

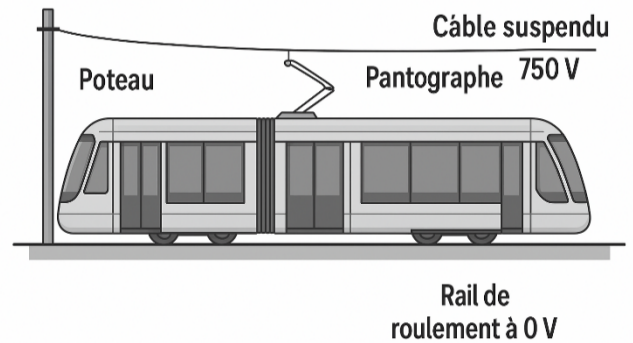
TD2 : Contrôle de vitesse d'un Tramway

I. Présentation

Le tramway est un moyen de transport collectif urbain ou interurbain circulant sur des rails en acier posés sur des voies ferrées planes. Il peut être installé en site propre ou intégré à la chaussée grâce à des rails à gorge encastrés dans la voirie. Chaque rame est équipée de douze moteurs asynchrones entraînant douze roues motrices réparties sur trois bogies. L'alimentation des moteurs s'effectue via des onduleurs de tension, à partir d'un réseau continu de **750 V**. Le courant est transmis par un pantographe relié à un câble aérien, tandis que le retour du courant s'effectue par les rails mis à la masse (**0 V**).



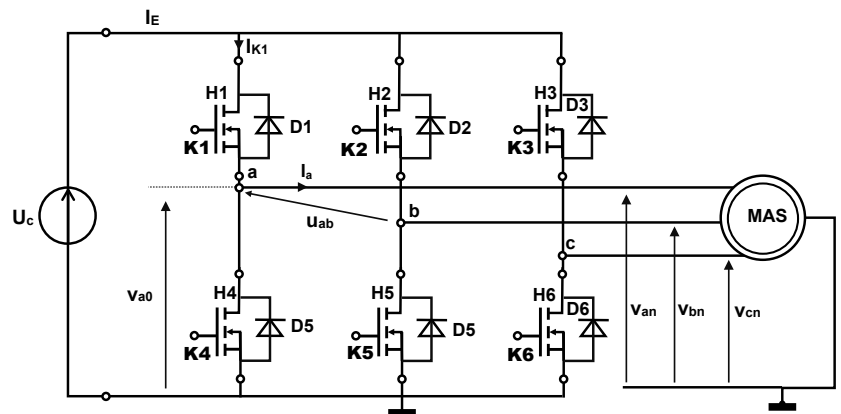
Chaque moteur de traction est alimenté individuellement par un onduleur de tension, à partir du réseau continu de **750 V**. La vitesse de synchronisme — et donc la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone — dépend directement de la fréquence du courant d'alimentation.



L'onduleur autonome, en tant que convertisseur statique, permet ainsi de faire varier cette fréquence et, par conséquent, de réguler la vitesse du moteur.

II. Étude du convertisseur d'énergie Continu/alternatif

Chaque moteur de traction reçoit son alimentation via un onduleur de tension connecté au réseau **750 V** continu (voir figure suivante). La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone, dépendant de la fréquence, est ajustée par l'onduleur autonome.



Hypothèses et consignes :

- Les interrupteurs **K₁, K₂, K₃, K₄, K₅ et K₆** sont considérés comme idéaux.
- Les commandes des interrupteurs (**K₁, K₄**), (**K₂, K₅**), et (**K₃, K₆**) sont complémentaires deux à deux. Chaque interrupteur se ferme pendant une demi-période et s'ouvre pendant l'autre demi-période.
- La commande d'un bras d'onduleur est décalée d'un tiers de période (**T/3**) par rapport à celle du bras précédent.
- Le moteur ayant un fonctionnement équilibré : **V_{an}(t) + V_{bn}(t) + V_{cn}(t) = 0**

- **Question 1 :** Préciser la valeur de la tension **v_{ao}** lorsque **K₁** est fermé puis lorsque **K₄** est fermé.
- **Question 2 :** Compléter le document réponse, en y traçant le chronogramme de la tension **V_{ao}(t)**, **V_{bo}(t)** et **V_{co}(t)**.
- **Question 3 :** Montrer que la tension **v_{an} = 1/3 (u_{ab} - u_{ca})**
- **Question 4 :** Montrer que **v_{an} = 2/3 v_{ao} - 1/3 v_{bo} - 1/3 v_{co}** et représenter **V_{an}(t)**, **V_{bn}(t)** et **V_{cn}(t)** sur Doc. Réponse (**DRE1**).

○ **Question 5 :** Calculer la valeur efficace V_{an} de la tension $v_{an}(t)$.

La décomposition en série de Fourier de la tension $v_{an}(t)$, est la suivante :

$$v_{an}(t) = \frac{4 U_c}{\sqrt{3} \pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k + 1} \cos\left((2k + 1) \frac{\pi}{6}\right) \sin((2k + 1) \omega t)$$

○ **Question 6 :** Donner l'expression du fondamental $v_{an1}(t)$ de la tension $v_{an}(t)$, puis calculer sa valeur efficace, notée V_{an1} .

○ **Question 7 :** Calculer les valeurs efficaces des harmoniques **3, 5, 7 et 9**, puis remplir le tableau de Doc réponse (**DRE2**)

○ **Question 8 :** Compléter le spectre de la tension normalisée $v_{an}(t)$ par rapport à V_{an1} sur le Doc. Réponse (**DRE2**).

○ **Question 9 :** Que peut-on dire des harmoniques du rang multiple de trois ? Déduire le rang de l'harmonique le plus gênant.

On rappelle que le taux de distorsion harmonique :

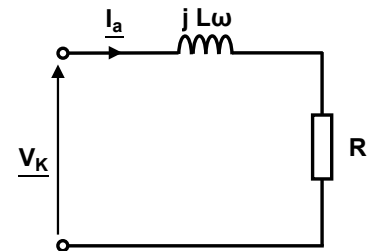
$$THD\% = 100 \times (\text{Valeur efficace des harmoniques} / \text{valeur efficace du fondamental})$$

○ **Question 10 :** Calculer le **THD%**.

○ **Question 11 :** Proposer une solution pour éliminer l'harmonique le plus gênant trouvé dans la **question 9**.

○ **Question 12 :** Donner la relation liant les éléments du circuit qu'il faut rajouter en parallèle de l'installation.

Afin d'évaluer l'amplitude des courants harmoniques, on considère que, du point de vue harmonique, une phase du moteur peut être modélisée par le schéma simplifié présenté sur la figure ci-dessous.



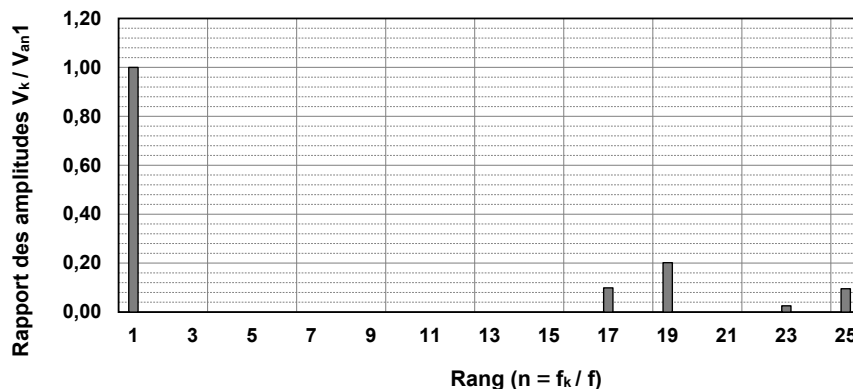
On donne : $L = 2,31 \text{ mH}$, $R = 2 \Omega$ et $f = 88 \text{ Hz}$.

○ **Question 13 :** Déterminer le module et l'argument des impédances Z_5 et Z_7 associées respectivement aux harmoniques de rang **5** et **7**, de fréquences **5f** et **7f**.

○ **Question 14 :** À partir des résultats établis à la **question 7**, exprimer les courants harmoniques $i_{a5}(t)$ et $i_{a7}(t)$ du courant de phase $i_a(t)$. En déduire les valeurs efficaces correspondantes I_{a5} et I_{a7} .

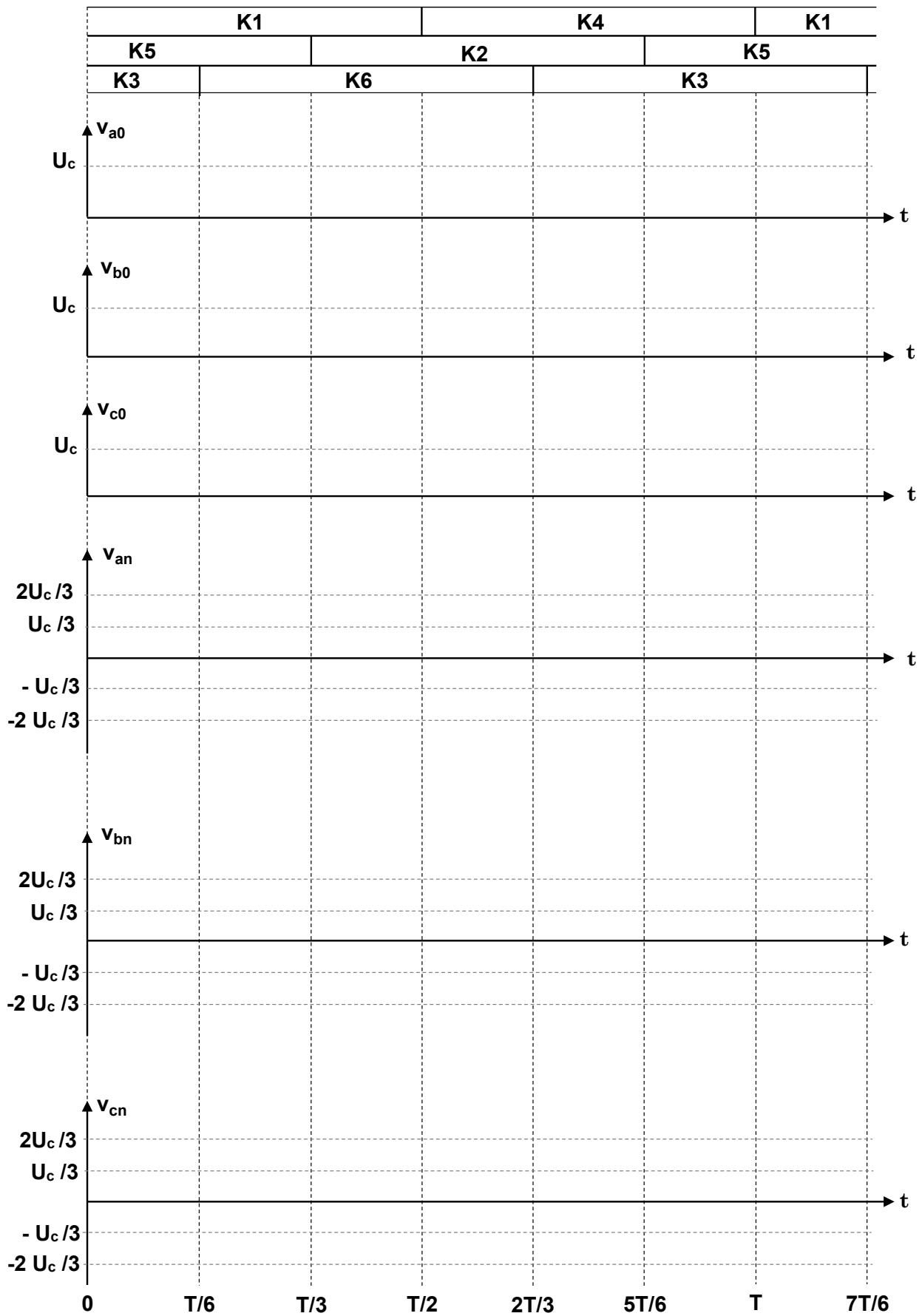
En pratique, la structure et la commande retenues pour l'onduleur sont différentes de celle envisagées jusqu'à présent. Pour un fonctionnement à grande vitesse, on adopte une commande de type **MLI** précalculée.

La figure suivante représente, Le spectre en amplitude de la tension simple $v_{an}(t)$:



○ **Question 15 :** Préciser le rang de l'harmonique de $v_{an}(t)$ le plus proche du fondamental. Quel intérêt présente cette commande ?

Document réponse (DRE1)



Document réponse (DRE2)

Indice K	1	2	3	4	5
Rang n					
Valeur efficace V_k					
Rapport V_k/V_{an1}					

