

### Source de tension 15 kV / 16,66 Hz

Dans le cadre de la mise en service de la Ligne à Grande Vitesse à l'Est de Paris, la SNCF a construit un nouveau centre pour l'entretien et le test des trains à grande vitesse (TGV et ICE). Dans les procédures d'essais, il est prévu de faire un test sous tension nominale et ceci pour les deux systèmes d'alimentation pour lesquels les engins ont été conçues : 25 kV / 50 Hz (réseau Français) et 15 kV / 16,66 Hz (réseaux Allemand et Suisse). Au centre d'essais, seul le 25 kV / 50 Hz monophasé est « naturellement » disponible et il faut donc réaliser au moyen d'un convertisseur statique la source de tension 15 kV / 16,66 Hz.

Le cahier des charges, défini par la SNCF, est le suivant :

Courant efficace maximal en sortie : **100 A**

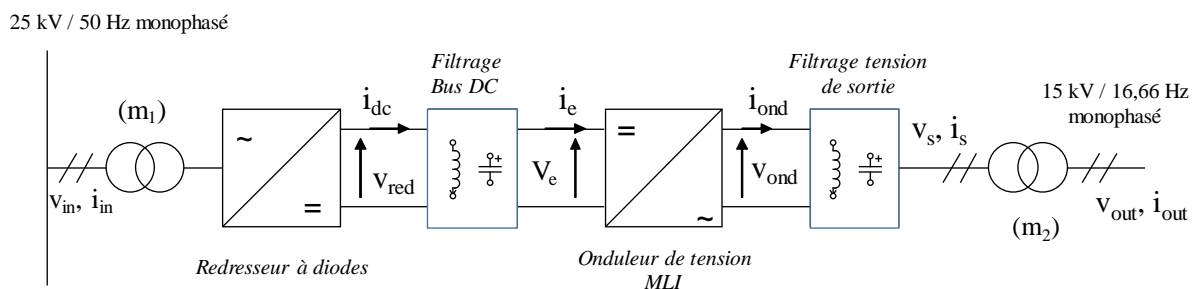
Tension efficace maximale à vide en sortie : **17,2 kV**

Tension efficace minimale en charge en sortie : **13 kV**

Tension efficace maximale en entrée : **27,5 kV**

Tension efficace minimale en entrée : **25 kV**

La structure du convertisseur est donnée à la figure ci-dessous :



**Figure 1 : schéma de principe du convertisseur 25 kV/50 Hz – 15 kV/16,66 Hz**

L'onduleur de tension est commandé avec une MLI permettant d'avoir en sortie trois niveaux de tension avec doublement de la fréquence de découpage (voir cours).

Il est réalisé avec des IGCT (Thyristors Blocables) réversibles en courant. Compte tenu des caractéristiques des interrupteurs, la tension du bus continu, notée  $E$ , est de 2800 V.

La fréquence de commutation des IGCT, est notée  $f_c$ , elle est de 450 Hz.

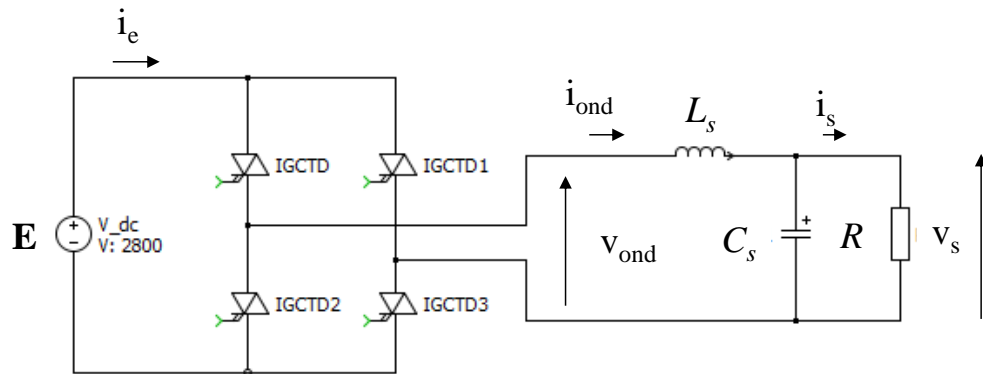
La fréquence du signal modulant, notée  $f$ , est de 16,66 Hz (1/3 de 50 Hz) et la plage de variation du rapport cyclique de la commande des interrupteurs est de 0,05 à 0,95.

Trois fichiers PLECS vous sont fournis :

- Le fichier pour l'étude du filtre de sortie avec modèle instantané et modèle moyen de l'onduleur : *BE\_Ond\_15kV*. (Partie 1 du sujet).
- Le fichier pour le tracé de la réponse fréquentielle du filtre d'entrée : *filtre\_shunt\_bode\_T\_initial*. (Partie 2 du sujet).
- Le fichier *Transfos* avec les modèles des transformateurs (Partie 4 du sujet)

## 1 : Etude du filtre de sortie

On considère ici le schéma suivant :



**Figure 2 : schéma de l'onduleur de tension MLI à IGCT associé à son filtre de sortie.**

\* *Dimensionnement des éléments du filtre de sortie*

1-1 : En supposant que  $v_s \approx v_{\text{ondf}}$ , calculer la résistance  $R$  qui permet d'obtenir une puissance de 1,5 MW pour la profondeur de modulation maximale ( $m_a = m_{a \text{ max}}$ ). Quelles sont alors les valeurs crête et efficace du courant  $i_s$  (notées respectivement  $\hat{I}_s$  et  $I_S$ )

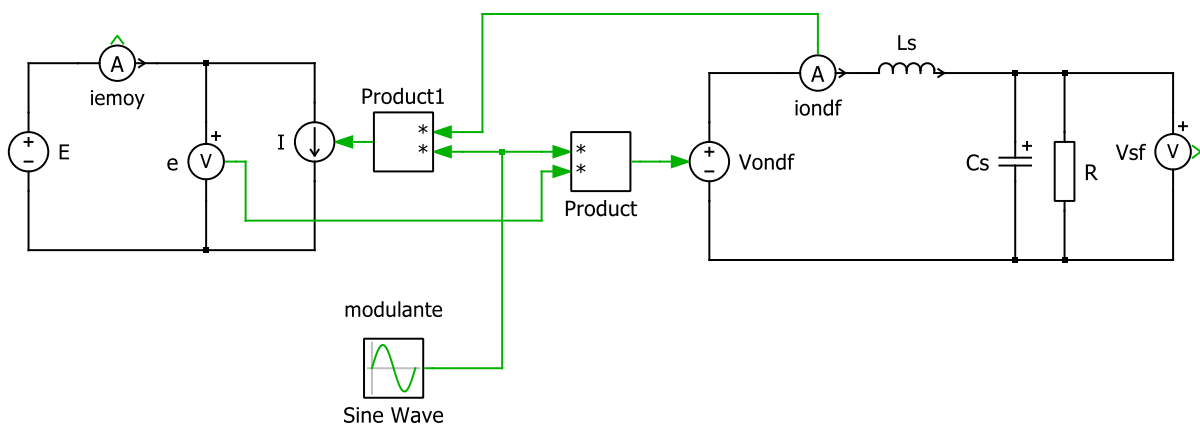
1-2 : Déterminer la valeur de  $L_s$  pour que l'ondulation maximale à  $2.f_c$  du courant  $i_{ond}$  soit égale à 20% de  $\hat{I}_s$ .

1-3 : Déterminer la valeur de  $C_s$  pour que la fréquence de coupure du filtre soit de 170 Hz.

\* *Modélisation avec le logiciel PLECS*

1-4 : Simuler sous PLECS le circuit de la figure 2 avec son modulateur. Pour  $m_a = m_{amax}$ , tracer les formes d'ondes de  $v_{ond}(t)$ ,  $v_s(t)$ ,  $i_{ond}(t)$  et  $i_s(t)$ .

1-5 : Rajouter dans le fichier circuit PLECS, le circuit correspondant au modèle moyen de l'onduleur (voir figure ci-dessous), puis relancer la simulation (les circuits des figures 2 et 3 seront simulés simultanément).



**Figure 3 : modèle moyen de l'onduleur de tension**

*\* Analyse du comportement du filtre de sortie à la fréquence fondamentale*

1-6 : Tracer sur le même graphe  $v_{\text{ondf}}$  et  $v_{\text{sf}}$ . Mesurer le déphasage et la chute de tension introduits par le filtre à la fréquence fondamentale de 16,66 Hz.

1-7 : Tracer sur le même graphe  $i_{\text{ondf}}$  et  $i_{\text{sf}}$ . Mesurer le déphasage et la différence d'amplitude entre les deux courants à la fréquence fondamentale de 16,66 Hz.

1-8 : Expliquer qualitativement par un diagramme de Fresnel les résultats obtenus aux questions 1-6 et 1-7.

*\* Analyse du comportement du filtre de sortie à l'échelle de la période de découpage*

1-9 : A partir des résultats de simulation, tracer la composante haute fréquence du courant de sortie de l'onduleur :  $i_{\text{ondh}} = i_{\text{ond}} - i_{\text{ondf}}$ . Commenter l'évolution temporelle de  $i_{\text{ondh}}$ . Le dimensionnement de l'inductance  $L_s$  est-il correct ?

1-10 : A partir des résultats de simulation, tracer la composante haute fréquence de la tension en sortie du filtre :  $v_{\text{sh}} = v_s - v_{\text{sf}}$ . Commenter l'évolution temporelle de  $v_{\text{sh}}$ . L'ondulation maximale de tension est-elle inférieure à 5% de  $\hat{V}_{\text{sf}}$  ?

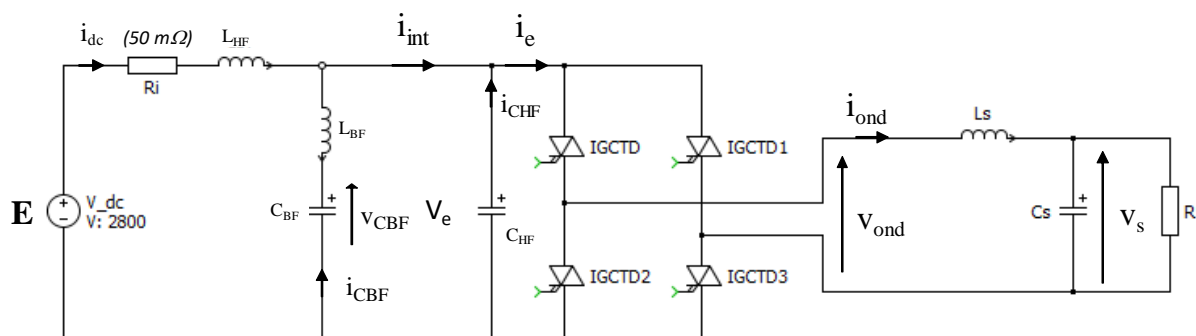
## 2 Etude du filtrage du courant d'entrée

*\* Choix des éléments du filtre d'entrée*

2-1 : A partir des résultats de simulations du circuit de la figure 2, effectuer une analyse spectrale du courant  $i_e(t)$  et indiquer quelles sont les raies d'amplitude significative à filtrer.

On considère maintenant le circuit de la figure 4 comportant un double filtrage (HF et BF) du courant d'entrée.

2-2 : Comment choisissez-vous les fréquences d'accord des filtres BF et HF



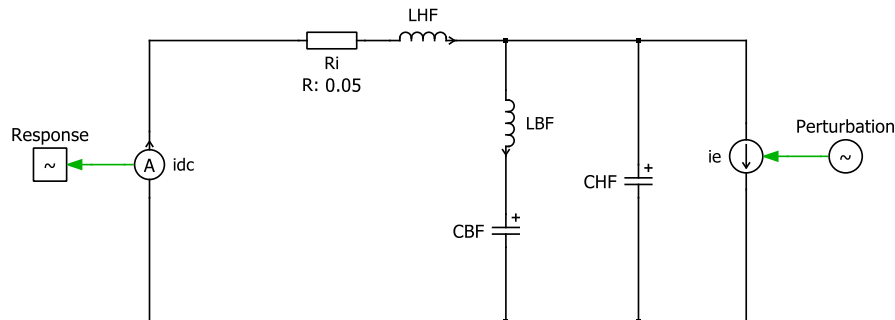
**Figure 4 : Onduleur avec filtrage du courant d'entrée.**

2-4 : Déterminer la valeur de  $C_{\text{BF}}$  pour que l'ondulation maximale de tension  $\Delta V_{\text{CBF}}$  à  $2f$  soit égale à 20% de  $E$ . Calculer ensuite la valeur de l'inductance  $L_{\text{BF}}$ .

2-5 : Déterminer la valeur de  $C_{\text{HF}}$  pour que l'ondulation maximale de tension  $\Delta V_{\text{CHF}}$  à  $2f_c$  soit égale à 5% de  $E$ . Compte tenu du résultat de la question 2-2, calculer la valeur de l'inductance  $L_{\text{HF}}$ .

2.6 : Faire dans PLECS une simulation **fréquentielle** (Menu simulation/Analysis Tools/AC sweet) du circuit de la figure 5 et tracer le diagramme de Bode de la fonction de transfert

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{\underline{I}_{dc}}{\underline{I}_e}. \text{ Vérifier le bon positionnement des fréquences d'accord des filtres BF et HF.}$$



**Figure 5 : Tracé du diagramme de Bode de la fonction de transfert  $\underline{T}(j\omega)$  du filtre d'entrée.**

\* Etude du fonctionnement de l'onduleur avec le filtre d'entrée.

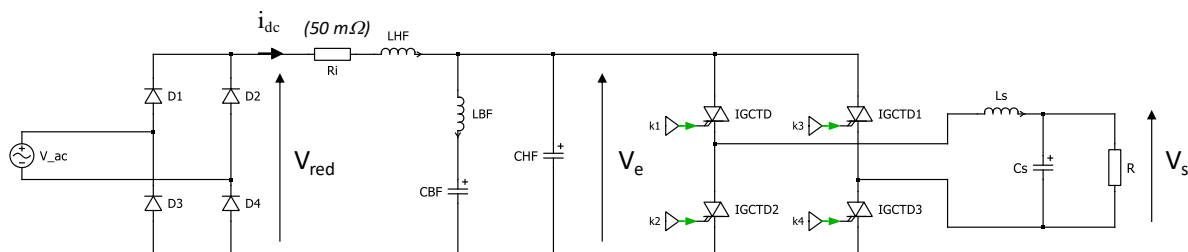
2-7 : Faire maintenant une simulation temporelle du circuit de la figure 4. On supposera que le filtre possède une résistance interne  $r_i = 0,05 \Omega$  et que les condensateurs  $C_{BF}$  et  $C_{HF}$  sont initialement chargés à 2800 V.

- Visualiser sur le même tracé  $i_e(t)$ ,  $i_{int}(t)$  et  $i_{dc}(t)$ . Effectuer ensuite une analyse fréquentielle de ces signaux.
- Visualiser la tension  $V_e(t)$  et mesurer son ondulation.
- Visualiser la tension  $V_{CBF}(t)$  et mesurer son ondulation.

Conclure quant au dimensionnement des éléments du filtre d'entrée. Réajuster les valeurs de ces éléments si nécessaire.

### 3 Alimentation de l'onduleur par un redresseur de tension.

Conformément à la figure 6, l'onduleur est maintenant alimenté à partir d'une source de tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz et un redresseur de tension. Afin de filtrer les harmoniques de la tension redressée, la valeur de l'inductance  $L_{HF}$  est maintenant fixée à 200 mH.



**Figure 6 : Onduleur de tension alimenté par un redresseur monophasé.**

3-1 : Après avoir choisi l'amplitude de la source de tension  $V_{ac}$  pour que la valeur moyenne de la tension  $V_{red}$  soit de 2800 V, faire une simulation temporelle du circuit de la figure 6 (les condensateurs  $C_{BF}$  et  $C_{HF}$  seront initialement chargés à 2800 V).

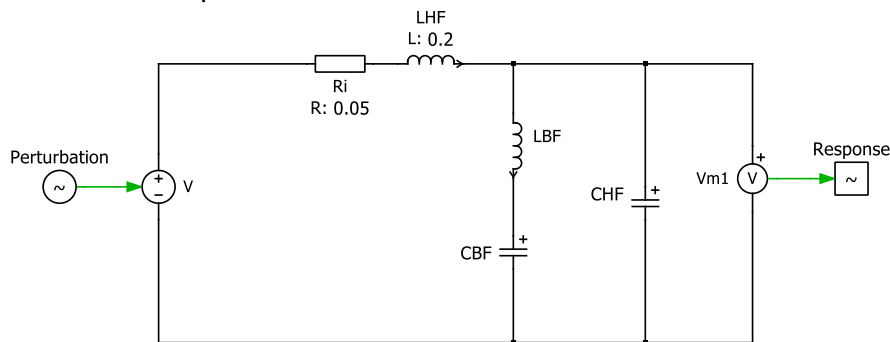
- Visualiser sur le même tracé  $i_e(t)$ ,  $i_{int}(t)$  et  $i_{dc}(t)$ . Effectuer ensuite une analyse fréquentielle de ces signaux.
- Visualiser la tension  $V_e(t)$  et mesurer, une fois le régime permanent établi, son ondulation.
- Visualiser le courant  $i_{dc}(t)$  et mesurer, une fois le régime permanent établi, son ondulation.

Conclure quant au dimensionnement des éléments du filtre d'entrée.

3.2 : Effectuer dans PLECS une simulation **fréquentielle** (Menu simulation/Analysis Tools/AC sweet) du circuit de la figure 7 et tracer le diagramme de Bode de la fonction de

$$\text{transfert } \underline{T}_v(j\omega) = \frac{V_e}{V_{red}}.$$

Justifier les résultats de la question 3.1.



**Figure 7 : Tracé du diagramme de Bode de la fonction de transfert  $\underline{T}_v(j\omega)$  du filtre d'entrée.**

#### 4 Analyse du fonctionnement en charge de l'alimentation 15 kV / 16,66 Hz.

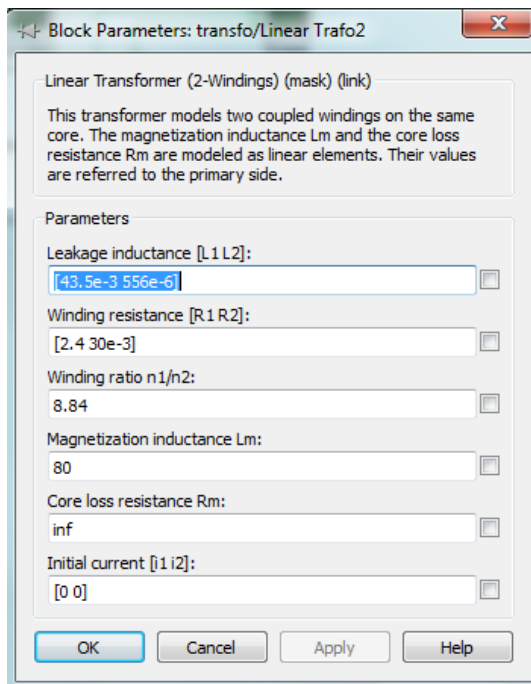
Les transformateurs ont les caractéristiques suivantes :

**Transformateur d'entrée (f = 50 Hz) :**

**S = 1,8 MVA**

Essai en court-circuit :  $U_{cc} = 8\%$  ;  $\varphi_{cc} = 80^\circ$ ,  
Essai à vide : tension primaire 25 kV,  
courant primaire: 1A – pertes fer négligées.

Paramètres PLECS :

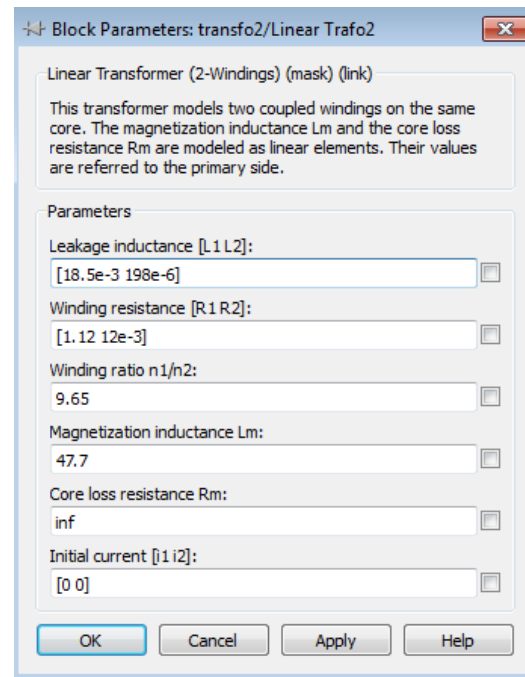


**Transformateur de sortie (f = 16,66 Hz) :**

**S = 1,5 MVA**

Essai en court circuit :  $U_{cc} = 3\%$  ;  $\varphi_{cc} = 60^\circ$ ,  
Essai à vide : tension secondaire 15 kV,  
courant secondaire: 3A – pertes fer négligées.

Paramètres PLECS :



**Caractéristique de la source 25 kV / 50 Hz monophasée (sous station SNCF) à implanter sous PLECS :**

**Tension efficace à vide : 27,5 kV ; impédance interne :  $L_{cc} = 12\text{mH}$ .**

4-1 : Construire sous PLECS le schéma complet de l'alimentation en partant de la source 25 kV / 50 Hz monophasée jusqu'à la charge alimentée sous 15 kV 16<sup>2/3</sup> Hz. **On fera attention au sens de branchement des transformateurs (le bobinage repéré par un gros point est le côté haute tension).**

\* La charge connectée en sortie de l'alimentation est supposée résistive :  $R_{ch} = 150 \Omega$ .

4-2 : Simuler le schéma complet sur un horizon temporel de 2 secondes et pour  $m_a = m_{amax}$ . Tracer dans la phase de régime permanent les formes d'ondes de  $v_{red}(t)$ ,  $i_{dc}(t)$ ,  $V_e(t)$ . Commenter les formes d'ondes obtenues.

4-3 : Tracer les formes d'ondes instantanées des grandeurs d'entrée et de sortie de l'alimentation (tension et courant). Commenter les formes d'ondes obtenues.

*\* Tracé de la caractéristique en charge de l'alimentation.*

4-4 : Pour  $150 \, \Omega < R_{ch} < 1500 \, \Omega$ , tracer point par point la caractéristique de sortie de l'alimentation  $V_{out\_rms} = f(I_{out\_rms})$  ainsi que l'évolution de la tension moyenne sur le bus continu  $V_{emoy} = f(I_{out\_rms})$ . On utilisera pour cela sous PLECS les outils de mesures adaptées. La caractéristique de l'alimentation répond-elle au cahier des charges de la SNCF ? Quels sont les éléments de la chaîne de conversion d'énergie responsables de la chute de tension moyenne sur le bus continu puis sur la tension de sortie ?