

SESSION 2009

**CONCOURS EXTERNE
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS**

Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE

COMPOSITION D'ÉLECTROTECHNIQUE

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

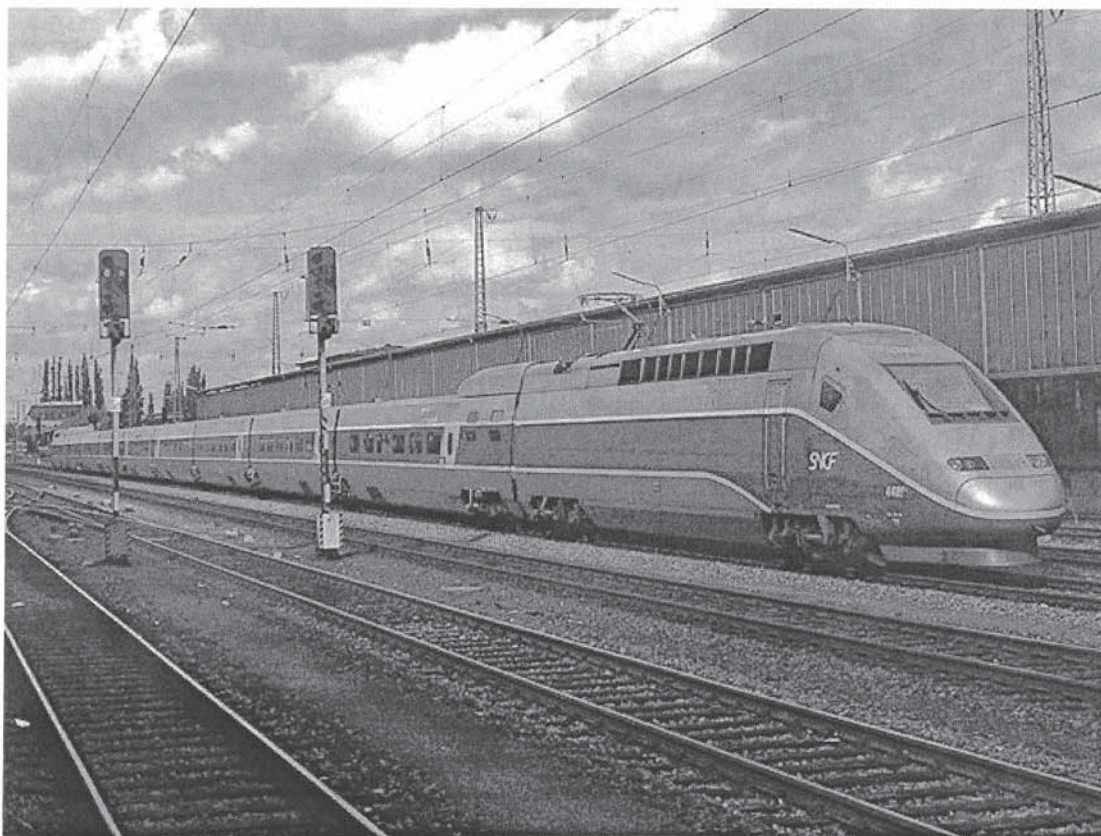
NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

A. Présentation du TGV POS

En Juin 2007, la SNCF assurait la mise en service de la L.G.V. Est, offrant au départ de Paris de nouvelles relations à grande vitesse vers Strasbourg, Metz, Munich, Francfort, Zurich et Luxembourg. Avec une vitesse commerciale de 320km/h sur le parcours français et de 300km/h sur les L.G.V. allemandes, le TGV relie Paris à Francfort en 3h45 et Paris à Munich en 6h, procurant un gain de temps très appréciable. Pour mettre en œuvre ces nouveaux flux de trafic et satisfaire ses exigences commerciales, la SNCF s'est équipée de 15 rames internationales appelées TGV POS (**P**aris **O**st **F**rankreich **S**üd **D**eutschland).

La motorisation de ces nouvelles rames TGV, conçues par l'industriel ALSTOM, répond aux contraintes suivantes :

- La pénétration sur les réseaux allemand et suisse nécessite des rames tri tension adaptées aux tensions 25kV-50Hz monophasée et 1500V continu du réseau français, et, d'autre part, à la tension spécifique des réseaux allemand et suisse : le 15kV-16,7Hz.
- La limitation des frais d'étude et de développement conduisant à une composition similaire à celle d'un TGV classique : Motrice + 8 Remorques + Motrice, et à une structure de la motrice dérivée des développements déjà réalisés sur des projets en cours de construction;
- La limitation des risques en matière d'innovation en vue d'obtenir une « homologation » sur les réseaux allemands, suisses et luxembourgeois ;
- La prise en compte des nouvelles réglementations nationales et internationales relatives à l'interopérabilité (S.T.I. : Spécifications Techniques d'Interopérabilité), à la certification « CE » et au respect de l'environnement.



Architecture de la motorisation du TGV POS

En collaboration avec l'opérateur ferroviaire, l'entreprise ALSTOM a conçu et réalisé une nouvelle chaîne de traction modulaire à motorisation asynchrone. Elle répond aux exigences des S.T.I. et à la réglementation européenne en termes,

- de masse,
- de performance dynamique,
- de facteur de puissance,
- d'efficacité énergétique,
- d'accès aux infrastructures des réseaux français, allemand, suisse et luxembourgeois ;

et à la couplabilité avec les TGV en service sur le réseau français.

Le document **D-1** présente de manière synthétique l'architecture des équipements électriques d'une rame TGV POS. Chaque motrice est constituée de 4 ensembles « essieux moteurs » regroupés au sein de deux bloc moteurs, un par bogie. Chacun des blocs moteurs dispose de ses auxiliaires. Les circuits de chauffage, de climatisation, d'éclairage et de restauration ainsi que les circuits de charge des batteries et de fourniture d'air comprimé de la rame sont alimentés par les « bloc commun ».

L'étude proposée porte sur la motorisation d'une rame POS.

Le questionnement est structuré en quatre parties indépendantes :

A l'intérieur de chaque partie, de nombreuses questions sont également indépendantes. Le candidat est donc invité à lire rapidement et entièrement l'énoncé avant de commencer à composer afin de bien répartir le temps de composition entre les différentes parties. Une rédaction soignée, une écriture lisible et des résultats encadrés seront appréciés par les correcteurs.

Si au cours de l'épreuve, le candidat détecte ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale par écrit dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant précisément les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

B1 : Puissance mécanique nécessaire à la marche du train

Dimensionnement de la motorisation à partir des grandeurs mécaniques caractérisant les performances du train.

B2 : Etude de l'équipement électrique d'une motrice

Analyse du schéma de l'alimentation électrique d'un moteur de traction et étude des grandeurs électriques et mécaniques à partir du modèle équivalent.

B3 : Etude des Ponts Monophasés à Commutation Forcée

Analyse du fonctionnement d'un PMCF et dimensionnement des éléments de filtrage associés. Etude de l'entrelacement des PMCF et du spectre fréquentiel du courant absorbé sur la caténaire.

B4 : Etude thermique des modules PALIX

Calcul des pertes dans les semiconducteurs et étude thermique des modules PALIX utilisés pour la réalisation des convertisseurs de la chaîne de traction (PMCF et Onduleur de Traction).

B2. Etude de l'équipement électrique d'une motrice

Chaque motrice comporte 4 moteurs de type asynchrone, rotor à cage.

Le document **D-3** représente le schéma de la chaîne d'alimentation électrique d'un moteur, comprenant les équipements suivants :

- 2 pantographes PT1 et PT2, de technologies différentes, pour le captage du courant sur la caténaire. PT1 est utilisé sur le réseau 25 kV monophasé et PT2 sur le réseau 15 kV monophasé ainsi que sur le réseau 1500 V continu ;
- le transformateur TR composé :
 - d'un enroulement primaire qui peut être alimenté soit en 25 kV - 50 Hz (réseau français) ou en 15 kV - 16,7 Hz (réseau allemand) ;
 - de 4 enroulements secondaires, avec prise intermédiaire, destinés à alimenter les convertisseurs de traction (1 par moteur) ;
 - de 2 enroulements secondaires destinés à alimenter les équipements auxiliaires de la rame ;
- l'inductance de filtre d'entrée L1 pour le fonctionnement sous caténaire 1500 V continu ;
- le convertisseur PMCF (Pont Monophasé à Commutation Forcée) : redresseur 4 quadrants autorisant le fonctionnement en traction et en freinage par récupération. La commande MLI du PMCF permet de réguler la tension U_c sur le bus continu et de prélever, sur le réseau alternatif, un courant sinusoïdal et en phase avec la tension ;
- le filtre F:2f destiné à limiter l'ondulation de tension sur le bus continu engendrée par le redressement en dérivant la composante 2f du courant redressé ; il est constitué par le condensateur C2 et les inductances L2, L3 ; en alimentation 25 kV - 50 Hz, le filtre est accordé à 100 Hz et, en alimentation 15 kV - 16,7 Hz, le filtre est accordé à 33 Hz.
- le convertisseur OND : onduleur triphasé à commande MLI qui génère les courants d'alimentation sinusoïdaux du moteur asynchrone et permet, par sa commande, le contrôle du flux et du couple.
- le hacheur HRH et la résistance de puissance RH, permettant un freinage rhéostatique utilisé dans les situations où le freinage par récupération n'est pas possible.
- l'appareillage H.T. comprenant :
 - les disjoncteurs Q1 et Q2 ;
 - les contacteurs KM1 à KM4.

Q2.1 : Sur le document réponse **DR2**, préciser l'état des disjoncteurs et des contacteurs, quand la rame est sous caténaire :

- 25 kV / 50 Hz ;
- 15 KV / 16,7 Hz ;
- 1500 V continu.

Q2.2 : En fonction des caractéristiques électriques de la chaîne de motorisation, sous réseau 25 kV, (données dans le document réponse **DR2**), déterminer les valeurs numériques des grandeurs :

- I_m : valeur efficace du courant d'alimentation d'un moteur, considéré sinusoïdal ;
- $\langle I_{DC} \rangle$: valeur moyenne du courant sur le bus continu,
- I_e : valeur efficace du courant au secondaire du transformateur, supposé sinusoïdal et en phase avec V_e .

Compléter le tableau du document réponse **DR2**, par les valeurs des courants.

Q2.3 : On donne $C2 = 5 \text{ mF}$. Calculer les valeurs de **L2** et **L3**.

Etude d'un moteur de traction à partir de son schéma équivalent

Le schéma équivalent de la machine asynchrone triphasée à rotor en court-circuit, *usuellement utilisé*, traduit, pour une phase, les équations électriques et mécaniques en régime permanent. On l'établit en exploitant l'analogie avec un transformateur, pour laquelle le stator correspond au primaire et le rotor au secondaire en court-circuit. Comme pour un transformateur, l'impédance du secondaire (rotor) peut être « ramenée » au primaire (stator).

On donne, figure 2.1, le schéma équivalent à partir duquel on mènera l'étude.

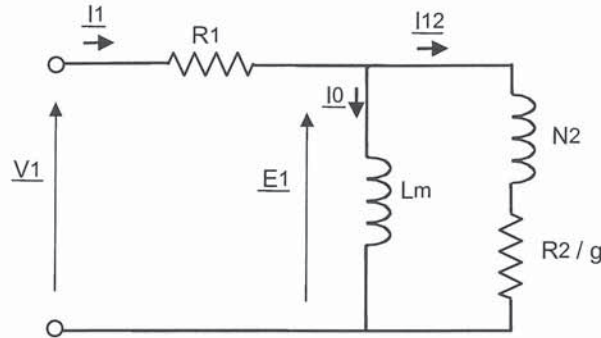


Fig 2.1 : Schéma équivalent simplifié étoile d'une machine asynchrone, vu du stator

Grandeurs électriques associées au schéma équivalent :

R_1 : résistance d'une phase du stator ;

R_2 : résistance d'une phase du rotor, ramenée au stator ;

g : glissement du rotor par rapport au champ tournant ;

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \text{ avec : } \Omega_s : \text{vitesse angulaire de synchronisme, } \Omega : \text{vitesse angulaire du rotor ;}$$

R_2 / g : résistance fictive dans laquelle est consommée la totalité de la puissance transmise au rotor (puissance mécanique, pertes mécaniques et pertes Joule rotoriques), pour une phase

L_m : inductance magnétisante ;

N_2 : inductance de fuites globalisées, ramenée au stator ;

$\underline{V}_1$: tension, phase-neutre, d'alimentation d'une phase du stator ;

$\underline{E}_1$: f.e.m. statorique ;

$\underline{I}_1$: courant absorbé dans une phase du stator ;

$\underline{I}_{12}$: courant dans une phase rotorique, ramené au stator ;

$\underline{I}_0$: courant magnétisant.

La pulsation des tensions et des courants est ω_s , imposée par la fréquence f de la tension $\underline{V}_1$.

La référence de phase sera prise sur la tension $\underline{V}_1$.

On considère le circuit magnétique non saturé.

On donne, figure 2.2, le diagramme représentatif du bilan de puissance dans la machine et conforme au schéma équivalent précédent.

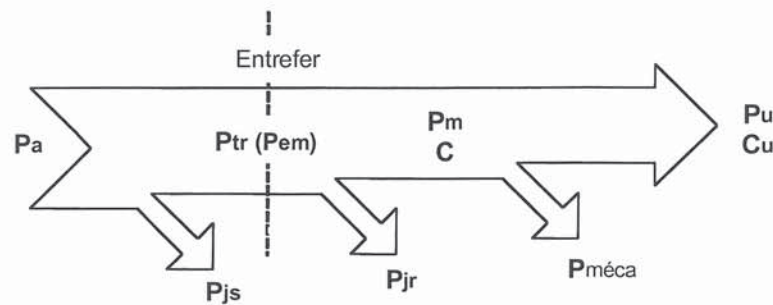


Fig 2.2 : Diagramme des puissances

- P_a : puissance absorbée sur le réseau triphasé d'alimentation ;
- P_{js} : pertes joules stator ;
- P_{tr} : puissance transmise au rotor (ou puissance électromagnétique) ;
- P_{jr} : pertes joules rotor ;
- P_m : puissance mécanique ;
- C : couple agissant sur le rotor (couple électromagnétique) ;
- $P_{méca}$: pertes mécaniques ;
- P_u : puissance utile, sur l'arbre de la machine ;
- C_u : couple utile sur l'arbre ;

Remarque : le schéma équivalent ainsi que le diagramme des puissances ne tiennent pas compte des pertes fer.

Données numériques :

- Résistances et inductances du modèle :
 $R_1 = 22 \text{ m}\Omega$; $R_2 = 32 \text{ m}\Omega$; $L_m = 7,7 \text{ mH}$; $N_2 = 480 \text{ }\mu\text{H}$.
- Nombre de paires de pôles de la machine : $p = 3$
- Grandeurs caractéristiques pour le point de fonctionnement nominal :
 - Tension d'alimentation : $V_{1n} = 800 \text{ V}$ (tension entre phases $U_{1n} = 1385 \text{ V}$) , $f_n = 110 \text{ Hz}$;
 - Glissement nominal : $g_n = 2,2 \%$;
 - Puissance utile nominale : $P_u = 1200 \text{ kW}$.

Etude au point de fonctionnement nominal

Q2.4 : En négligeant la chute de tension dans R_1 (alors $\underline{E}_1 = \underline{V}_1$), déterminer la valeur efficace et la phase des courants $\underline{I}_{12}$ et $\underline{I}_0$. En déduire la valeur efficace de $\underline{I}_1$.

Q2.5 : Ecrire l'expression de P_{jr} et de P_{tr} , déduites du schéma équivalent.

Calculer P_{jr} , P_{tr} , P_{js} , P_a et $P_{méca}$.

En déduire le rendement nominal η_n du moteur.

Q2.6 : Déterminer les puissances réactives :

- Q_m : puissance réactive magnétisante totale ;
- Q_f : puissance réactive totale due au flux de fuite.

Q2.7 : Déterminer le facteur de puissance nominal $\cos(\varphi_n)$ du moteur.

NE RIEN ÉCRIRE

DANS CE CADRE

DR2. Equipement électrique d'une motrice

Q2.1 : Fonctionnement de l'appareillage

ON = fermé ; OFF = ouvert

Appareil		Q1	Q2	KM1	KM2	KM3	KM4
Réseau	25kV-50 Hz						
	15kV-16,7 Hz						
	1500V-CC						

Q2.2 : Caractéristiques électriques

Tension caténaire		25 kV / 50 Hz
<i>Moteur</i>		
P_u (kW)	Puissance fournie, à vitesse max	1200
η_m	Rendement	0,95
$\cos \varphi_m$	Facteur de puissance	0,88
U_m (V)	Tension entre phases	1390
I_m (A)	Courant absorbé	
<i>Onduleur</i>		
η_o	Rendement	0,99
<i>Bus continu</i>		
U_{DC} (V)	Tension continue	1800
$\langle I_{DC} \rangle$ (A)	Courant continu	
<i>Redresseur</i>		
η_r	Rendement	0,98
$\cos \varphi_r$	Facteur de puissance	1
<i>Transformateur</i>		
V_e (V)	Tension secondaire assignée	1000 V
I_e (A)	Courant secondaire	

DOCUMENT 3 : Schéma de l'alimentation d'un bloc moteur

