$

$$\cos \alpha = \frac{\pi}{3 \times V \times \sqrt{6}} \left[R \times I_d + k \frac{(1,2 \times C - 250)}{J} \times t \right]$$

$$\alpha = \text{Arc cos}(57 + 12 \times t) \times 10^{-3}$$

91. A partir de l'instant t = t₁ avec quel angle doit-on commander le pont ? Représenter alors l'allure instantanée de α et la trajectoire du point de fonctionnement dans le plan C-Ω.



$$\alpha = \text{Arccos}(57 + 12 \times t) \times 10^{-3} \Rightarrow \alpha_1 = 39^\circ$$

A partir de t₁ il faut commander le pont avec un angle α tel que

$$C_m = 250 Nm \text{ et } I = 84 A$$

$$\text{soit } U = 378 V \text{ et } \alpha = 45,3^\circ$$