

Motorisation du tramway de DIJON

Alstom a fourni 52 rames de tramways Citadis aux agglomérations de Brest et de Dijon pour un montant de plus de 100 millions d'euros, vingt rames ont été livrées à Brest et 32 rames à Dijon.

Les rames Citadis ont été conçues dans l'usine Alstom de Valenciennes. Cinq autres sites d'Alstom Transport ont participé à la fabrication : Tarbes pour les équipements électriques et électroniques de la chaîne de traction, Ormans pour les moteurs, Le Creusot pour les bogies, Villeurbanne pour l'électronique embarquée et la Rochelle pour l'assemblage.

Les rames peuvent transporter plus de 200 passagers, soit l'équivalent de 3 bus. Le tramway améliore également la qualité de vie en ville grâce à un niveau sonore inférieur de 5 dBA au niveau généré par le trafic automobile, soit près de 4 fois moins de bruits.

Le tramway Citadis d'Alstom préserve l'environnement. Recyclable jusqu'à 98%, la dernière génération de tramway d'Alstom consomme 10% d'énergie en moins grâce à l'utilisation de matériaux composites et à l'amélioration du système de traction. Un Citadis consomme ainsi en kWh/passager assis, 4 fois moins qu'un bus et 10 fois moins qu'une voiture.



Caractéristiques techniques

Les rames Citadis sont longues de 32,8 m et larges de 2,4 m. La capacité maximale de ces rames est de plus de 200 voyageurs dont 60 places assises. Les rames sont dotées d'un plancher bas intégral. L'écartement des rails est à voie normale et l'alimentation électrique se fait en 750 volts continu comme il est usuel pour les tramways.

Elles pèsent 41,3 tonnes à vide et sont composées de 5 segments reposant sur 3 bogies dont 2 sont moteurs. La puissance utile nominale totale est de 640 kW, la charge utile est de 20 tonnes.

La vitesse de pointe est de 60 km/h avec une capacité d'accélération de 1,15 m/s². La décélération obtenue en cas de freinage d'urgence est de 2,85 m/s². La pente maximale franchissable est de 65 mm/m.

Un bogie moteur est composé de quatre roues entraînées chacune par un moteur asynchrone triphasé par l'intermédiaire d'un réducteur. Une rame de tramway est donc motorisée par 8 moteurs asynchrones

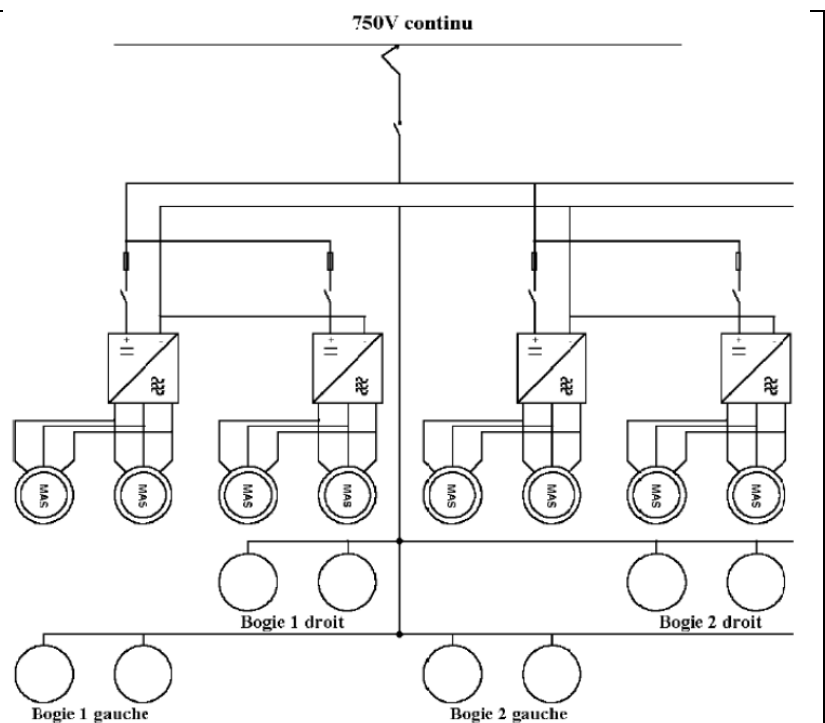
Le schéma de traction retenu pour le Tramway de DIJON est donné ci-contre.

Chaque onduleur de traction alimente deux des quatre machines asynchrones placées sur chaque bogie.

Cette commande indépendante des roues situées à droite et à gauche du bogie permet d'améliorer les passages en courbe.

Le conducteur, par l'intermédiaire d'une manette, peut moduler l'effort de traction à appliquer à la rame de tramway. Ceci revient à moduler le couple électromagnétique des moteurs.

Le constructeur a choisi d'implanter une commande permettant d'imposer le couple électromagnétique instantané sur l'arbre des moteurs.



A. Dimensionnement des moteurs en couple : PFD

A l'horizontal, le couple résistant total de la rame rapporté sur l'ensemble des axes des moteurs en négligeant les efforts aérodynamiques est $C_r = 2000 \text{ N.m}$. Pour une vitesse de 60 km.h^{-1} , les moteurs tournent à 2610 tr.min^{-1} .

Le moment d'inertie équivalent rapporté sur les arbres moteurs est noté $J_{\text{éq}}$.

A.1 Ecrire l'expression de l'énergie cinétique, de la rame à l'horizontal et **calculer** sa valeur pour sa charge et sa vitesse maximales.

A.2 Exprimer l'énergie cinétique en rotation au niveau des moteurs en fonction de $J_{\text{éq}}$ et de la vitesse des moteurs Ω_m .

A.3 Calculer alors l'énergie cinétique $J_{\text{éq}}$ rapportée sur l'ensemble des arbres moteurs en admettant la conservation de l'énergie.

Pour la suite on retiendra $J_{\text{éq}} = 240 \text{ kg.m}^2$ en tenant compte du moment d'inertie des parties tournantes.

Les régulations électroniques permettent de répartir la charge mécanique de façon équitable sur chacun des 8 moteurs.

A.4 Déduire alors les valeurs du couple résistant C_m et de l'inertie J_m rapportés pour un axe moteur.

A.5 Donner le coefficient liant la vitesse angulaire d'un arbre moteur notée Ω_m (rd/s) et la vitesse de déplacement de la rame en V (m/s) à partir des données fournies. **Déduire** alors l'accélération angulaire du moteur à partir de l'accélération de la rame.

A.6 Ecrire le principe fondamental de la dynamique en rotation sur un axe moteur est **déduire** le couple moteur nécessaire pendant une phase de démarrage à l'horizontal.

A.7 Indiquer comment se déroulera un démarrage dans une pente de 65 mm/m .

B. Etude des moteurs

Caractéristiques nominales d'un des 8 moteurs

Il s'agit d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage dont les enroulements statoriques sont couplés en étoile.

- Puissance utile nominale $P_U = 80 \text{ kW}$
- Tension nominale entre phases : $U_N = 585 \text{ V}$;
- Fréquence statorique nominale : $f_N = 88 \text{ Hz}$;
- Rendement nominal : $\eta_N = 98 \%$;
- Facteur de puissance nominal : $\cos \varphi_N = 0,92$;
- Fréquence nominale de synchronisme : $N_s = 2640 \text{ tr.min}^{-1}$;
- Fréquence nominale de rotation du rotor : $N_N = 2610 \text{ tr.min}^{-1}$.

B.1. Etude du fonctionnement nominal du moteur

Dans ce qui suit, on néglige les pertes dans le fer et les pertes mécaniques.

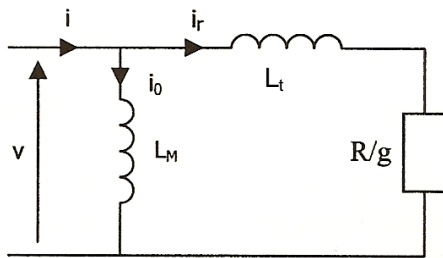
B.1.1. Déterminer le nombre p de paires de pôles du moteur.

B.1.2. Calculer le glissement g_N .

B.1.3. Calculer la puissance électrique P_N absorbée par le moteur et **déterminer** le courant I_N appelé.

B.2. Exploitation du modèle simplifié

L'association du convertisseur et de la motorisation doit permettre le fonctionnement de la machine asynchrone dans les 4 quadrants mécaniques c'est-à-dire pour le tramway de DIJON, la circulation dans les deux sens de marche et le freinage électrique. Les tensions alimentant la machine asynchrone sont sinusoïdales triphasées (v_{AN} , v_{BN} et v_{CN}) et modèle équivalent par phase de la machine peut être assimilé au schéma simplifié ci-dessous.



- R/g est la résistance modélisant le transfert de puissance active P_{Tr} au rotor ;
- L_M est l'inductance magnétisante ;
- L_t est l'inductance totale de fuites vue du stator ;
- g est le glissement ;
- v est une tension simple du réseau d'alimentation de valeur efficace V ($v = v_{xN}$ avec $x = A, B$ ou C) ;
- i est l'intensité en ligne.

On donne : $R = 0,06 \Omega$, $L_t = 1,1 \text{ mH}$, $L_M = 25 \text{ mH}$.

B.2.1. Déterminer l'expression de la puissance électromagnétique P_{TIN} puis du couple électromagnétique C_{em} en fonction de V , L_t , R , g , p et ω (pulsation des grandeurs statoriques).

B.2.2 Mettre le résultat sous la forme suivante en précisant les expressions de A et de g_0 :
$$C = \frac{A}{\frac{g}{g_0} + \frac{g_0}{g}}$$

On prendra pour les applications numériques suivantes : $V = 338 \text{ V}$ et $f = 88 \text{ Hz}$.

B.2.3. Déterminer la valeur de g , pour laquelle le couple est maximal. **Déterminer** alors le couple maximal C_{MAX} . **Effectuer** les applications numériques.

B.2.4. Pour les faibles glissements et en précisant l'hypothèse faite, **montrer** que la caractéristique de couple peut se mettre sous la forme $C \approx Kg$ avec $K \approx 20660 \text{ Nm}$.

B.2.5 Esquisser alors la caractéristique du couple moteur en fonction de la vitesse dans la zone d'emploi en situant les valeurs connues du couple et des vitesses.

B.2.6 Valider en justifiant, le dimensionnement du moteur et sa caractéristique de couple vis à vis des contraintes mécaniques posées au départ.

B.3 Fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple vitesse

B.3.1. Indiquer comment procéder pour inverser le sens de rotation des moteurs de traction lors d'une marche arrière.

B.3.2 Montrer que l'expression du déphasage φ de v par rapport à i est donnée par :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{L_t \omega g}{R}\right) - \arctan\left(\frac{(L_t + L_M) \omega g}{R}\right)$$

B.3.3 A partir de l'expression de la puissance électrique absorbée par une phase du moteur, **donner** les conditions sur φ qui fixent un fonctionnement en moteur ou en générateur.

B.3.4 Représenter, sur le document réponse, les tensions v_{BN} et v_{CN} nécessaires pour aller dans les différents quadrants de fonctionnement du moteur. Les conventions sont données pour le quadrant 1. **Préciser** pour chaque quadrant le type de fonctionnement de la machine.

B.3.5. Compléter le document réponse en représentant les courants i_A , i_B , i_C dans chacun des 4 quadrants mécaniques.

DOCUMENT REPONSE

