

SESSION DE 2001

CAPET

CONCOURS EXTERNE

**Section : GENIE ELECTRIQUE**  
Option : Electrotechnique et Energie.

**SCIENCES ET TECHNIQUES INDUSTRIELLES**

Durée : 6 heures

*Calculatrices autorisées conformément à la circulaire n° 99 – 186 du 16 novembre 1999.*

Aucun document n'est autorisé.

Composition du sujet :

Le texte du sujet : 18 pages  
Les annexes : 4 pages  
Les documents réponses : 4 pages

Conseils aux candidats :

Ce sujet se compose de quatre parties indépendantes, à l'intérieur desquelles de nombreuses questions sont elles mêmes indépendantes. Une lecture attentive de l'ensemble s'avère nécessaire avant de composer.

Les candidats sont donc priés de rédiger sur des feuilles séparées chacune de ses parties. Il est demandé de répondre aux questions dans l'ordre du sujet, d'utiliser les notations du texte ou des figures, de présenter clairement les calculs, de dégager et d'encadrer les résultats relatifs à chaque question.

Les documents réponses doivent être impérativement utilisés et tous doivent être rendus avec la copie (même ceux non complétés).

## ELEMENTS INDICATIFS

*Toutes les parties du sujet sont indépendantes.*

**Partie 1** : Hydrodynamique : détermination de la puissance de propulsion :

*1 heure*

**Partie 2** : Moteur synchrone triphasé :

*2 heures*

**Partie 3** : Alimentation du moteur synchrone :

*2 heures*

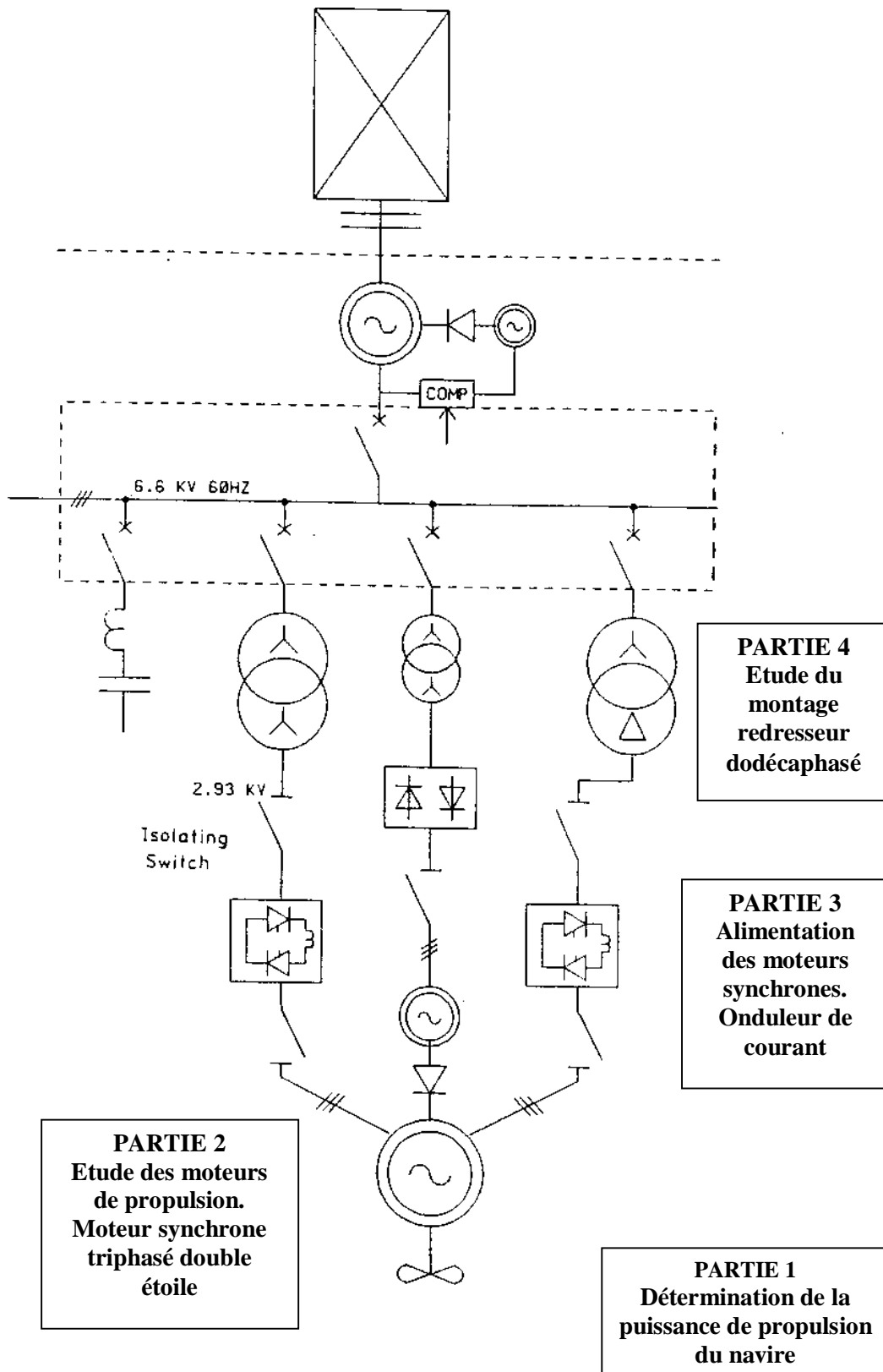
**Partie 4** : Harmoniques :

*1 heure*

*Notations à utiliser pour les grandeurs physiques*

<i>Valeur instantanée.....</i>	<i>x ou x(t)</i>
<i>Valeur efficace.....</i>	$\frac{X}{\sqrt{2}}$
<i>Valeur moyenne.....</i>	$\bar{X}$
<i>Valeur complexe.....</i>	$\underline{X}$
<i>Valeur de Fresnel.....</i>	$\overline{X}$
<i>Valeur instantanée de l'harmonique de rang n de la grandeur x(t)</i>	<i>x<sub>n</sub> ou x<sub>n</sub>(t)</i>

# PLAN DE L'ETUDE



# PRESENTATION

## Le navire tout électrique

Depuis un dizaine d'années, la propulsion électrique pour les navires de croisières a été adoptée par un nombre croissant d'armateurs.

L'intérêt du navire tout électrique est de globaliser tous les besoins en énergie et, avec les mêmes générateurs, de fournir l'électricité nécessaire aussi bien à la propulsion qu'au réseau de bord.

Ce sujet traite principalement de la motorisation du « Star Princess », paquebot de 600 cabines équipé d'une propulsion électrique de grande puissance, livré par les chantiers de l'Atlantique (filiale du groupe ALSTOM).



L'équipement électrique du « Star Princess » comprend deux ensembles : Production d'énergie et Propulsion (annexe 1).

- La centrale d'énergie comprend 4 alternateurs entraînés par des moteurs diesel. Elle alimente tous les distributeurs du bord et notamment l'équipement de propulsion.

Les caractéristiques des alternateurs sont données en annexe 3.

- L'équipement de propulsion comprend 2 moteurs synchrones de 12 MW (un moteur par hélice), contrôlés en permanence par des convertisseurs de fréquence à thyristors (de type synchro convertisseurs) permettant de faire varier la vitesse des hélices de 0 à 100 % dans les deux sens de rotation.

Contrairement aux moteurs diesel, les moteurs électriques alimentés par les convertisseurs statiques de fréquences sont capables de fournir leur couple maximum en permanence, même aux très basses vitesses et dans les deux sens de rotation.

Ils s'accommodent donc d'hélices à pales fixes dont l'aptitude au freinage du navire est excellente lorsque leur vitesse est contrôlée par un moteur électrique.

Le couple fourni par le moteur électrique permet de lancer l'hélice en arrière quelle que soit la vitesse du navire.

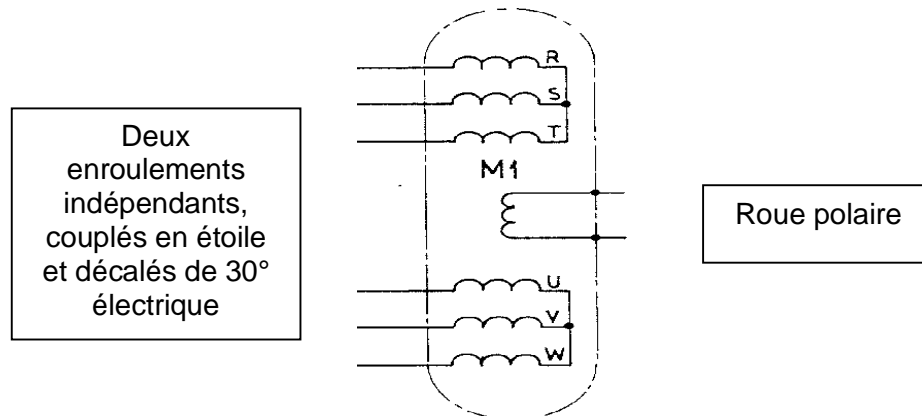
Les caractéristiques des moteurs synchrones de propulsion sont données ci après.

## Caractéristiques de la machine synchrone.

C'est une machine triphasée à pôles saillants, le bobinage du stator est constitué de deux enroulements indépendants couplés en étoile et décalés de 30° électrique, mais complètement découplés galvaniquement (ce qui a pour avantage de tolérer des réactances subtransitoires plus fortes, de réduire les couples pulsatoires, de limiter les harmoniques de courant et d'améliorer le facteur de puissance).

Ces deux étoiles sont alimentées chacune par un onduleur de courant, dont les commutations sont décalées les unes des autres de 30° électrique.

De plus en cas de secours, une marche par « demi moteur » est possible.



Hypothèse : sauf indication particulière, on néglige la résistance des enroulements statoriques.

### Caractéristiques nominales :

Puissance maximale pour le moteur complet  $S = 13\,876$  kVA.

Nombre de phase : 3

Couplage étoile.

Cosinus  $\varphi$  : 0,89

Tension composée d'alimentation : 2 x 3 kV

Nombre de paires de pôles :  $p = 12$ .

Fréquence des grandeurs statoriques :  $f = 29$  Hz.

Classe d'isolation : F

### Résistances :

Résistance d'un enroulement statorique à 75°C :  $R_s = 0,0068 \Omega$ .

Résistance de la roue polaire à 75°C :  $R_r = 0,2578 \Omega$

### Réactances à la fréquence constante de 29 Hz :

Réactance synchrone longitudinale  $x_\lambda = 183 \%$

Réactance synchrone transversale  $x_t = 115 \%$

Réactance transitoire longitudinale  $x'_\lambda = 39 \%$

Réactance subtransitoire longitudinale  $x''_\lambda = 18,7 \%$

Réactance subtransitoire transversale  $x''_t = 18,7 \%$

Le schéma complet de l'équipement de propulsion est donné en annexe 2.

## PARTIE 1

Une méthode statistique présentée ci dessous permettra de déterminer la puissance de propulsion exigée à l'étape initiale de conception d'un navire.

L'ensemble des forces de résistance à l'avancement  $F$  se décompose en :

$$F = R_f \times (1 + k_1) + R_{app} \times (1 + k_2) + R_w + R_b + R_{tr} + R_a$$

- $R_f$  : résistance due au frottement de l'eau.
- $1 + k_1$  : coefficient dépendant de la forme de la coque.
- $R_{app}$  : résistance additionnelle provenant des appendices (gouvernail, aileron stabilisateur...)
- $1 + k_2$  : coefficient dépendant des appendices.
- $R_w$  : résistance de vagues. Elle résulte de l'énergie dépensée dans la formation de deux systèmes de vagues accompagnant le navire dans son déplacement.
- $R_b$  : résistance additionnelle due à la présence d'un bulbe d'étrave près de la surface de l'eau. (les bulbes d'étrave sont favorables à la réduction de  $R_w$ ).
- $R_a$  : résistance décrivant l'effet de rugosité de la coque et de la résistance de l'air.
- $R_{tr}$  : résistance de remous que l'on pourra négliger car la carène est bien profilée.

### Données du navire :

Longueur prise au niveau de la ligne de flottaison  $L = 246$  m

Largeur  $l = 32$  m

Jauge (UMS) : 63 500 tonneaux

Vitesse  $V = 23$  nœuds (1 nœud = 0,514 m/s)

$1+k_1 = 1,05$

$1+k_2 = 1,45$

Masse volumique de l'eau de mer :  $\rho = 1025 \text{ kg} / \text{m}^3$

Viscosité cinématique de l'eau de mer  $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$

Diamètre de l'hélice  $D = 5,4$  m

Surface mouillée de la coque  $S = 8\,200 \text{ m}^2$

Surface mouillée des appendices  $S_{app} = 50 \text{ m}^2$

Rendement propulsif (comprend le rendement de l'hélice, coque...)  $\eta_p = 0,72$

Rendement mécanique  $\eta_m = 0,99$

(0,5 % de pertes dans chacune des deux portées de l'arbre porte hélice)

Des essais réalisés en bassin de carènes ont permis d'évaluer  $R_w = 480 \text{ kN}$   
 En outre  $R_b = 0,060 \text{ kN}$  et  $R_{tr} = 0$

Les résistances à l'avancement  $R_f, R_{app}, R_a$  sont dues aux variations de pression et de vitesse dans la couche limite (poids de la couche d'eau que la coque entraîne) ; c'est une fonction de la vitesse  $V$ , de la surface mouillée, de la forme de la carène, de la rugosité de la coque et du nombre de Reynolds  $\Re$  :

$$\text{soit } R_f = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \times C_f$$

$$R_{app} = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S_{app} \times C_f$$

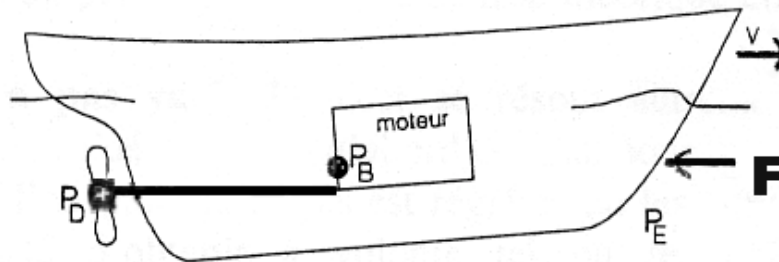
$$R_a = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times S \times C_a$$

avec  $C_f = \frac{0,455}{(\log_{10} \Re)^{2,58}}$  coefficient de friction du bateau selon la formule ITTC

et  $C_a = 0,00035$  coefficient de corrélation du bateau

Nombre de Reynolds  $\Re = \frac{V \times L}{\nu}$  avec  $\nu$  = viscosité cinématique de l'eau de mer

### 1.1 Détermination de la puissance propulsive.



1. Calculer la résistance totale à l'avancement  $F$ .
2. Calculer la puissance effective dite de remorquage  $PE$ .
3. Calculer la puissance propulsive que la machine doit développer en sortie de l'arbre de l'hélice  $PD$ .
4. Calculer la puissance utile du moteur de propulsion  $PB$ .

## PARTIE 2

### 2.1 Limite en vitesse.

L'alimentation de la machine est une source de courant, c'est à dire qu'elle impose la valeur efficace du courant statorique. La fréquence d'alimentation est variable entre 0 et 29 Hz.

5. Donner la relation entre la vitesse de rotation  $n$  (en tr/min) et la fréquence  $f$  des grandeurs statoriques. Préciser entre quelles limites varie la vitesse  $n$  lorsque la fréquence varie entre 0 et 29 Hz.

### 2.2 Courant nominal.

6. Calculer le courant nominal  $I_{sn}$  pour un « demi moteur ».

### 2.3 Dimensionnement électromagnétique du moteur.

Les fuites magnétiques seront négligées, la force électromotrice par phase peut s'écrire :

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \times Kb \times Nc \times f \times \phi \quad \text{avec le flux} \quad \phi = \frac{L \times D \times B}{p}$$

Avec

- $Kb$  : coefficient de bobinage .
- $Nc$  : nombre de conducteurs par encoche.
- $\phi$  : flux sous un pôle.
- $p$  : nombre de paire de pôles.
- $f$  : fréquence nominale.
- $L$  : longueur du fer stator.
- $D$  : diamètre d'alésage du stator.
- $B$  : induction maximale.
- $Ac$  : charge linéique au niveau de l'alésage du stator (A / m)  $Ac = \frac{3 \times Nc \times Is}{\pi \times D}$ .

7. Donner l'expression de la puissance électromagnétique  $S$  de la machine en fonction des paramètres  $Kb$ ,  $D$ ,  $L$ ,  $B$ ,  $f$ ,  $p$ ,  $Ac$ .

8. Calculer la longueur  $L$  et le diamètre  $D$  du rotor.

Application numérique :

$S = 13,8$  MVA –  $Ac = 73\,900$  A/m –  $B = 0,92$  T –  $f = 29$  HZ –  $Kb = 0,96$  –  $p = 12$  –  $Nc = 192$

### 2.4 Rapport de court-circuit kcc

La caractéristique à vide  $E_v = f(J)$ , relative à une phase, relevée à vitesse nominale passe sensiblement par l'origine.

$E_v$ (V)	720	1 080	1 440	1 800	2 000	2 150	2 270
$J$ (A)	100	150	200	300	400	500	600

A la vitesse synchrone, le stator en court-circuit est parcouru par le courant nominal pour un courant inducteur de 370 A

9. Tracer la courbe  $E_v = f(J)$  et calculer le rapport de court circuit kcc qui représente le rapport de l'intensité du courant d'excitation qui permet d'avoir la tension nominale à vide à l'intensité du courant qui permet d'avoir le courant nominal en court-circuit.

10. Préciser quelle est l'importance de ce rapport au niveau du comportement électromagnétique interne des machines synchrones.

## 2.5 Impédances caractéristiques.

D'une façon générale, les impédances caractéristiques d'une machine donnée sont exprimées par des nombres sans dimensions appelés « valeurs réduites »

11. Donner la relation générale entre  $X$  (Ohm) et  $x$  (valeur réduite).

12. Calculer les réactances synchrones longitudinale  $X\lambda$  et transversale  $Xt$ .

Pour la suite du problème, on prendra  $X\lambda = 2,3 \Omega$  et  $Xt = 1,4 \Omega$

## 2.6 Schéma équivalent, diagramme à deux réactances synchrones.

On utilise le diagramme à deux réactances (machine à pôles saillants, on néglige la saturation en supposant les f.e.m proportionnelles aux courants d'excitation équivalents).

Dans cette partie on néglige par ailleurs la résistance statorique  $R_s$ .

La réaction d'induit est la somme

- de la réaction transversale due à  $I \cos \psi$  de valeur efficace  $E_t$ .
- de la réaction longitudinale due à  $I \sin \psi$  de valeur efficace  $E\lambda$ .

13. Représenter avec ces hypothèses le schéma équivalent d'une phase de la machine qui traduit l'équation  $v = et + e\lambda + e$

On notera :

- $V_s$  la tension simple.
- $E$  la force électromotrice par phase.
- $I_s$  le courant dans une phase d'un « demi moteur ».
- $X\lambda$  réactance synchrone longitudinale.
- $Xt$  réactance synchrone transversale.
- $T$  le couple électromagnétique.
- $\Omega$  la vitesse de rotation de la machine en  $rad/s$ .
- $n$  la vitesse de rotation de la machine en  $tr/min$ .
- $\varphi$  le déphasage entre le courant  $I_s$  et la tension simple  $V_s$  (orienté de  $I_s$  vers  $V_s$ ).
- $\psi$  le déphasage entre le courant  $I_s$  et la f.e.m de la machine  $E$  (orienté de  $I_s$  vers  $E$ ).
- $\delta$  angle interne entre la f.e.m  $E$  et la tension  $V_s$ .
- $J$  le courant continu d'excitation dans la roue polaire.

On suppose la machine synchrone surexcitée, par conséquent, dans ce type de fonctionnement le courant  $I_s$  est en avance sur la tension  $V_s$

14. Tracer le diagramme à deux réactances synchrones en convention moteur pour le fonctionnement nominal (déphasage  $\varphi = -27^\circ$ , courant en avance par convention moteur)

Vous représenterez les angles précédemment définis.

15. Déterminer la valeur du courant d'excitation  $J$  permettant le fonctionnement nominal.

16. Relever la valeur de l'angle de déphasage interne  $\delta$ .

## 2.7 Bilan des pertes et rendement du moteur de propulsion.

Un bilan des pertes est nécessaire au niveau du moteur de propulsion de manière à pouvoir calculer le rendement de celui-ci et de garantir le rendement de la chaîne de propulsion, pour un point de fonctionnement donné qui sera imposé par l'exploitant lors d'essais en mer.

On travaillera sur un moteur double étoile chargé à environ 60 %.

Point de fonctionnement :

$P = 7\,640 \text{ kW} - n = 125 \text{ tr/min} - U = 2\,855 \text{ V} - I_s = 824 \text{ A} - J = 490 \text{ A}.$

Les pertes nominales par effet Joule seront calculées pour une température de fonctionnement définie par la norme NFC 51 112, soit 130°C en classe B.

En effet, la machine est réalisée avec une isolation de classe F (155°C), mais n'est utilisée qu'en classe B (130°C), donnant ainsi à l'exploitant une marge de sécurité.

On prendra comme coefficient de température du cuivre  $\alpha = 0,00426$ .

Rappel :  $R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta)$

17. Calculer les résistances du stator et du rotor.

18. Calculer les pertes joules aux stators.

19. Calculer les pertes joules au rotor.

Pour le moteur, le bilan des pertes est le suivant :

- pertes magnétiques = 43 kW.
- pertes supplémentaires et harmoniques = 20 kW.
- pertes par ventilation forcée du moteur (pour  $14 \text{ m}^3 / \text{sec}$  environ) = 36 kW.
- pertes mécaniques (frottements et ventilation) = 8 kW.

20. Calculer le rendement du moteur pour ce point de fonctionnement.

## 2.8 Rendement garanti pour un essai réel à la mer.

Un essai réel à la mer a été effectué dans les conditions suivantes :

- 1 alternateur à 85 % de sa puissance nominale.
- 2 transformateurs d'alimentation propulsion.
- 2 convertisseurs d'une même ligne d'arbre.
- 1 système d'excitation pour une ligne d'arbre.
- 1 moteur double étoile chargé à environ 60 %, le tout en fonctionnement normal.

Avec cette configuration, en plus des pertes du moteur de propulsion, l'exploitant donne le détail des pertes d'une chaîne de propulsion :

- pertes d'un alternateur = 238 kW
- pertes des deux transformateurs = 58 kW
- pertes des deux convertisseurs = 84 kW
- pertes selfs = 18 kW
- pertes filtres = 26 kW
- autres pertes (câbles...) = 2 kW.

21. Calculer le rendement global de l'installation pour ce point de fonctionnement.

## 2.9 Excitation du moteur.

Afin de fournir le courant continu d'excitation de la machine, il est nécessaire de disposer d'une source de tension continue variable dans d'assez larges proportions, puisque entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement au régime nominal le courant d'excitation d'une machine à pôles saillants varie environ du simple au double.

On utilise ici une excitation par redresseurs dont le schéma est donné en annexe 2 .

22. Repérer sur le document réponse 1, la partie tournante, par un trait de couleur.

23. Donner le principe de fonctionnement de ce montage et préciser comment est effectué le réglage du courant d'excitation.

## 2.10 Réactances et constantes de temps.

Le constructeur du moteur donne (page 5), un certain nombre de réactances qui caractérisent la marche d'une machine synchrone aux divers régimes de fonctionnement.

24. Préciser à quoi correspondent les réactances transitoires et subtransitoires d'un point de vue magnétique.

Pour un moteur à pôles saillants, lors d'un court circuit triphasé, seules interviennent les réactances longitudinales  $X''\lambda$ ,  $X'\lambda$  et  $X\lambda$ .

25. Indiquer,

- quelle peut être l'exploitation de ces grandeurs par le constructeur du moteur.
- quelle peut être l'exploitation de ces grandeurs par l'utilisateur, notamment au niveau des protections électriques.

## 2.11 Calcul du couple électromagnétique.

On se propose de montrer qu'à courant d'excitation et à  $\psi$  donnés, le couple est proportionnel au courant continu entrant dans l'onduleur de courant.

Le diagramme vectoriel en fonctionnement donné en annexe 3, traduit la relation (en négligeant la résistance statorique  $R_s$ ) :

$$\underline{V} = jX_t I_s \cos \psi + jX\lambda I_s \sin \psi + \underline{E}$$

26. A partir de ce diagramme vectoriel, donner l'expression du couple électromagnétique  $T$  en fonction de  $E, \Omega, X\lambda, X_t$ , du courant  $I_s$  et de l'angle  $\psi$  à  $J=$  constante.

27. Tracer l'allure de la caractéristique  $T = f(\psi)$  et préciser pour quelle valeur de  $\psi$  le couple est maximal.

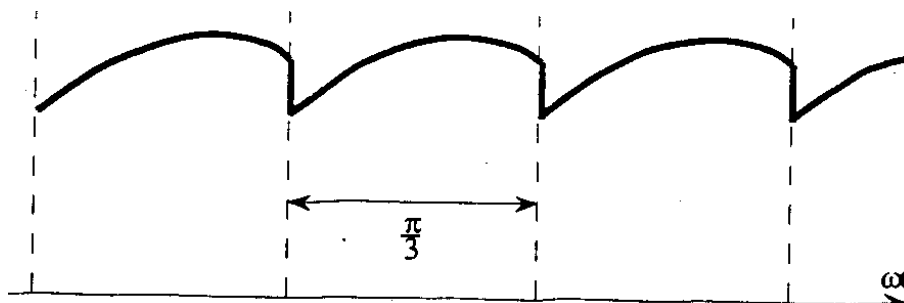
Application numérique :  $E = 3\,240$  V,  $I_s = 1335$  A,  $n = 145$  tr/min

## 2.12 Pulsations de couple.

Le couple pulsatoire peut apparaître gênant aux bas couples et principalement aux basses vitesses, si la transmission mécanique n'est pas de caractéristiques linéaires et présente un jeu. Le couple résultant du couple continu faible et du couple pulsatoire peut présenter des inversions périodiques de sens, et donner lieu à des claquements dans la transmission. Nous allons voir que l'utilisation d'un moteur à double bobinage, alimentés chacun par un onduleur de courant, dont les commutations sont décalées, permet de réduire considérablement la composante pulsatoire du couple.

Le couple électromagnétique est représenté ci dessous pour un moteur simple étoile .

Tem



28. Pour un moteur simple étoile, le couple électromagnétique se décompose en :

- un couple constant dû à la composante fondamentale du courant statorique.
- un couple périodique à 6 fois la fréquence d'alimentation du stator.

$$\text{soit } C = K \cdot \phi \cdot I \left[ \frac{3}{\pi} \cos \varphi_i + \frac{1}{\pi} \sin \varphi_i \sin 6\omega t \right]$$

avec  $\varphi_i$  déphasage du courant fondamental par rapport à la tension interne.

Calculer le rapport de l'amplitude crête du couple harmonique d'ordre 6 à l'amplitude du couple moyen  $C_6 / C_0$ .

application numérique :  $\varphi_i = 15^\circ$ .

29. Pour un moteur double étoile, le couple électromagnétique s'écrit :

$$C = K \cdot \phi \cdot I \left[ \frac{3}{\pi} \cos \varphi_i + \frac{1}{2\pi} \sin \varphi_i \sin 12\omega t \right]$$

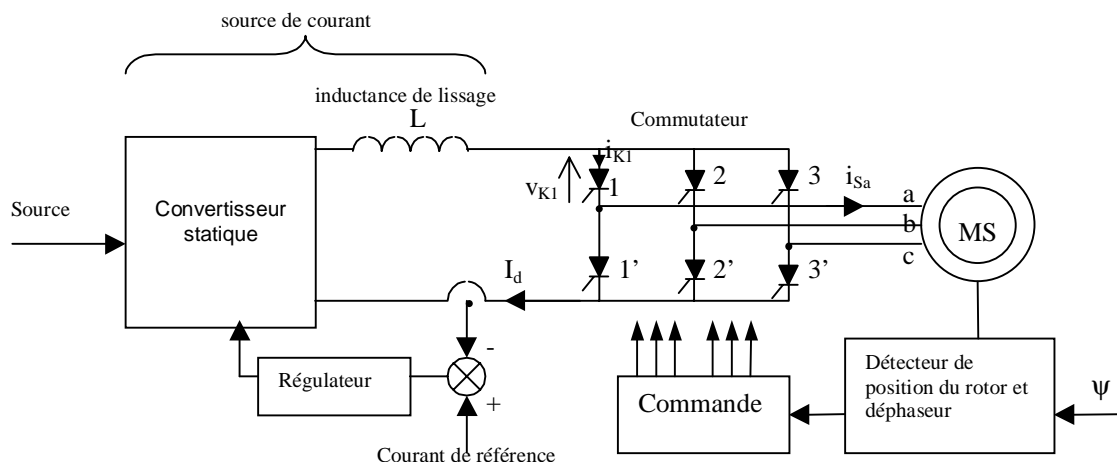
Calculer le rapport de l'amplitude crête du couple harmonique d'ordre 12 à l'amplitude du couple moyen  $C_{12} / C_0$ .

application numérique :  $\varphi_i = 15^\circ$ .

30. Commenter les résultats précédents et Justifier l'emploi d'un moteur double étoile à deux bobinages statorique décalés de  $30^\circ$  électrique, vis à vis de la fréquence du couple pulsatoire.

## PARTIE 3

### Alimentation des moteurs synchrones



#### Hypothèses :

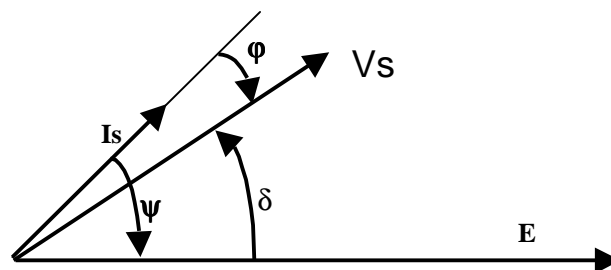
Pour la machine synchrone :

- La résistance des enroulements statoriques est négligée.
- Au fonctionnement nominal, chaque étoile de la machine synchrone est alimentée par une tension entre phases de 3 000 V à une fréquence de 29 Hz.

La self de lissage est parcourue par un courant  $I_d$  de valeur moyenne 1 700 A supposé parfaitement lissé.

On pose :

- $\alpha$  angle de retard à l'amorçage des interrupteurs ( pour un pont de diodes :  $\alpha = 0$  )
- $\varphi$  déphasage entre le courant d'alimentation statorique  $I_s$  et la tension simple  $V_s$  aux bornes de la machine
- $\psi$  déphasage entre le courant d'alimentation statorique  $I_s$  et la force électromotrice à vide  $E$
- $\mu$  angle d'empiètement



### 3.1 Analyse du fonctionnement

31 Tracer sur le **document réponse 2**, le courant dans la phase a de l'induit de la machine dans les deux cas suivants :

- Courant induit  $i_{sa}$  en avance de  $45^\circ$  ( $\psi = +45^\circ$ ) sur la force électromotrice  $e_a$  de la machine synchrone,
- Courant induit  $i_{sa}$  en retard de  $45^\circ$  ( $\psi = -45^\circ$ ) sur la force électromotrice  $e_a$  de la machine synchrone,

32 Pour chacun de ces deux cas, déterminer l'angle  $\alpha$  de retard à l'amorçage des interrupteurs.

33 Quelle est la relation liant l'angle  $\alpha$  de retard à l'amorçage des interrupteurs et le déphasage  $\psi$  entre le courant d'alimentation statorique  $I_s$  et la force électromotrice à vide  $E$ .

On suppose que la puissance active échangée entre la machine et la source d'alimentation est égale à :  $P = 3.E.I_s.\cos(\psi)$  (terme dû à la saillance de la roue polaire négligé).

34 Préciser les intervalles de réglage de  $\psi$  et de  $\alpha$  pour un fonctionnement :

- En traction,
- En freinage.

### 3.2 Structure du convertisseur

35 Tracer l'allure du courant et de la tension dans l'interrupteur 1 lorsque :

- Le courant induit est en avance de  $45^\circ$  sur la force électromotrice ( $\psi = +45^\circ$ ) de la machine synchrone (**document réponse 2**),
- Le courant induit est en retard de  $45^\circ$  sur la force électromotrice ( $\psi = -45^\circ$ ) de la machine synchrone (**document réponse 3**),

36 Pour chacune des deux structures, préciser :

- Le mode de commutation (assistée ou forcée),
- Les composants à utiliser (thyristor ou bien transistor),
- L'état de la machine (sous excitée ou bien sur excitée).

**La structure retenue ( voir schéma en annexe 2 ) pour l'application considérée est un onduleur à thyristors. Chaque bras de l'onduleur est constitué de trois thyristors en série. La suite du problème est consacrée à l'étude de cette structure.**

### 3.3 Dimensionnement des semi-conducteurs de puissance

Dans le cas où les contraintes appliquées sur le montage sont les plus sévères :

- chacun des enroulement en étoile du moteur supporte une tension entre phases efficace de 3 300 V ( $1,10 \times U_n$ ),
- La self de lissage est parcourue par un courant de valeur moyenne 2 000 A ( $1,15 \times I_{d_n}$ ).

37 Déterminer les tensions crêtes répétitives directes et inverses bloquées par chaque thyristor.

38 Calculer les courants efficaces et moyens supportés par les thyristors en négligeant l'ondulation dans la self de lissage.

39 Indiquer la fréquence des commutations supportées par les thyristors.

- 40 A l'aide de la documentation constructeur fournie en **annexe 4**, choisir les thyristors à utiliser.
- 41 Calculer les pertes de conduction dans un thyristor.

### 3.4 Analyse de la commutation

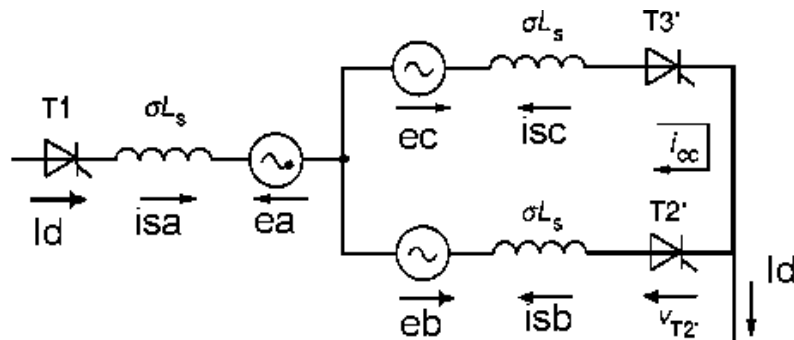


Schéma équivalent de la machine synchrone pendant la commutation  
(  $\sigma L_s$  : inductance de fuites totale )

Pour analyser la commutation, on considère le passage du courant de la phase 2 (interrupteur T2' conducteur) à la phase 3, par la commande à la fermeture de l'interrupteur T3'.

- 42 Quelle relation doivent vérifier  $e_b(t)$  et  $e_c(t)$  pour que la commutation du thyristor T2' vers le thyristor T3' soit possible. Indiquer sur le graphe du **document réponse 3**, les intervalles de temps où la commutation de T2' vers T3' est possible.

On étudie la commutation du thyristor T2' vers le thyristor T3' pendant que le thyristor T1 conduit. Les paramètres d'étude sont les f.e.m.  $e_b(t)$ ,  $e_c(t)$  de la machine synchrone, l'inductance de fuite totale  $\sigma L_s$  et le courant  $I_d$  dans la self de lissage.

- 43 Donner la valeur des courants  $i_{T2'}(t)$  et  $i_{T3'}(t)$  dans les interrupteurs T2' et T3' :
- avant la commutation de T2' vers T3',
  - après la commutation de T2' vers T3',
- 44 Exprimer les équations différentielles liant les courants  $i_{T2'}(t)$  et  $i_{T3'}(t)$  dans les interrupteurs T2' et T3 pendant la commutation de T2' vers T3' aux tensions  $e_b(t)$ ,  $e_c(t)$ .
- 45 Tracer sur le **document réponse 3**, l'allure des courants dans les interrupteurs T2' et T3' en faisant apparaître l'angle  $\mu$ .
- 46 Exprimer  $i_{T2'}$  et  $i_{T3'}$  pendant la phase de commutation en fonction de  $\alpha$ ,  $E$ ,  $\sigma L_s \omega$  et  $I_d$ .
- 47 En déduire l'angle  $\mu$  d'empiètement en fonction du courant moyen dans la self de boucle ( $I_d$ ), de la f.e.m. ( $E$ ) de la machine synchrone, de la réactance ( $\sigma L_s \omega$ ) de commutation de la machine synchrone et de l'angle ( $\alpha$ ) de retard à l'amorçage de l'interrupteur T3'.

- 48 *Calculer l'angle  $\mu$  d'empiétement au régime nominal (  $U_n = 3\,000\text{ V}$ ,  $I_d = 1\,700\text{ A}$ ,  $\sigma L_s \omega = 213\text{ m}\Omega$  ) lorsque le courant induit est en avance de  $45^\circ$  sur la force électromotrice de la machine synchrone.*
- 49 *Quelle est la conséquence de l'empiétement sur le fonctionnement du convertisseur statique alimentant la machine synchrone.*

### 3.5 Loi de commande

Le contrôle du couple s'effectue par action sur les grandeurs de réglage :

- Le courant  $I_d$  dans l'étage intermédiaire contrôlé par le redresseur d'alimentation,
- Le déphasage  $\psi$  ou  $\phi$  suivant le mode d'autopilotage retenu (couple maximal ou facteur de puissance maximal),
- Le courant inducteur.

Le principe de la stratégie de commande avec facteur de puissance maximal consiste à :

- Maintenir un temps  $t_{inv}$  d'application de tension inverse aux bornes des thyristors compatible avec le temps de recouvrement  $t_q$  des thyristors, sur toute la plage de fonctionnement, de manière à obtenir le facteur de puissance le plus proche possible de l'unité.
- Maintenir le flux résultant constant en agissant sur le courant inducteur.

A proximité du régime nominal, pour un courant d'alimentation  $I_d$  et une pulsation  $\omega$  donnés, la commande avec facteur de puissance maximal est obtenue en réglant le temps de calage  $\psi$  de la séquence de commande en de telle façon en maintenant constant le temps d'application de la tension inverse  $t_{inv}$  aux bornes des thyristors.

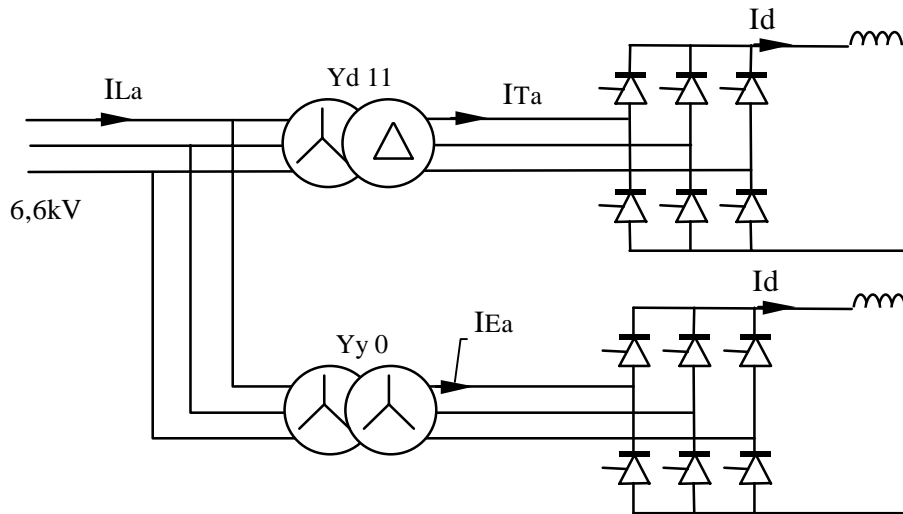
$\gamma$  désigne l'angle pendant lequel la tension appliquée aux bornes des thyristors est négative ( $\gamma > \omega \cdot t_q$ ) :

- 50 *Déterminer la relation liant les angles  $\alpha$ ,  $\mu$  et  $\gamma$ .*
- 51 *Exprimer la loi de commande  $\alpha = f(I_d, E, \omega)$  pour obtenir un fonctionnement avec un temps d'application de la tension inverse aux bornes des thyristors égal à  $t_{inv}$ . ( Cette loi de commande tient compte de l'inductance de fuite totale  $\sigma L_s$  caractéristique de la machine et du temps d'application de la tension inverse  $t_{inv}$  des thyristors utilisés. )*
- 52 *Application numérique. Au point de fonctionnement nominal et pour un temps d'application d'une tension inverse aux bornes des interrupteurs  $t_{inv}$  de  $250\ \mu\text{s}$ . Calculer l'angle de retard à l'amorçage des interrupteurs  $\alpha$  à programmer.*
- 53 *Quel est alors le facteur de puissance de la machine synchrone alimentée par onduleur de courant ?*

## PARTIE 4

### 4.1 Harmoniques de courant générés par le redresseur

Ci dessous le schéma global du montage redresseur dodécaphasé



$m$  : rapport de transformation des transformateurs

Rappel : le « taux global de distorsion » est défini par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental :

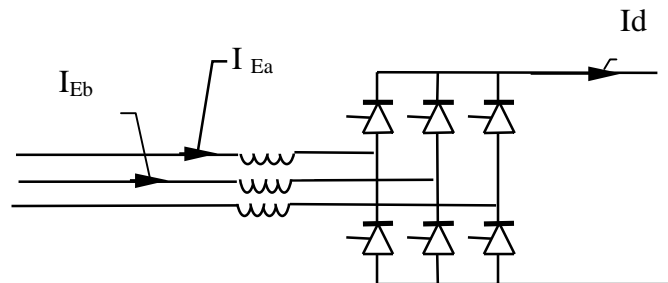
$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X^2 h}}{X_f}$$

- 54 *A l'aide de la relation ci-dessus, déterminer la relation donnant le taux global de distorsion harmonique  $D$  en fonction de la valeur efficace  $X$  et du fondamental  $X_f$  du signal étudié.*

## Etude des courants

**Hypothèse** : Pour cette étude on négligera l'empiètement anodique et le courant  $I_d$  est considéré comme parfaitement lissé.

### 4.2 Etude harmonique des courants du montage hexaphasé



- 55 En utilisant le **document réponse 4** et en se référant au schéma ci-dessus, donner l'allure en fonction du temps et de  $I_d$  des courants :  $I_{Ea}$  ,  $I_{Eb}$
- 56 Calculer la valeur efficace ( $I_E$ ) du courant en aval du transformateur  $Y_y$  et la valeur efficace du fondamental ( $I_{Ef}$ ) en fonction de  $I_d$ .
- 57 En déduire le taux global de distorsion du courant en amont d'un redresseur hexaphasé.

### 4.3 Etude harmonique des courants de l'ensemble redresseur (Voir schéma global du redresseur dodécaphasé ci-dessus )

- 58 Compléter le **document réponse 4** et donner l'allure des courants  $I_{Ta}$  et  $I_{La}$  en fonction du temps, de ( $I_d$ ) et de ( $m \cdot I_d$ ),
- 59 Calculer la valeur efficace du courant en ligne ( $I_L$ ) et la valeur efficace du fondamental ( $I_{Lf}$ ) en fonction de ( $m \cdot I_d$ ).
- 60 En déduire le taux global de distorsion du courant en ligne en amont du redresseur dodécaphasé.
- 61 Conclure quant à l'intérêt d'un pont dodécaphasé.