

# AGRÉGATION

## SESSION 2005

### CONCOURS INTERNE

#### Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

Option B : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

#### ÉTUDE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL




DURÉE : 8 HEURES, COEFFICIENT : 1

*Aucun document n'est autorisé.*

*Calculatrice autorisée (conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999)  
Convertisseur en Euro autorisé*

### ALTERNO-DÉMARREUR

**Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :**

 Dossier de présentation, texte du sujet avec le travail demandé	23 pages
 Documents réponses N°1 à 7	7 pages
 Documents annexes	1 page

**Ce sujet comporte trois parties indépendantes :**

Partie **A** : Analyse des contraintes imposées à l'alternodémarreur.

Partie **B** : Étude du fonctionnement de l'alternodémarreur.

Partie **C** : Étude du convertisseur statique et de sa commande.

#### **Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.**

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

Les candidats sont invités à numérotter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police italique et repérée par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

- après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

Si le texte du sujet, de ses questions ou de ses annexes, vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement dans votre copie.

# ÉTUDE D'UN ALTERNO-DÉMARREUR À TRANSMISSION PAR COURROIE SUR BATTERIE 12 VOLTS

## Présentation de l'épreuve

L'objectif de cette épreuve est de préparer un ensemble de modules pédagogiques illustrés à partir de la problématique de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules automobiles. Les technologies actuelles, en particulier celles issues du génie électrique, permettent de contribuer largement au succès de cet enjeu écologique.

L'épreuve est constituée de 3 parties indépendantes :

**Partie A :** Analyse des contraintes imposées à l'alternateur - Préparation d'une illustration de cours sur la prédétermination des caractéristiques d'un actionneur électromécanique en régime impulsif.

**Partie B :** Etude de la machine synchrone de l'alternateur - Préparation d'une séquence de simulation du fonctionnement dans les 2 régimes de marche.

**Partie C :** Etude du convertisseur statique et de sa commande - Préparation de l'installation d'un poste de travaux pratiques dans un laboratoire d'étude de systèmes.

Ces trois parties sont composées de questions à caractère scientifique, didactique et pédagogique réparties au gré de leur opportunité.

Pour les questions de nature **scientifique**, l'évaluation portera, au plus haut niveau, sur la maîtrise des connaissances, la qualité du raisonnement et sur l'exactitude des résultats attendus.

Pour les questions de nature **didactique**, l'évaluation portera sur la capacité des futurs professeurs agrégés à transposer les notions techniques et scientifiques fondamentales à un niveau d'enseignement donné en proposant des hypothèses de travail et des illustrations adaptées au niveau de la classe concernée.

Pour les questions de nature **pédagogique**, l'évaluation portera sur la capacité des futurs professeurs agrégés à :

- proposer des séquences d'enseignement qui vont conduire à gérer le travail d'un ensemble d'élèves en prenant en compte les exigences de la progression pédagogique ainsi que les contraintes matérielles, temporelles et sécuritaires de la situation ;
- énoncer les explications et présentations associées aux séquences proposées ;
- proposer des outils de description adaptés à la situation d'enseignement et au niveau de la classe.

## Mise en situation du support de l'épreuve

Les constructeurs automobiles sont actuellement confrontés au problème de la diminution des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et donc indirectement à celui de la réduction de la consommation de carburant des véhicules. Les possibilités offertes par les évolutions de l'électronique de puissance dans la maîtrise du contrôle/commande et la capacité des actionneurs électromécaniques à fournir des couples massiques de plus en plus importants, permettent de proposer de nouvelles stratégies d'utilisation des groupes motopropulseurs implantés dans les voitures. Dans cette perspective, ils mettent sur le marché des véhicules équipés d'alternateur (figure 1). Cet équipement cumule la fonction de démarreur et d'alternateur à partir d'une machine électrique utilisant les points de fixations standard de l'alternateur classique, la liaison avec le moteur se faisant par une courroie crantée.

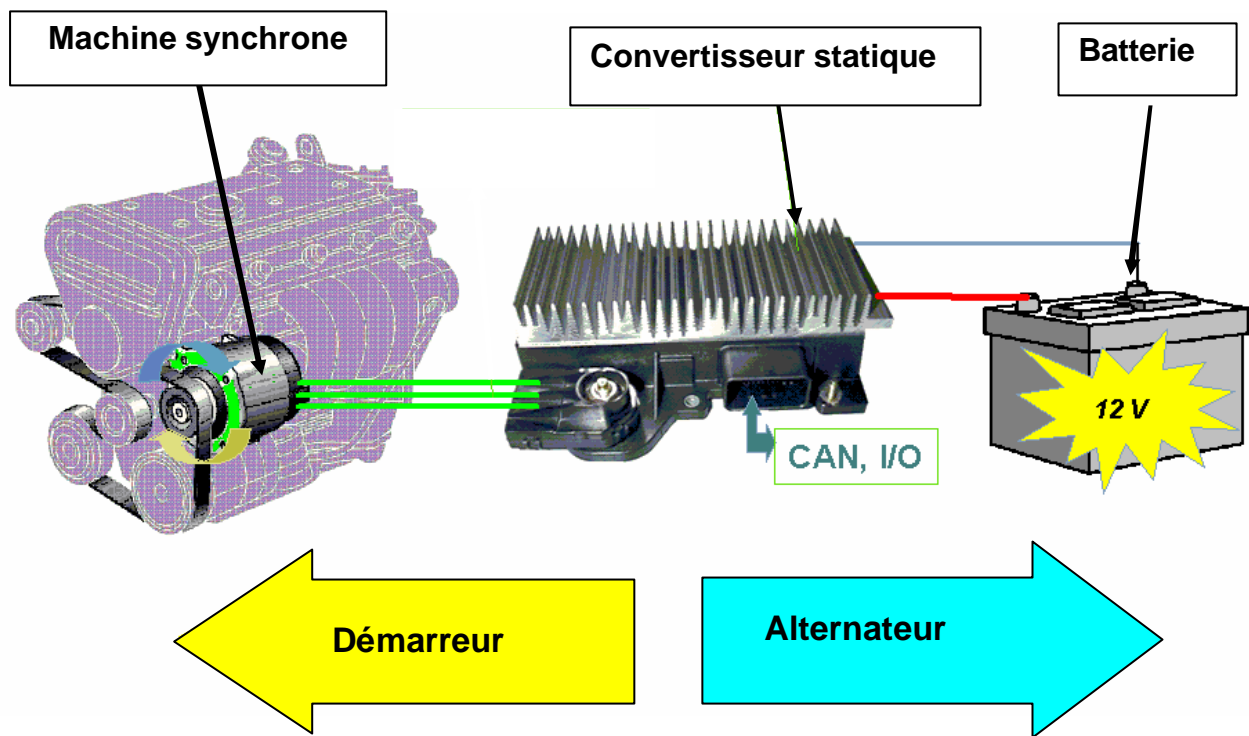


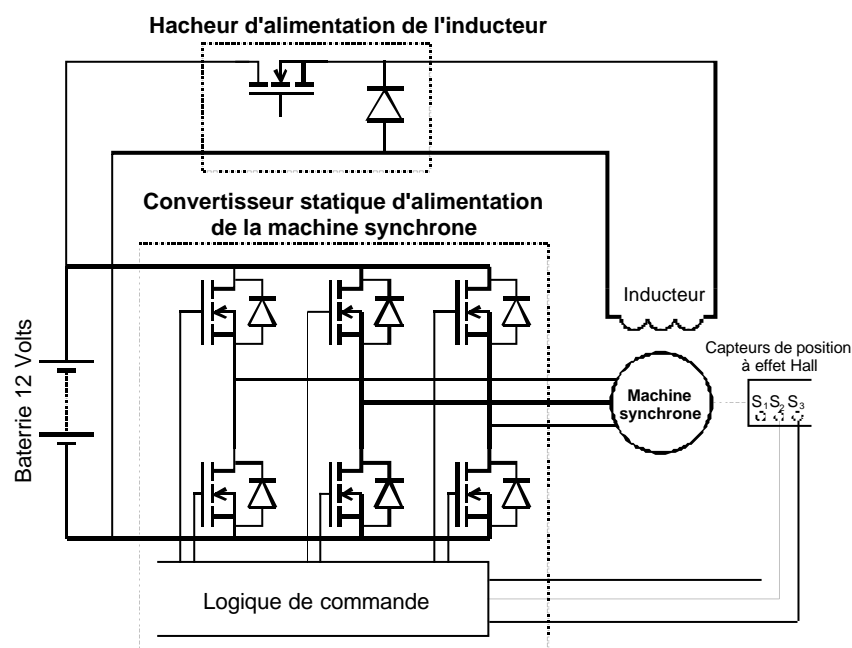
Figure 1

Ce système permet d'obtenir la fonction « start-stop » qui offre la possibilité de couper le moteur thermique lorsque le véhicule est à l'arrêt et de redémarrer pratiquement instantanément et silencieusement quand le conducteur enclenche une vitesse ou relâche le frein (dans le cas des boîtes automatiques). Ce dispositif équipe les véhicules de moyenne gamme (véhicule à essence de cylindrée 1,4 litres). Le marché visé est celui des véhicules urbains pour lequel le « start-stop » aura l'impact le plus grand sur la réduction de la consommation (5 à 10 % annoncé).

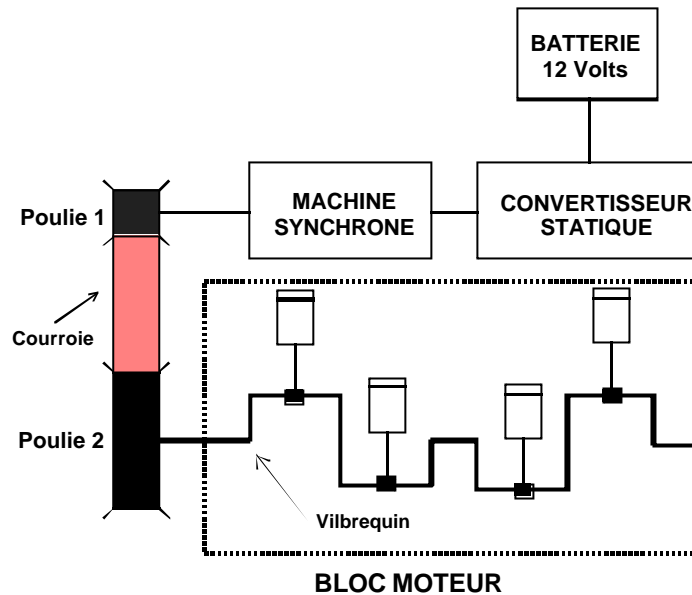
### Présentation générale de l'alternodémarrreur

L'alternodémarrreur est constitué d'une machine synchrone triphasée à rotor bobiné implantée à la place de l'alternateur. Un convertisseur statique relie la machine à la batterie 12 V standard. Le système s'interface au véhicule par un bus CAN ou directement par des entrées-sorties analogiques ou numériques.

### schéma électrique de puissance



## Chaîne cinématique



- $d_1 = 60 \text{ mm}$  : diamètre de la poulie 1 ;
- $d_2 = 160 \text{ mm}$  : diamètre de la poulie 2 ;
- $C_{RV}$  : couple résistant côté vilebrequin. Ce couple est égal au couple de décollage  $C_{DV}$  plus un couple de compression  $C_{PV}$  qui dépend de la vitesse mais qu'on peut considérer comme constant et égal à 40 Nm pour la voiture citée ci-dessus ;
- $C_{DV}$  : couple de décollage coté vilebrequin. Ce couple vaut 80 Nm à froid (- 25°C) et 40 Nm à chaud pour une voiture à essence de cylindrée 1400 cm<sup>3</sup>. Ce couple est constant pendant le temps de démarrage du moteur thermique ;
- $J_{VV} = 150 \text{ gm}^2$  : moment d'inertie des masses en mouvement côté vilebrequin par rapport à l'axe de rotation de celui-ci ;
- $J_{RM} = 4 \text{ gm}^2$  : moment d'inertie du rotor de la machine synchrone par rapport à son axe de rotation ;
- $\Omega_V$  : vitesse de rotation en rad/s du vilebrequin ;
- $\Omega$  : vitesse de rotation en rad/s de l'arbre de la machine synchrone.

## Machine synchrone

Il s'agit d'une machine synchrone triphasée à rotor bobiné. Les enroulements statoriques sont couplés en étoile. La photo de la **figure 2** montre la machine synchrone avec son convertisseur.



**Figure 2**

Les dimensions globales de la machine, sans la poulie, sont de 150 mm de diamètre et de 160 mm de longueur.

- $p = 6$  : nombre de paires de pôles de la machine ;
- $N_{ES} = 36$  : nombre d'encoches au stator. Il y a une encoche par pôle et par phase ;
- Chaque enroulement statorique est constitué de 4 conducteurs en parallèle de 1,18 mm de diamètre chacun ;
- $e = 0,35 \text{ mm}$  : épaisseur de l'entrefer ;
- $D_R = 105 \text{ mm}$  : diamètre du rotor ;
- $N_{ER}$  : nombre d'encoches au rotor. Il y a une encoche par pôle ;
- $N_{CR} = 180$  : nombre de conducteurs par encoche au rotor ;
- $I_{EXN} = 20 \text{ A}$  : courant d'excitation nominal au rotor ;
- l'induction produite dans l'entrefer par un pôle magnétique rotorique et pour le courant d'excitation nominal est d'environ 1 Tesla ;
- $R_{EX} = 0,5 \Omega$  : résistance de l'inducteur ;
- $L_{EX} = 0,1 \text{ H}$  : inductance de l'inducteur ;
- Puissance nominale de la machine : 2,5 kW sous 14 V en régime permanent pour le fonctionnement alternateur avec 100°C de température ambiante et une vitesse de rotation de 6 000 tr/min .

### **Convertisseur statique alimentant la machine synchrone**

Chaque interrupteur est constitué d'un transistor MOS avec une diode en anti-parallèle.

En mode démarreur, le convertisseur fonctionne en onduleur pleine onde. Les transistors sont commandés par l'intermédiaire des trois capteurs à effet Hall placés en bout d'arbre de la machine.

En mode générateur, on recharge la batterie. Les transistors ne sont plus commandés. Seules les diodes conduisent et assurent le redressement des tensions, alternatives issues de la machine synchrone.

Le convertisseur statique est constitué de trois modules de référence SK300MB075 dont les principales caractéristiques sont données à l'**annexe 1**.

### **Hacheur série d'alimentation de l'inducteur**

Il est constitué d'un transistor MOS et d'une diode. La fréquence de hachage est de 250 kHz.

En mode démarreur le rapport cyclique du hacheur vaut 1 (le transistor conduit en permanence) et le courant d'excitation est égal à sa valeur maximale.

En mode générateur le hacheur permet le réglage du courant d'excitation afin de contrôler le courant de charge de la batterie.

### **Batterie 12 Volts**

Il s'agit d'une batterie standard au plomb 12 V, 60 Ah.

# PARTIE A

## Analyse des contraintes imposées à l'alternateur-démarreur

### **Préparation d'une illustration de cours sur la prédétermination des caractéristiques d'un actionneur électromécanique en régime impulsif**

L'étude proposée ici va conduire à déterminer les principales caractéristiques attendues sur la machine synchrone de l'alternateur-démarreur en mode alternateur et en mode démarreur.

#### Etude des performances

##### Performances attendues en mode alternateur

Le courant de charge de la batterie ne doit pas dépasser 150 A de manière permanente pour préserver la durée de vie annoncée par le constructeur. On suppose, pour cette partie, que la tension à vide de la batterie est de 12,7 V et que sa résistance interne est 6 mΩ.

**QA.1** Déterminer la puissance nominale que doit fournir la machine synchrone en mode alternateur.

##### Performances attendues en mode démarreur

Il s'agit de permettre la coupure du moteur thermique lorsque le véhicule est à l'arrêt comme par exemple, en ville, durant l'attente devant un feu tricolore en position «feu rouge ». Pour assurer un confort de conduite acceptable, le redémarrage du moteur doit être rapide et transparent pour le conducteur et ceci même dans des situations relativement contraignantes comme les embouteillages. En mode démarreur, l'alternateur-démarreur doit donc répondre aux exigences suivantes :

- assurer un démarrage très rapide à chaud (< 0,4 s) ;
- pouvoir démarrer le moteur thermique à froid (jusqu'à -25°C) ;
- assurer des démarrages fréquents, voire très fréquents.

#### Etude simplifiée du démarrage

**Hypothèse :**

- Pour simplifier les calculs, on suppose que le couple moteur reste constant pendant la phase de démarrage et peut atteindre 50 Nm.

##### Mise en équation de l'entraînement

**QA.2** Calculer le rapport de réduction de la chaîne cinématique  $r$  défini par la relation suivante :

$$r = \frac{\Omega}{\Omega_v}.$$

**QA.3** A l'aide du théorème de la conservation de l'énergie cinétique, calculer l'inertie des masses en mouvement côté vilebrequin rapportées sur l'axe du moteur d'entraînement (l'inertie de la courroie de transmission sera négligée).

**QA.4** Par application du Principe Fondamental de la Dynamique des systèmes en rotation, déterminer les équations de l'évolution de la vitesse de l'ensemble (moteur + charge) pendant la phase de démarrage du moteur thermique à chaud puis à froid.

## **Démarrage à chaud**

Le véhicule est dans un cycle urbain où la fonction « start-stop » est pleinement utilisée : à l'arrêt, le moteur thermique est coupé et dès que le conducteur souhaite repartir, le moteur est remis en route. Dans cette situation, le moteur thermique doit démarrer en 0,4 s avec une vitesse de rotation égale à 200 tr.min<sup>-1</sup>.

**QA.5** Calculer le couple moteur  $C_{\text{démchaud}}$  que l'alternateur-démarrreur doit engendrer pour répondre à ce cahier des charges. On supposera que l'accélération est constante pendant la phase de démarrage.

**QA.6** Représenter les chronogrammes de l'évolution du couple et de la fréquence de rotation du moteur durant la phase de démarrage à chaud.

## **Démarrage à froid**

Cette situation singulière correspond à la mise en route du moteur lors de la prise en main du véhicule par le conducteur, après une longue période d'immobilisation. Le moteur est donc froid et on admet alors un temps de démarrage de l'ordre de la seconde.

**QA.7.** Calculer le couple moteur  $C_{\text{démfroid}}$  que l'alternateur-démarrreur doit engendrer pour répondre à ce cahier des charges. On supposera que l'accélération est constante pendant la phase de démarrage.

**QA.8** Représenter les chronogrammes de l'évolution du couple et de la fréquence de rotation du moteur durant la phase de démarrage à froid.

## **Démarrages fréquents**

On considère un régime sévère tel que le moteur chaud doit être démarré toutes les 30 s pendant 10 minutes.

**QA.9** Calculer, pour cette contrainte de fonctionnement, le Couple Moyen Thermique Équivalent  $C_{\text{MTE}}$  que doit supporter la machine en mode démarreur. On ne tiendra pas compte de l'échauffement du au mode alternateur.

On rappelle que le  $C_{\text{MTE}}$  est donné par la relation suivante :

$$C_{\text{MTE}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} c^2(t) dt}$$

T : temps de cycle

c(t) : valeur instantanée du couple moteur

**QA.10** Indiquer, en justifiant la réponse, quels principaux paramètres vont limiter la fréquence des démarrages du groupe et quels sont les moyens possibles pour éviter la surcharge thermique de la machine synchrone dans ce contexte d'utilisation.

**QA.11** Montrer que les caractéristiques électromécaniques de la machine synchrone prévue par le constructeur sont bien adaptées à la fonction d'usage de l'alternateur-démarrreur.

En mode démarreur dans la fonction « start-stop », l'alternateur-démarrreur présente un régime de fonctionnement particulièrement sévère car la machine synchrone délivre un couple important, supérieur à son couple nominal, durant des temps très courts. Pour ce type d'application, la simple lecture de la plaque à bornes de l'actionneur ne suffit plus et il faut se référer à la documentation détaillée fournie par le constructeur, et en particulier à la caractéristique mécanique.

Il s'agit ici de préparer une illustration de cours, en direction des élèves d'une **classe de terminale génie électrotechnique**, pour introduire les concepts de couple permanent thermique et de couple impulsionnel. Il ne s'agit pas ici de travailler dans une situation homothétique à celle de l'alternodémarreur réel, mais d'observer le comportement d'un moteur sollicité d'une manière impulsionnelle, configuration que l'on retrouve dans de nombreuses autres applications. Le matériel retenu est un banc d'essai (**Figure 3**) composé d'un frein à poudre, d'une machine synchrone associée à son dispositif de pilotage, d'une génératrice tachymétrique et d'un couplemètre dynamique.

Les caractéristiques principales de la machine sont les suivantes :

Couple en rotation lente	Vitesse max	Inertie	Couple par ampère crête	Courant permanent
4 Nm	2 300 tr.min <sup>-1</sup>	29.10 <sup>-5</sup> kg.m <sup>2</sup>	1 Nm/A	3,98 A

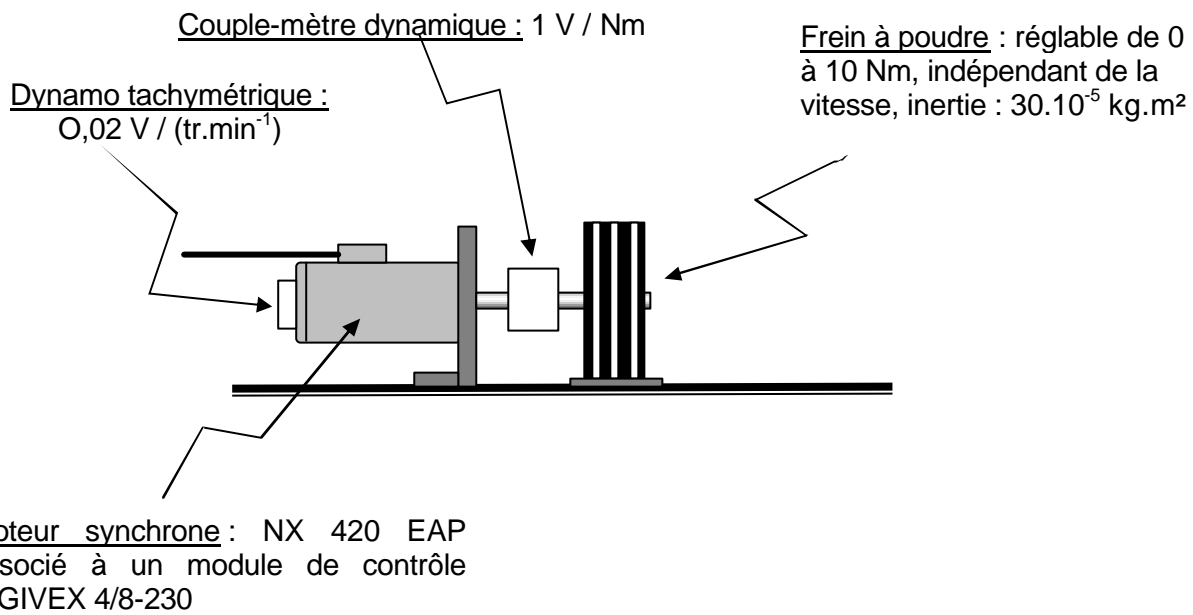
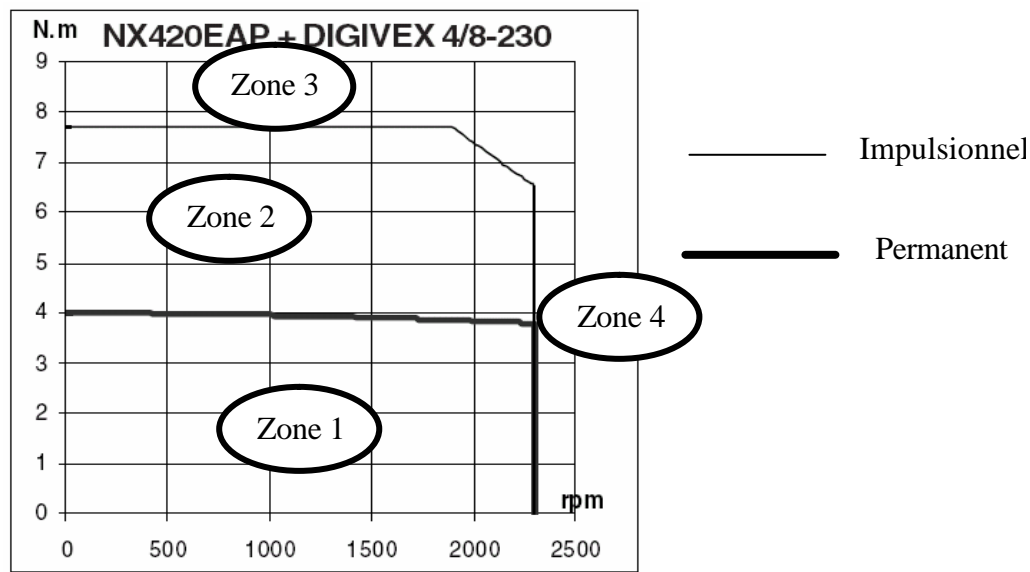


Figure 3

La caractéristique mécanique présentée ci-dessous est celle du moteur synchrone installé sur le banc.



**QA.12** Décrire, les contraintes supportées par le moteur si son point de fonctionnement se situe dans les zones 1, 2, 3 puis 4 (en deux phrases au maximum pour chaque zone).



On souhaite maintenant, à l'aide du banc d'essai présenté en **figure 3**, montrer à des élèves de terminale génie électrotechnique, un fonctionnement moteur en régime impulsif à l'image de la fonction « start-stop » de l'alternateur.

On cherche tout d'abord à illustrer l'évolution du point de fonctionnement de l'application dans la caractéristique mécanique de la machine synchrone.

Dans un deuxième temps, on montrera que si le Couple Moyen Thermique Équivalent ( $C_{MTE}$ ) imposé à la machine est inférieur ou égal au couple permanent donné par le constructeur, le moteur ne sera pas en surcharge thermique (pas de déclenchement de la protection thermique incluse dans le module de contrôle). Dans le cas contraire, il y aura déclenchement de la protection du fait de la surcharge thermique appliquée au moteur).

**QA.13** Déterminer, en le justifiant par des calculs, un profil de vitesse à appliquer à la machine synchrone (via le module de contrôle) qui permettra de la solliciter dans des conditions telles que :

$$C_{MTE} = C_{Permanent}$$

**QA.14** Dessiner, sur le **document réponse 1**, l'évolution du point de fonctionnement conformément au profil de vitesse proposé à la question **QA.13**.

**QA.15** Dessiner, sur le **document réponse 1**, les chronogrammes du couple et de la vitesse du moteur dans ces conditions de fonctionnement.

**QA.16** Proposer, en le justifiant par des calculs, un nouveau réglage du profil de vitesse pour obtenir un déclenchement de la protection thermique.

**QA.17** Proposer un schéma de montage complet, composé du banc d'essai présenté en **figure 3** et des appareils de mesure adéquats dont on justifiera le choix de manière précise.

**QA.18** Ecrire le scénario de cette illustration de cours en précisant bien le contenu des explications à fournir lors de la présentation des chronogrammes obtenus aux questions **QA.14** et **QA.15**.

**QA.19** Rédiger un paragraphe composé de cent mots au maximum pour indiquer aux élèves les points forts à retenir à l'issue de cette démonstration de cours.

## PARTIE B

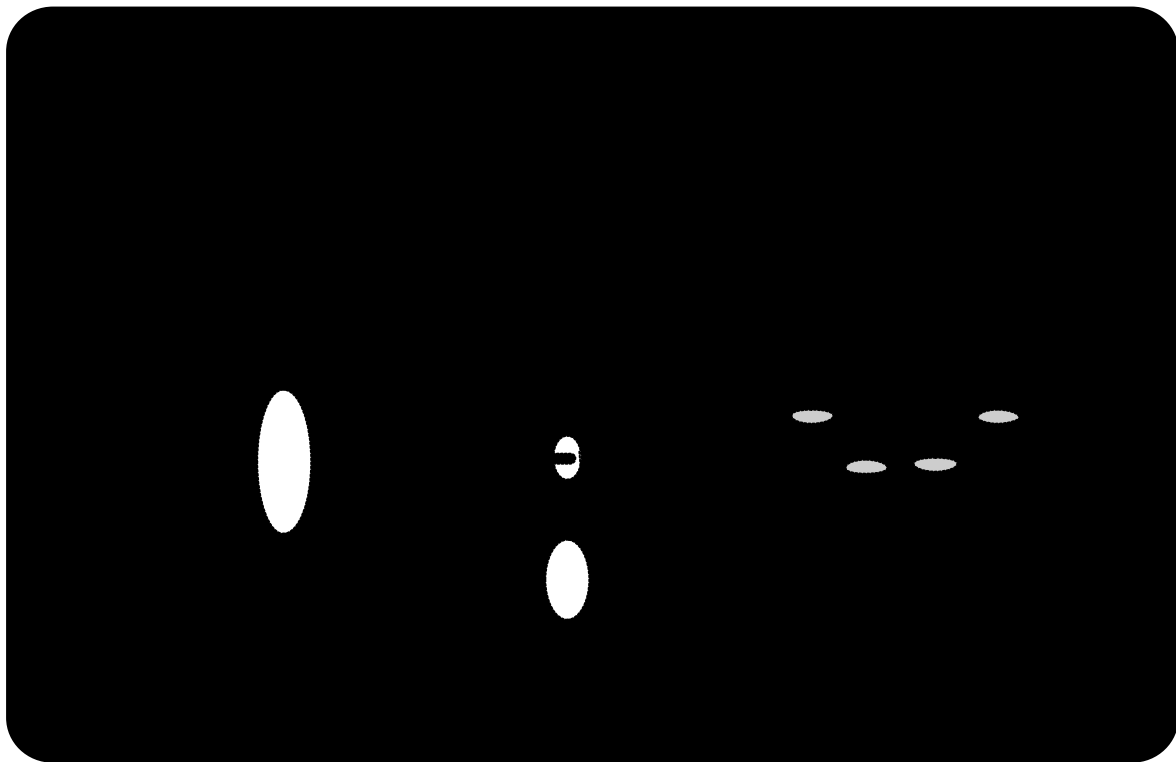
### Étude du fonctionnement de l'alternateur

#### **Préparation d'une séquence de simulation du fonctionnement dans les 2 régimes de marche**

L'objectif de cette partie est de préparer une séquence pédagogique qui a pour but d'étudier le comportement de l'alternateur en conditions réelles de fonctionnement. Cette étude, destinée à une classe de BTS électrotechnique, sera menée à l'aide d'une simulation.

Il s'agit, dans un premier temps, de préparer le travail de renseignement des paramètres des différents blocs qui constituent le simulateur en calculant les grandeurs caractéristiques de l'application réelle puis d'effectuer quelques calculs pour vérifier la validité des résultats obtenus à l'issue de la simulation.

La **figure 4** donnée ci-dessous présente l'interface de la partie électromécanique du simulateur.



**Figure 4**

Le travail de préparation de la simulation est le suivant :

- pour la machine synchrone, il faut calculer l'inductance cyclique  $L$ , la résistance  $R$  et la valeur de la f.e.m.  $E$  en fonction de la vitesse et du courant d'excitation de la machine ;
- pour la transmission poulie-courroie, il faut calculer le rapport de réduction ;
- pour le moteur thermique, il faut prédéterminer les grandeurs mécaniques à paramétrer pour se placer dans les situations de fonctionnement réelles (chaud, froid, alternateur et démarreur).

## Modélisation des constituants

### Modélisation de la machine synchrone

#### Hypothèses :

- On suppose que l'entrefer est constant ;
- La perméabilité du fer est supposée infinie ;
- On néglige les effets d'encoches ;
- L'induction est radiale dans l'entrefer de la machine ;
- Toutes les lignes d'induction traversent l'entrefer.

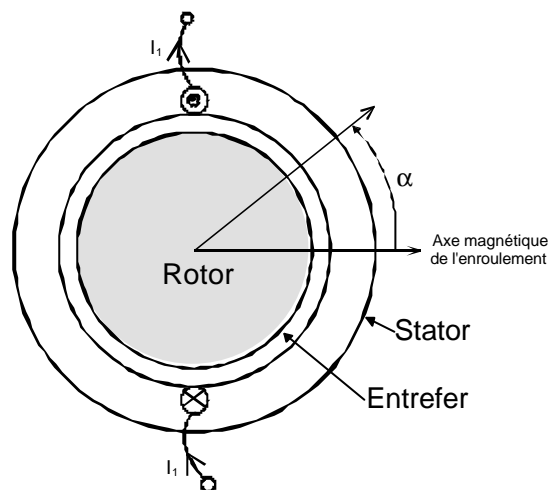
**QB.1** Énoncer les simplifications apportées par chacune de ces hypothèses de travail.

Sur le **document réponse 2** est représenté une coupe de la machine. Les encoches statoriques avec les conducteurs sont matérialisées par des cercles. Un point noir dans le cercle signifie que le courant sort du plan de la machine. Une croix dans le cercle signifie que le courant rentre dans le plan de la machine.

**QB.2** Représenter, sur le **document réponse 2**, par un point et une croix le courant circulant dans les conducteurs de l'enroulement 1. Représenter la connexion de l'entrée de l'enroulement 1 en y mettant l'indice  $E_1$ .

**QB.3** Représenter, sur le **document réponse 2** les connexions d'entrée et de sortie des enroulements 2 et 3 du stator en les repérant par la lettre E d'indice 2 et 3 pour les entrées et lettre S d'indice 2 et 3 pour les sorties.

Une coupe de la machine dans l'espace électrique est représentée à la **figure 5**. Les deux encoches diamétrales, matérialisée par des cercles, représentent l'enroulement 1. L'enroulement est parcouru par un courant continu  $I_1$ .



**Figure 5**

**QB.4** Représenter, sur le **document réponse 2** deux lignes de champ magnétique créées chacune par le courant dans une encoche puis orienter ces deux lignes de champ.

**QB.5** Représenter, sur le **document réponse 2**, l'allure de la courbe de  $b = f(\alpha)$  de l'induction  $b$  dans l'entrefer créée par l'enroulement 1 parcouru par le courant continu  $I_1$  en fonction de l'angle électrique  $\alpha$ . On suppose que l'induction est positive quand elle sort du rotor.

**QB.6** En appliquant le théorème d'Ampère, exprimer  $B_{MAX} = f(\mu_0, e, I_1)$ . On rappelle que  $\mu_0$  est la perméabilité de l'air,  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ .

**QB.7** Calculer l'expression du fondamental  $b_{h1}(\alpha)$  (premier harmonique de la série de Fourier de  $b(\alpha)$ ) et la mettre sous la forme  $b_{h1} = k_{h1} B_{MAX} \cos(\alpha)$ . Calculer la valeur numérique de  $k_{h1}$ .

**QB.8** Représenter l'allure de  $b_{h1}(\alpha)$  sur le **document réponse 2**.

Dans ce qui suit on assimile  $b(\alpha)$  à son fondamental  $b_{h1}(\alpha)$

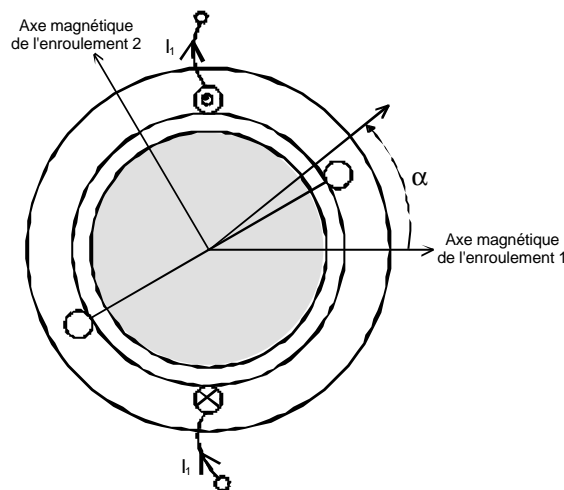
On souhaite calculer l'inductance propre  $L$  de l'enroulement 1. La valeur de cette inductance est égale au flux total  $\Psi_1$  embrassé par l'enroulement 1, lorsqu'il est alimenté seul, divisé par le courant qui crée ce flux. Le flux élémentaire  $d\Psi$  qui traverse la surface élémentaire  $dS$  s'écrit  $d\Psi = b(\alpha) \frac{D_R}{2} L_M d\alpha$ .  $L_M$  est la longueur de la machine.

**QB.9** Intégrer le flux élémentaire  $d\Psi$  sur toute la surface portée par l'enroulement 1 et donner l'expression de  $\Psi_1 = f(k_{h1}, \mu_0, e, D_R, L_M, I_1)$ .

**QB.10** Donner l'expression de l'inductance propre  $L$ . Calculer la valeur numérique de  $L$ .

On souhaite calculer la mutuelle inductance  $M$  entre deux enroulements statoriques. Les trois enroulements statoriques sont décalés de  $120^\circ$  dans l'espace électrique. Pour calculer  $M$ , on va alimenter l'enroulement 1 et déterminer le flux total embrassé par l'enroulement 2.

$M$  est égal au flux total  $\Psi_{12}$  embrassé par l'enroulement 2 et créé par l'enroulement 1 divisé par le courant qui crée ce flux.



**QB.11** Intégrer le flux élémentaire  $d\Psi$  sur toute la surface portée par l'enroulement 2 et donner l'expression de  $\Psi_{12} = f(k_{h1}, \mu_0, e, D_R, L_M, I_1)$ .

**QB.12** Donner l'expression de  $M$  puis calculer sa valeur numérique.

On veut calculer l'ordre de grandeur de la résistance  $R$  d'un enroulement statorique sachant que la température ambiante de fonctionnement de la machine peut atteindre  $100^\circ\text{C}$ .

**QB.13** Dessiner, sur le **document réponse 3**, le trajet des conducteurs en cuivre de l'enroulement 1. On donne la vue panoramique où les encoches sont représentées, chacune, par un trait interrompu court. De plus, on rappelle qu'un enroulement est constitué de quatre conducteurs en parallèle qui seront représentés par un seul trait.

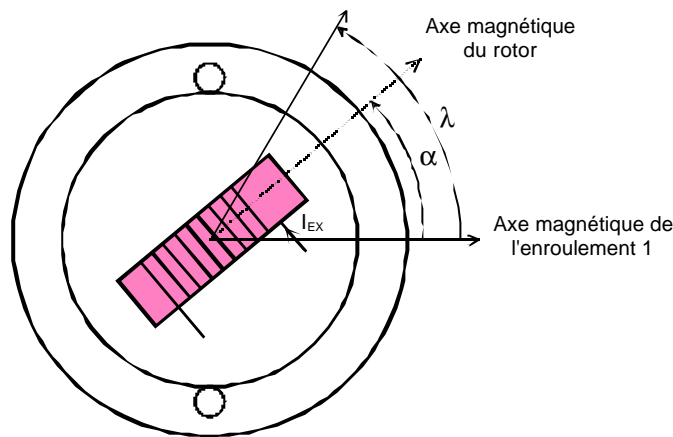
**QB.14** Donner l'expression de la longueur  $L_{CU} = f(D_R, L_M)$  de cuivre utilisé pour un enroulement puis faire l'application numérique. Les têtes de bobines suivent une trajectoire circulaire.

**QB.15** Donner l'expression de la résistance  $R = f(L_{CU}, S_{CU}, \rho_{20}, a, \theta^\circ)$  d'un enroulement.

On donne :  $\rho_{20} = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega m$  : Résistivité du cuivre à  $20^\circ C$  ;  
 $a = 4 \cdot 10^{-3}$  : Coefficient de température du cuivre ;  
 $\theta^\circ$  : Température en degré Celsius ;  
 $S_{CU}$  : Section d'un conducteur de cuivre en  $m^2$ .

**QB.16** Calculer la valeur numérique de  $R$  pour  $100^\circ C$ .

Pour établir le schéma équivalent monphasé, il faut connaître la tension induite dans un enroulement par le rotor. Le constructeur de la machine nous dit que l'induction produite dans l'entrefer par un pôle magnétique rotorique et pour le courant d'excitation nominal est d'environ 1 Tesla. On suppose que cette induction est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer ce qui permet d'écrire que  $b_{EX} = B_{EX} \cos(\lambda - \alpha)$  avec  $B_{EX} = 1$  Tesla .



Le rotor tourne à la vitesse de  $\omega$  rad/s. On notera que  $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$ .

Le flux élémentaire  $d\Phi_{EX}$  traversant la surface  $dS$  et créé par l'enroulement inducteur s'écrit  $d\Phi_{EX} = b_{EX}(\lambda) \frac{D_R}{2} L_M d\lambda$ .

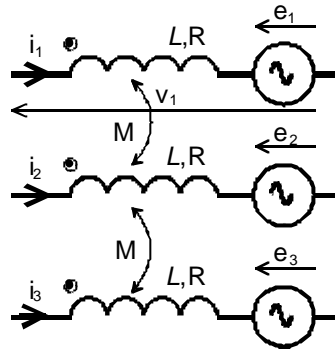
**QB.17** Intégrer le flux élémentaire  $d\Phi_{EX}$  sur toute la surface portée par l'enroulement 1 et donner l'expression de  $\Phi_{EX} = f(B_{EX}, D_R, L_M, \alpha)$ .

**QB.18** La tension induite  $e_1$  par le flux  $\Phi_{EX}$  s'écrit  $e_1 = -\frac{d\Phi_{EX}}{dt}$ . Donner l'expression de  $e_1 = f(\omega, B_{EX}, D_R, L_M, t)$ . En déduire l'expression de la valeur efficace  $E$  de  $e_1$ .

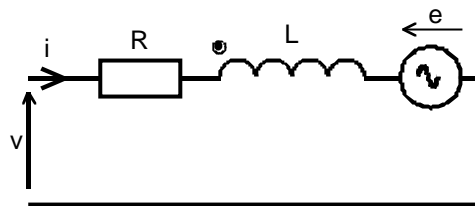
**QB.19** Donner la relation liant  $w$  à la vitesse de rotation réelle du rotor  $W$  en rad/s.

**QB.20** Calculer la valeur numérique de  $E$  lorsque le rotor de la machine tourne à 1 000 tr/min.

Le modèle électrique de la machine se représente de la manière suivante :



De là on obtient le schéma équivalent monophasé représenté ci-dessous :



$L$  est appelé inductance cyclique.

**QB.21** Donner l'expression de  $L = f(L, M)$ . Calculer la valeur numérique de  $L$ .

### Modélisation de la transmission poulie-courroie

**Hypothèse :**

- on néglige l'inertie de l'ensemble constitué des poulies et de la courroie

**QB.22** Expliciter la raison et les conséquences de cette hypothèse de travail.

**QB.23** Calculer le rapport de réduction  $r$  de l'ensemble poulie-courroie.

### Exploitation du simulateur

#### Prédétermination des grandeurs attendues en mode démarreur

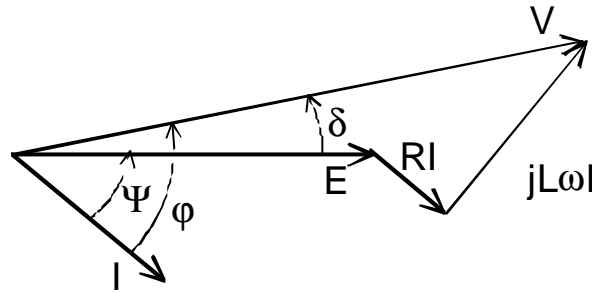
**QB.24** Indiquer les grandeurs mécaniques à paramétrer dans le modèle du moteur thermique dans le cas d'un démarrage à froid puis à chaud.

Dans ce qui suit on utilisera le schéma équivalent monophasé de la machine en convention récepteur.

**Hypothèses :**

- La machine fonctionne en régime sinusoïdal ;
- On ne tient pas compte de la saturation ;
- $R = 20 \text{ m}\Omega$  ;
- $L = 50 \text{ }\mu\text{H}$  ;
- Le courant d'excitation est égal à sa valeur nominale ;
- $E = k_{EX} I_{EX} \Omega$  :  $E$  est égal à 10 V efficace pour 1 000 tr/mn pour le courant d'excitation nominal.

Le diagramme vectoriel des tensions est le suivant :



**QB.25** Énoncer les simplifications apportées par les 2 premières hypothèses de travail.

**QB.26** Déterminer l'expression de la puissance absorbée  $P_A = f(V, I, \varphi)$  et de la puissance réactive  $Q_A = f(V, I, \varphi)$ .

**QB.27** Déterminer l'expression de la puissance électromagnétique  $P_{EM}$  et des pertes Joules au stator  $P_{JS}$ .

**QB.28** Déterminer l'expression de la puissance active  $P_A = f(E, I, R, \Psi)$ .

**QB.29** Déterminer l'expression du couple électromagnétique  $C_{EM} = f(k_{EX}, I_{EX}, I, \Psi)$ .

En fonctionnement démarreur, la commande de l'onduleur impose  $V$  en phase avec  $E$ .

On suppose que  $V$  est constant quelle que soit la vitesse et vaut 6 V.

**QB.30** Représenter l'allure du diagramme de Fresnel des tensions pour le fonctionnement démarreur.

**QB.31** Déterminer l'expression de la valeur efficace du courant  $I = f(V, k_{EX}, I_{EX}, \Omega, R, L, p)$

**QB.32** Déterminer l'expression du couple électromagnétique  $C_{EM} = f(\Omega)$  et la mettre sous la forme  $C_{EM} = \frac{K_1 + K_2 \Omega}{K_3 + K_4 \Omega^2}$ . Donner les expressions littérales et numériques de  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$ . On

rappelle que  $\cos^2(\Psi) = \frac{1}{1 + \tan^2(\Psi)}$

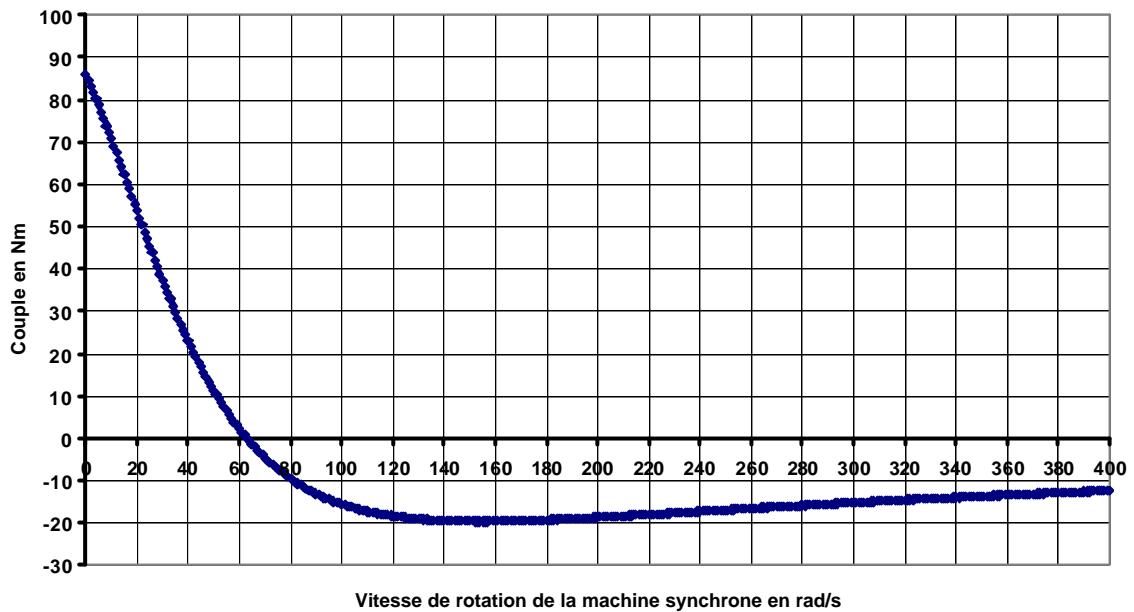
La courbe de la caractéristique du couple  $C_{EM} = f(\Omega)$  est donnée ci-dessous. Elle servira pour calculer l'ordre de grandeur du temps de démarrage.

L'expression de la valeur efficace du courant  $I$  s'écrit :

$$I = \frac{6 - 9,55 \cdot 10^{-2} \Omega}{\sqrt{4 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-8} \Omega^2}}$$

**QB.33** Calculer la valeur du couple accélérateur  $C_{AM}$  sur l'arbre du moteur au moment du décollage pour un démarrage à froid et pour un démarrage à chaud. Le décollage est-il possible dans les deux cas ?

**Couple électromagnétique de la machine synchrone en fonction de la vitesse**



**QB.34** Écrire les équations fondamentales de la dynamique appliquées à l'arbre du moteur pour un démarrage à froid et un démarrage à chaud. On fera l'approximation qui s'impose pour la caractéristique du couple électromagnétique.

**QB.35** Résoudre ces équations et donner les expressions de  $\Omega = f(t)$ . En déduire les temps  $t_b$  pour atteindre le régime établi, à froid et à chaud.

**QB.36** Calculer les vitesses de rotation,  $W$  du moteur électrique et  $W_v$  du moteur thermique, en régime établi.

**QB.37** Calculer les valeurs efficaces du courant  $I$  absorbé par le moteur au décollage et en régime établi pour un démarrage à froid et à chaud.

**QB.38** Calculer la valeur du déphasage  $j$  de courant  $I$  par rapport à la tension  $V$  en régime établi pour un démarrage à froid et à chaud.

**QB.39** Calculer la puissance absorbée  $P_A$  par la machine synchrone en régime établi pour un démarrage à froid et à chaud.

**QB.40** Calculer la puissance utile  $P_U$  de la machine synchrone en régime établi pour un démarrage à froid et à chaud.

**QB.41** Calculer le rendement de la machine synchrone en régime établi pour un démarrage à froid et à chaud.



## **Prédétermination des grandeurs attendues en mode chargeur de batterie**

**QB.42** Indiquer les grandeurs mécaniques à paramétrer dans le modèle du moteur thermique.

Une fois le moteur thermique démarré c'est lui qui entraîne la machine synchrone. Elle fonctionne en alternateur et permet la charge de la batterie.

La machine synchrone est connectée à un pont PD3 à diodes qui alimente directement la batterie.

La machine synchrone se comporte comme une source de courant vis à vis du pont à diodes et la batterie comme une source de tension : c'est elle qui impose la tension aux bornes de la machine.

La machine fonctionne à facteur de puissance unitaire avec la tension  $V$  supposée constante et égale à 6 V efficaces.

L'étude sera limitée aux grandeurs fondamentales.

**QB.43** Représenter l'allure du diagramme de Fresnel des tensions pour le mode alternateur.

**QB. 44** Déterminer l'expression du courant d'excitation  $I_{ex}$ . notamment en fonction  $I$  et de  $O$ .

**QB.45** Calculer la valeur du courant d'excitation  $I_{ex}$  (ce courant ne tient pas compte de la saturation) pour avoir  $I = 120$  A lorsque la machine tourne à 6 000 tr/min.

**QB.46** Calculer la puissance mécanique  $P_M$  sur l'arbre de l'alternateur puis calculer le rendement  $\eta$  de celui-ci.

## PARTIE C

### Étude du convertisseur statique et de sa commande

#### Préparation de l'installation d'un poste de travaux pratiques dans un laboratoire d'étude de systèmes

Il s'agit ici d'intégrer l'alternateur-démarrateur comme nouveau TP dans un laboratoire d'étude des systèmes déjà existant (voir **figure 6**). L'ensemble constitué du moteur thermique, de l'alternateur-démarrateur et de la batterie a été placé dans un local indépendant et adapté aux contraintes de sécurité liées à l'utilisation de batteries et d'essence. Le poste de travail est constitué d'un panneau équipé de points de mesures reliés aux 3 phases et au neutre de la machine synchrone ainsi qu'à la sortie de l'onduleur.

L'objectif général du TP est orienté vers :

- une analyse des formes d'ondes et des grandeurs associées aux tensions et aux courants présents dans le dispositif ;
- Une étude des contraintes thermiques imposées aux interrupteurs électroniques.

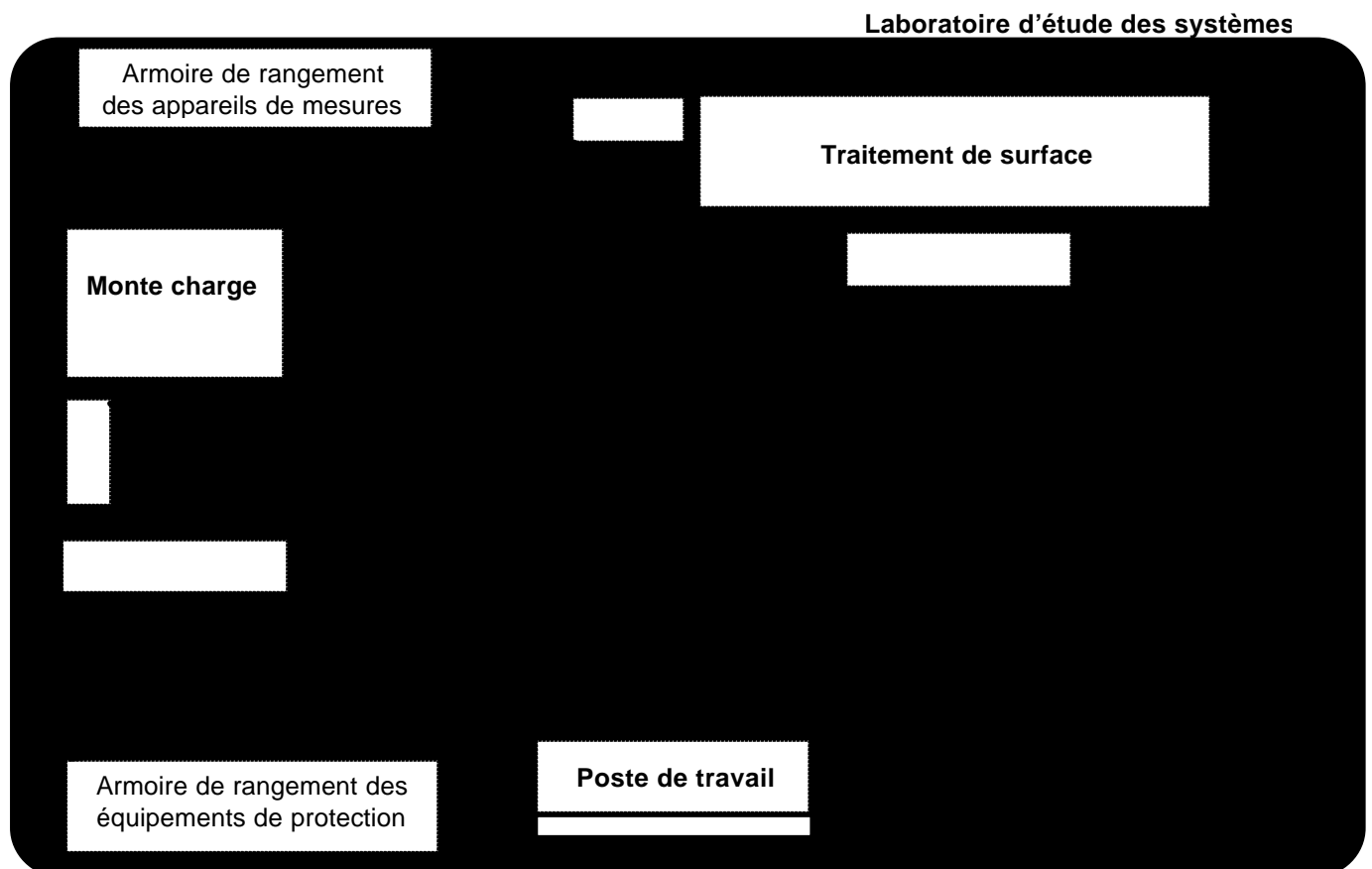


Figure 6

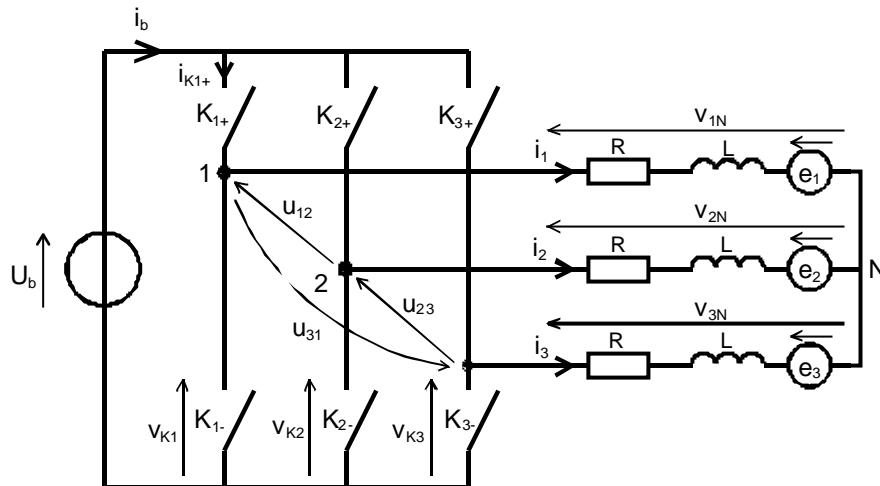
L'étude proposée vise à établir, d'une part, les caractéristiques minimales des appareils de mesure pour réaliser le TP et, d'autre part, à prévoir les conditions du déroulement de la séquence vis à vis des règles de sécurité électrique associées au TP lui-même et à son environnement.

## Etude du convertisseur statique

Le convertisseur statique, connecté entre la batterie et la machine synchrone, fonctionne en onduleur de tension pleine onde en mode démarreur et en redresseur en mode recharge de la batterie.

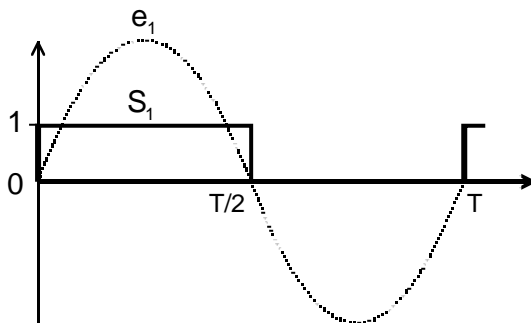
### Fonctionnement onduleur pleine onde du mode démarreur

Le schéma de principe de l'onduleur est donné ci-dessous.



L'onduleur est constitué de trois bras comportant chacun les deux interrupteurs  $K_{i+}$  et  $K_{i-}$  ( $i = 1, 2, 3$ ). La commande des deux interrupteurs d'un bras d'onduleur est complémentaire : lorsque  $K_{i+}$  est fermé alors  $K_{i-}$  est ouvert et réciproquement.

Les interrupteurs  $K_{1+}$  et  $K_{1-}$  sont commandés par un capteur à effet Hall, situé en bout d'arbre, dont le signal de sortie est en phase avec la tension induite  $e_1$  comme le montre le croquis ci-contre.



Lorsque  $S_1 = 1$  alors  $K_{1+}$  est fermé et  $K_{1-}$  est ouvert et réciproquement lorsque  $S_1 = 0$ .

$K_{2+}$  et  $K_{2-}$  sont commandés par  $S_2$ , en phase avec  $e_2$ , de la même manière que  $K_{1+}$  et  $K_{1-}$ .

Il en est de même pour  $K_{3+}$  et  $K_{3-}$ .

Les trois tensions  $e_1$ ,  $e_2$  et  $e_3$  forment un système triphasé équilibré direct.

### **Hypothèses :**

- On considère que les interrupteurs sont parfaits ;
- $T$  est la période en secondes des grandeurs électriques ;
- $U_b = 13 \text{ V}$ .  $U_b$  est la tension à vide de la batterie dont on néglige dans un premier temps la résistance  $R_b$  ;
- Les valeurs numériques des éléments de la machine synchrone sont celles données dans la **partie B**.

**QC.1** Exprimer  $u_{12}$ ,  $u_{23}$  et  $u_{31}$  en fonction de  $v_{K1}$ ,  $v_{K2}$  et  $v_{K3}$ .

**QC.2** Exprimer  $V_{1N}$ ,  $V_{2N}$  et  $V_{3N}$  en fonction de  $U_{12}$ ,  $U_{23}$  et  $U_{31}$ . On supposera que la machine synchrone se comporte comme une charge triphasée, linéaire et équilibrée.

**QC.3** Représenter sur le **document réponse 3** les formes d'ondes de  $v_{K1}$ ,  $v_{K2}$ ,  $v_{K3}$ ,  $u_{12}$ ,  $u_{23}$ ,  $u_{31}$ .

**QC.4** Représenter sur le **document réponse 4** la forme d'onde de  $v_{1N}$ .

**QC.5** Calculer l'expression littérale de la valeur efficace  $V_{1N}$  de  $v_{1N}$  puis donner la valeur numérique.

**QC.6** Calculer l'expression littérale de la valeur efficace  $V_{1Nh1}$  du fondamental de  $v_{1N}$  puis donner la valeur numérique.

Au moment où le moteur synchrone démarre pour entraîner le moteur thermique la vitesse de rotation est très faible. On a alors  $\frac{L}{R}$  très petit devant  $T$  la période des grandeurs électriques. De plus on peut négliger les tensions  $e_1$ ,  $e_2$  et  $e_3$ .

**QC.7** Représenter sur le **document réponse 4** pour des très faibles vitesses du moteur synchrone l'allure des courants  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  en mettant les valeurs remarquables.

**QC.8** Représenter sur le **document réponse 5** l'allure du courant  $i_b$  dans la batterie. Déterminer l'expression de  $i_b = f(R, U_b)$  puis faire l'application numérique.

Le courant lors du démarrage est très élevé. Dans cette phase de fonctionnement la résistance de la batterie  $R_b$  ne peut pas être négligée.

**QC.9** Déterminer l'expression du courant dans la batterie  $i_b = f(U_b, R, R_b)$  puis donner la valeur numérique.

**QC. 10** Calculer la valeur du couple électromagnétique  $C_{EM}$  du moteur synchrone pour la phase de démarrage à vitesse très lente avec et sans résistance  $R_b$ . En déduire la chute  $\Delta C_{EM}$  liée à la résistance  $R_b$ . L'expression du couple électromagnétique est  $C_{EM} = 0,29 \cdot I_1$ .  $I_1$  est la valeur efficace du courant  $i_1$ .

Pour des vitesses plus élevées, on adoptera un profil sinusoïdal pour les courants de la machine synchrone. On néglige de nouveau  $R_b$ .

**QC. 11** Donner l'expression temporelle du courant  $i_1$  représentée sur le **document réponse 5** en fonction de  $I_{MAX}$ ,  $Y$ ,  $\omega$  et du temps  $t$ .

**QC.12** Quelle est la valeur du déphasage entre le fondamental de  $v_{1N}$  et  $e_1$  ?

**QC.13** Placer sur le **document réponse 5** les deux sinusoïdes représentant les courants  $i_2$  et  $i_3$ .

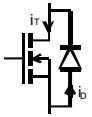
**QC.14** Représenter sur le **document réponse 5** les intervalles de conduction des 6 interrupteurs de l'onduleur.

**QC.15** Exprimer le courant  $i_b$  en fonction de  $i_1$ ,  $i_2$  ou  $i_3$  pour chaque phase de fonctionnement de l'onduleur.

**QC.16** Représenter sur le **document réponse 5** l'allure du courant  $i_b$ .

**QC.17** Déterminer l'expression de la valeur moyenne  $\langle i_b \rangle$  de  $i_b$  en fonction de  $I_{MAX}$  et de  $Y$ .

**QC.18** Représenter sur le **document réponse 6** l'allure du courant  $i_{K1+}$ .



Chaque interrupteur est constitué d'un transistor MOS en parallèle avec une diode. L'orientation prise pour les courants dans le transistor et la diode est donnée sur la figure ci-contre.

**QC.19** Représenter sur le **document réponse 6** l'allure des courants  $i_{D1+}$  et  $I_{T1+}$  de la diode et du transistor de l'interrupteur  $K_{1+}$ .

**QC.20** Exprimer la puissance moyenne  $P_{CMOS}$  perdue par conduction dans un transistor MOS en fonction de  $y$  et  $I_{MAX}$ .

La chute de tension directe aux bornes d'un MOS s'écrit :  $v_{MOS} = R_{DSON} \cdot i_T$ .  $R_{DSON}$  est la résistance du MOS à l'état passant.

**QC.21** Exprimer la puissance moyenne  $P_{CDIODE}$  perdue par conduction dans une diode en fonction de  $y$  et  $I_{MAX}$ .

La chute de tension directe aux bornes d'une diode s'écrit :  $v_d = V_0$

$V_0$  : tension de seuil ;

La chute de tension liée à la résistance dynamique  $r_d$  est négligée.

**QC.22** Déterminer les instants de commutation du transistor  $T_{1+}$  de l'interrupteur  $K_{1+}$ . Donner l'expression du courant commuté à ces instants.

**QC.23** Déterminer l'expression de la puissance moyenne  $P_{COM}$  perdue par commutation dans le transistor en fonction notamment de  $U_b$ ,  $I_{MAX}$ ,  $y$  et des temps de commutation.

Pendant la commutation l'évolution du courant dans le transistor est linéaire.

$t_{ON}$  : temps de fermeture du transistor ;

$t_{OFF}$  : temps d'ouverture du transistor.

Un point de fonctionnement pour une phase de démarrage à chaud donne :

Vitesse du moteur synchrone :  $N = 400 \text{ tr / min}$  ;

Courant efficace dans une phase de la machine :  $I_1 = 110 \text{ A}$  ;

Facteur de puissance de la machine synchrone :  $\cos(\varphi) = 0,9$  (arrière) ;

Tension de batterie :  $U_b = 12 \text{ Volts}$ .

Les calculs qui suivent concernent ce point de fonctionnement.

**QC.24** Relever sur le document technique du module SK300MB075, donné à l'annexe 1 :

les temps d'ouverture  $t_{ON}$  et de fermeture  $t_{OFF}$  du transistor ;

La valeur de  $R_{DS00N}$  typique ;

La valeur approchée de la tension de seuil  $V_0$  de la diode.

**QC.25** Calculer la puissance totale  $P_T$  dissipée dans un transistor MOS.

**QC.26** Calculer la puissance totale  $P_{MODULE}$  dissipée dans un module SKMB075.

**QC.27** Calculer la puissance dissipée  $P_{CONV}$  dans le convertisseur statique.

**QC.28** Calculer le rendement  $\eta_{CONV}$  du convertisseur statique.

Les pertes dans le convertisseur provoquent l'échauffement des composants de puissance. Il est nécessaire de placer les trois modules SKMB075 sur un radiateur pour éviter que la température des jonctions dépasse la température maximum tolérable.

**QC.29** Relever sur le document technique du module SK300MB0 75 donné à l'annexe 1 :

La valeur de la résistance thermique jonction-radiateur, du module, notée  $R_{TH(J-S)}$  ;

La valeur de la température maximale  $q_{JMAX}$  que peut supporter une jonction.

**QC.30** Établir le schéma thermique équivalent pour les valeurs moyennes et pour le régime permanent des trois modules SKMB075 fixés sur le radiateur commun.

**QC.31** Calculer la résistance thermique  $R_{THR}$ , en  $^{\circ}C/W$ , du radiateur. On prendra une marge de sécurité de 20%. La température ambiante maximale est de  $\theta_A = 100^{\circ}C$ .

**QC.32** Calculer la température du radiateur  $q_C$  et la température des jonctions  $q_J$  pour une température ambiante de  $100^{\circ}C$ .

**QC.33** Décrire les principales fonctions des circuits de commande rapprochés des transistors MOS du convertisseur.

### **Fonctionnement redresseur du mode recharge de batterie**

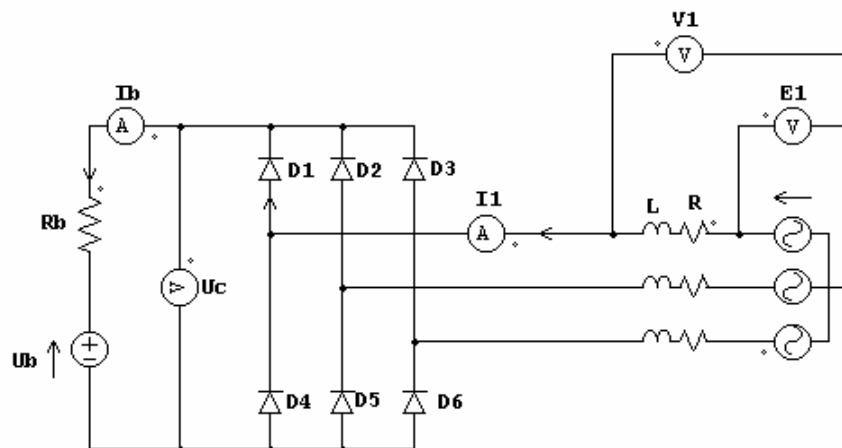
En mode recharge de batterie, la machine synchrone fonctionne en alternateur. Le convertisseur statique fonctionne en redresseur. La commande des transistors a été inhibée, seules les diodes conduisent le courant.

Une simulation du fonctionnement redresseur a été réalisée avec un logiciel spécialisé pour une vitesse de rotation de la machine synchrone de 6 000 tr/min et un courant d'excitation de 10 A.

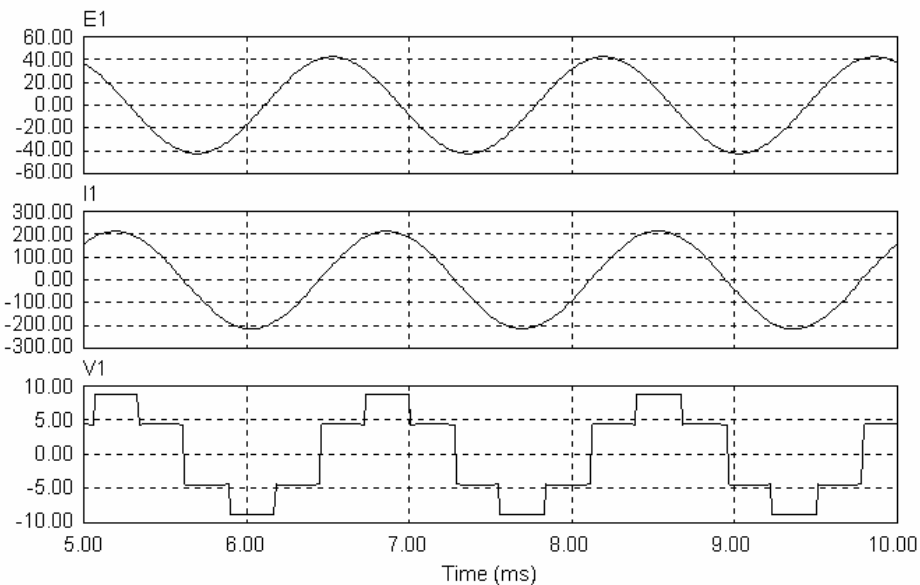
Côté batterie la tension à vide est de 12 V et la résistance interne de 0,006  $\Omega$

Le schéma de simulation est donné ci-dessous.

Les valeurs numériques des éléments de la machine synchrone sont celles données dans la partie B.



Les formes d'ondes de  $E_1$ ,  $I_1$  et  $V_1$  issues de la simulation sont données ci-dessous.



**QC.34** Justifier les valeurs de la fréquence et de l'amplitude de la tension  $E_1$ .

**QC.35** Justifier la forme d'onde sinusoïdale du courant  $I_1$ .

**QC.36** Vis à vis du redresseur, la machine synchrone se comporte-t-elle comme une source de tension ou comme une source de courant ? Justifier votre réponse.

**QC.37** La règle d'interconnexion des sources entre la batterie et la machine synchrone est-elle respectée ?

**QC.38** Représenter sur le document **réponse 7** les intervalles de conduction des diodes ainsi que le courant dans la diode  $D_1$  noté  $i_{D1}$ .

**QC.39** Calculer la puissance moyenne dissipée dans un module SK300MB075.

**QC.40** Les trois modules SK300MB sont montés sur un radiateur de résistance thermique  $0,3^\circ\text{C/W}$ . Calculer la température des jonctions  $\theta_j$  pour une température ambiante de  $100^\circ\text{C}$ . Le radiateur a-t-il été convenablement choisi ? Le cas échéant donner une valeur de résistance thermique qui convient.

**QC.41** Calculer la valeur moyenne  $\langle i_b \rangle$  du courant dans la batterie.

**QC.42** Proposer un schéma de régulation permettant de contrôler le courant moyen de charge de la batterie. Donner la nature et l'emplacement des capteurs à utiliser. (le calcul des correcteurs n'est pas à établir).

### **Choix des appareils de mesure**

Le choix des appareils de mesure dépend de ce qu'on souhaite obtenir comme informations mais il doivent aussi être conformes à la réglementation en vigueur vis à vis des aspects sécuritaires de leur utilisation. En ce qui concerne le mesurage lui-même, il faut en particulier prendre en compte les éléments suivants :

- la nature de la grandeur à mesurer (courant, tension, ...) ;
- le type d'information attendu (valeur moyenne, valeur efficace, valeur max, ...)
- la fréquence du signal ;
- la précision souhaitée.

Par ailleurs, sur le plan sécuritaire, il faut veiller à choisir des appareils conformes à la norme européenne CEI 1010 qui précise en particulier leur catégorie de surtension en fonction des caractéristiques du lieu de leur utilisation.

Enfin, le branchement des appareils fera l'objet d'une attention particulière en fonction de leur classe d'isolation.

**QC.43** *Rappeler la définition de la valeur efficace vraie (RMS) et la définition de la valeur moyenne d'une tension. Indiquer les différents moyens de les mesurer dans le cas des cas appareils à cadre mobile et dans le cas d'appareils numériques.*

**QC.44** *Rappeler ce que sous-tend la notion de catégorie de surtension au sens de la norme CEI 1010. Quelle catégorie de surtension sera à prévoir pour ce TP sachant que les appareils de mesures sont communs aux autres TP.*

**QC.45** *Rappeler ce que sous-tend la notion de classe d'isolation. Indiquer le type de précaution à prendre dans le cas de mesures multivoies avec des oscilloscopes de classe I.*

### **Mesures sur l'alternateur**

**QC.46** *On souhaite obtenir, en concordance des temps le chronogramme des tensions  $v_{1N}$  et  $u_{12}$ . Indiquer précisément les caractéristiques minimales et le réglage du matériel de mesure à mettre en place sur la table de TP ainsi que le schéma de câblage de l'ensemble dans le cas d'appareils de classe I.*

**QC.47** *Dans le cas du fonctionnement en mode recharge de batterie (voir simulation), on souhaite mesurer la valeur efficace de la tension  $v_{1N}$ . Indiquer précisément les caractéristiques minimales (notamment en ce qui concerne la bande passante) et les réglages du matériel de mesure à mettre en place sur la table de TP.*

**QC.48** *Toujours dans le cas du fonctionnement en mode recharge de batterie, on souhaite obtenir, en concordance des temps le chronogramme des courants  $i_1$  et  $i_b$ . Indiquer précisément les caractéristiques minimales et les réglages du matériel de mesure à mettre en place sur la table de TP ainsi que le schéma de câblage de l'ensemble dans le cas d'appareils de classe I.*

**QC.49** *On souhaite examiner les formes d'ondes associées aux interrupteurs électroniques pendant les commutations. Pour cela, on veut observer l'évolution du courant commuté dans l'interrupteur  $K_{1+}$  ainsi que celle de la tension à ses bornes en mode démarreur. Indiquer précisément les caractéristiques minimales et le réglage du matériel de mesure à mettre en place sur la table de TP ainsi que le mode opératoire compte tenu de l'accessibilité des points de mesure.*

### **Respect des conditions à remplir vis à vis des risques électriques**

**QC.50** *Indiquer les caractéristiques minimales des cordons à prévoir pour réaliser les câblages en fils volants sur la platine de ce TP équipée de douille type « double puit ».*

**QC.51** *Doit-on prévoir, en justifiant la réponse, des Equipements de Protection Individuelle, des Equipements de Sécurité Individuel et Collectif pour la réalisation de ce TP ?*

### **Détermination expérimentale de la température de jonction en mode alternateur**

On se propose d'évaluer la température d'une jonction à partir, notamment d'une mesure de la température du radiateur.

**QC.52** *Proposer une méthode expérimentale permettant de mesurer la température du radiateur.*

**QC.53** *Proposer un mode opératoire en précisant notamment toutes les autres mesures à effectuer pour déterminer la valeur de la température de jonction  $\theta_J$  d'une diode.*

**QC.54** *À partir des mesures précédentes expliciter les différents calculs à effectuer pour obtenir  $\theta_J$ .*