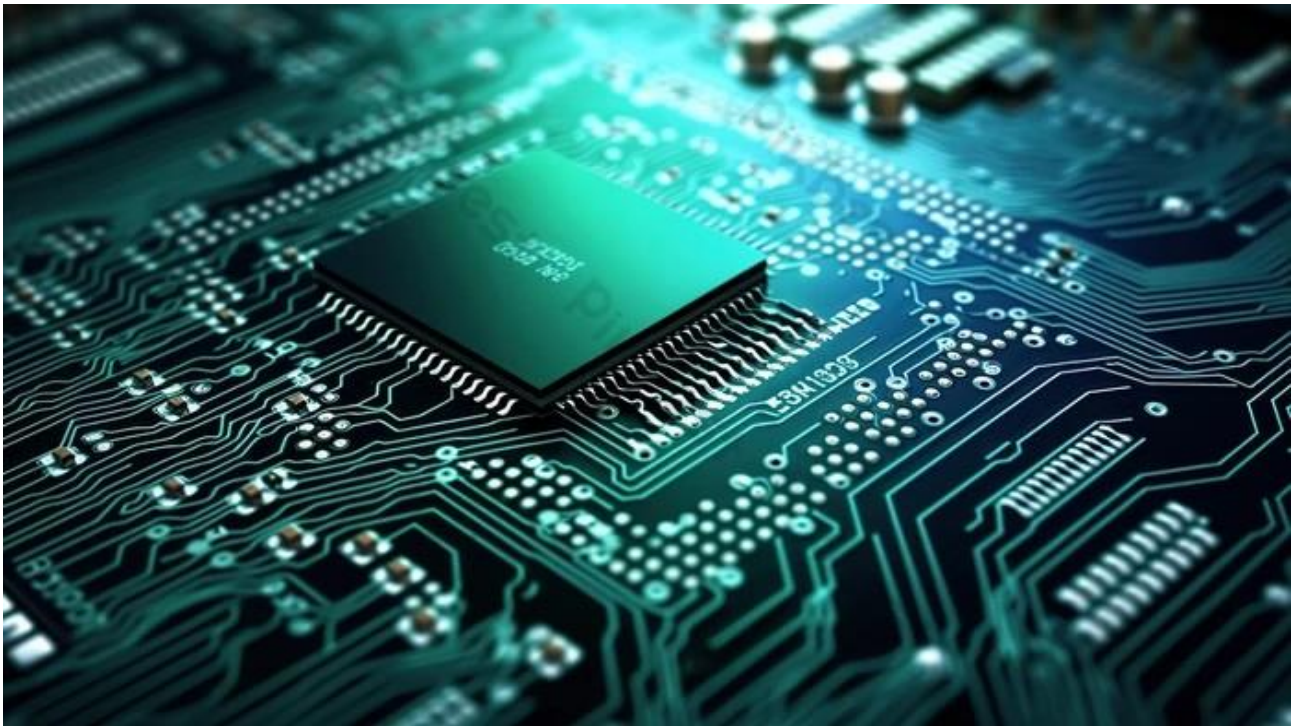


Alimentation à découpage PUSH-PULL (Demi-pont)



2ème année Génie Electrique TA

Réalisé par:

- ABOURICH AYOUB
- ELKOULI KHALID
- EL MOUFARRIJ NAHLA

Demandée par:

- Mme. EL OTMANI FADWA

Table des matières

I.	Introduction.....	3
II.	Rappels théoriques.....	3
a.	Principe général d'une alimentation à découpage	3
b.	Notion de push-pull et demi-pont	4
III.	Étude Théorique : Alimentation à Découpage Push-Pull (Demi-Pont)	5
1.	Introduction	5
2.	Principe de fonctionnement.....	5
2.1	Structure générale.....	5
2.2	Séquence de commutation	5
3.	Modélisation Théorique	6
3.1	Tension primaire et secondaire du transformateur.....	6
3.2	Tension de sortie redressée	6
3.3	Flux magnétique et non-saturation du noyau	6
3.4	Puissance et rendement.....	7
IV.	Modélisation et Simulation du Convertisseur Demi-Pont.....	8
1.	Conception du Modèle Simulink	8
2.	Paramètres de Simulation	10
3.	Résultats de Simulation	12
4.	Analyse et Interprétation des Résultats	13
4.1	Comportement des Signaux de Commande.....	13
4.2	Tension au Point Milieu du Demi-Pont	13
4.3	Performance du Filtre de Sortie et Tension Régulée	14
4.4	Rapport de Conversion et Efficacité	14
V.	Conclusion.....	14

I. Introduction

Dans le domaine de l'électronique de puissance, les alimentations à découpage constituent une solution incontournable pour assurer la conversion d'énergie avec un rendement élevé et une taille réduite. Selon la puissance visée et les contraintes de l'application, plusieurs topologies de convertisseurs sont utilisées : flyback, forward, push-pull, demi-pont ou encore pont complet.

Parmi elles, la configuration **demi-pont push-pull** est particulièrement intéressante, car elle permet une bonne exploitation du transformateur, une répartition équilibrée du flux magnétique et une adaptation efficace entre l'entrée et la charge. Elle est largement utilisée dans les alimentations industrielles, les onduleurs et divers systèmes embarqués.

Ce rapport présente l'étude et la simulation sous **Matlab/Simulink** d'un convertisseur en demi-pont. L'objectif est de mettre en évidence son principe de fonctionnement, de modéliser son comportement et d'analyser les résultats obtenus à travers des simulations. Ce travail permet de mieux comprendre les mécanismes de cette topologie et d'évaluer ses performances dans un cadre pratique et pédagogique.

II. Rappels théoriques

a. Principe général d'une alimentation à découpage

Le principe général d'une alimentation à découpage réside dans la conversion d'une tension d'entrée en une tension de sortie régulée, en utilisant des composants de puissance (comme des transistors) qui agissent comme des interrupteurs ultra-rapides. Cette méthode de "découpage" de l'alimentation à haute fréquence permet ensuite le transfert d'énergie via des transformateurs ou des inductances, ce qui rend l'alimentation plus efficace, compacte et légère que les alimentations linéaires traditionnelles.

Le fonctionnement se base sur les étapes principales ci-après :

- **Redressement et Filtrage de l'entrée** : La tension d'entrée, souvent du courant alternatif du réseau électrique, est d'abord convertie en courant continu par un circuit de redressement. Un filtre est ensuite utilisé pour lisser ce courant continu.
- **Découpage à haute fréquence** : Le courant continu obtenu est envoyé à des commutateurs rapides, généralement des transistors, qui l'allument et l'éteignent des milliers, voire des millions de fois par seconde.
- **Transformation** : L'énergie est transférée via un transformateur ou une inductance qui fonctionne à haute fréquence. Ce composant, plus petit et plus léger qu'un

transformateur de basse fréquence, permet de modifier la tension de manière efficace.

- **Redressement et Filtrage de sortie** : La tension alternative résultante du transformateur ou de l'inductance est à nouveau redressée et filtrée pour fournir une tension continue stable à la sortie.
- **Régulation (rétroaction)** : Un circuit de rétroaction surveille la tension de sortie et ajuste le signal de découpage pour maintenir cette tension constante, même en cas de variations de la charge ou de la tension d'entrée.

b. Notion de push-pull et demi-pont

Le demi-pont et le push-pull sont deux topologies classiques d'alimentations à découpage:

- **Demi-Pont (Half-Bridge)** :
 - Deux interrupteurs commandés de façon complémentaire.
 - Deux condensateurs en série assurent le point milieu.
 - La tension appliquée au primaire du transformateur (ou à la charge) est $\pm V_{dc}/2$.
 - **Avantages**: simplicité, composants soumis à une tension égale à V_{dc} , bonne symétrie.
 - **Inconvénients**: nécessite deux condensateurs parfaitement équilibrés, tension de sortie limitée à $\pm V_{dc}/2$.
- **Push-Pull** :
 - Deux interrupteurs connectés à une source unique avec un transformateur à point milieu.
 - Chaque interrupteur applique alternativement $+V_{dc}$ et $-V_{dc}$ au primaire du transformateur.
 - **Avantages**: meilleure utilisation du transformateur, tension primaire plus élevée.
 - **Inconvénients**: saturation possible du transformateur en cas de déséquilibre, contraintes plus fortes sur les interrupteurs.

c. Composants essentiels

- **Transformateur haute fréquence** : assure l'isolement galvanique et adapte la tension.
- **Interrupteurs électroniques (MOSFET/IGBT)** : fonctionnent en commutation (ON/OFF) à haute fréquence.
- **Condensateurs d'équilibrage** : garantissent la répartition égale de la tension sur le demi-pont.
- **Diodes rapides ou redressement synchrone** : convertissent la tension alternative secondaire en continu.
- **Filtre de sortie (LC)** : réduit l'ondulation et stabilise la tension délivrée à la charge.

III. Étude Théorique : Alimentation à Découpage Push-Pull (Demi-Pont)

1. Introduction

L'alimentation à découpage Push-Pull en demi-pont (Half-Bridge Converter) est une topologie très utilisée dans les convertisseurs DC-DC isolés de moyenne puissance. Elle permet de transformer une tension continue en une autre tension continue différente, à l'aide d'un transformateur, tout en assurant une isolation galvanique et un rendement élevé (souvent $> 85\%$).

2. Principe de fonctionnement

2.1 Structure générale

La configuration demi-pont est composée des éléments principaux suivants :

- Deux **interrupteurs électroniques** (MOSFETs ou IGBTs) notés S1 et S2.
- Deux **condensateurs de découplage** C1 et C2 montés en série sur la source continue V_{dc} .
- Un **transformateur d'isolation** caractérisé par ses rapports de spires N_p/N_s .
- Un **étage de redressement** et de **filtrage** (diodes rapides et filtre LC).

Le point milieu formé par les condensateurs C1 et C2 sert de nœud de référence pour la tension appliquée au primaire du transformateur.

2.2 Séquence de commutation

Le principe repose sur l'alternance de conduction des interrupteurs S1 et S2, commandés par des signaux **PWM (Pulse Width Modulation)** complémentaires et synchronisés, avec introduction d'un temps mort (dead time) pour éviter toute conduction simultanée.

- Lorsque S1 est conducteur, le point milieu du demi-pont applique au primaire une tension $+V_{dc}/2$.
- Lorsque S2 est conducteur, la tension appliquée devient $-V_{dc}/2$.

Ainsi, la polarité de la tension appliquée au primaire s'inverse périodiquement, assurant une excitation alternative du transformateur et évitant la saturation magnétique du noyau.

3. Modélisation Théorique

La modélisation théorique du convertisseur **push-pull en demi-pont** a pour objectif d'établir un ensemble d'équations décrivant le comportement électrique et énergétique du système en régime de fonctionnement stationnaire. Elle permet de relier les grandeurs d'entrée, de commande et de sortie, et de définir les paramètres essentiels pour la simulation et le dimensionnement du montage.

3.1 Tension primaire et secondaire du transformateur

La tension au primaire étant alternative et rectangulaire, sa valeur efficace sur une période est fonction du rapport cyclique D et de la tension d'alimentation V_{dc} .

$$V_p = \frac{V_{dc}}{2} \cdot (2D - 1)$$

Le secondaire du transformateur délivre une tension proportionnelle au rapport de transformation :

$$V_s = V_p \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

3.2 Tension de sortie redressée

Après redressement et filtrage, la tension de sortie moyenne s'exprime par :

$$V_{out} = D \cdot \frac{V_{dc}}{2} \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

Où :

- D est le rapport cyclique ($0 \leq D \leq 0,5$),
- N_s/N_p est le rapport de transformation du transformateur.

Cette relation montre que la tension de sortie est proportionnelle au **duty cycle** et au rapport de spires.

3.3 Flux magnétique et non-saturation du noyau

Le flux magnétique maximal Φ_{max} dans le transformateur est donné par :

$$\Phi_{\max} = \frac{V_p \cdot D \cdot T_s}{N_p}$$

et la densité de flux correspondante :

$$B_{\max} = \frac{V_p \cdot D}{N_p \cdot A_e \cdot f_s}$$

Avec :

- A_e : section effective du noyau (m²),
- $f_s=1/T_s$: fréquence de découpage.

La condition de fonctionnement nominal impose : $B_{\max} < B_{\text{sat}}$ Afin d'éviter la saturation du matériau magnétique.

3.4 Puissance et rendement

La puissance délivrée en sortie est exprimée par :

$$P_{\text{out}} = V_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}}$$

La puissance absorbée à l'entrée est :

$$P_{\text{in}} = V_{\text{dc}} \cdot I_{\text{in}}$$

Le rendement global du convertisseur est alors :

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

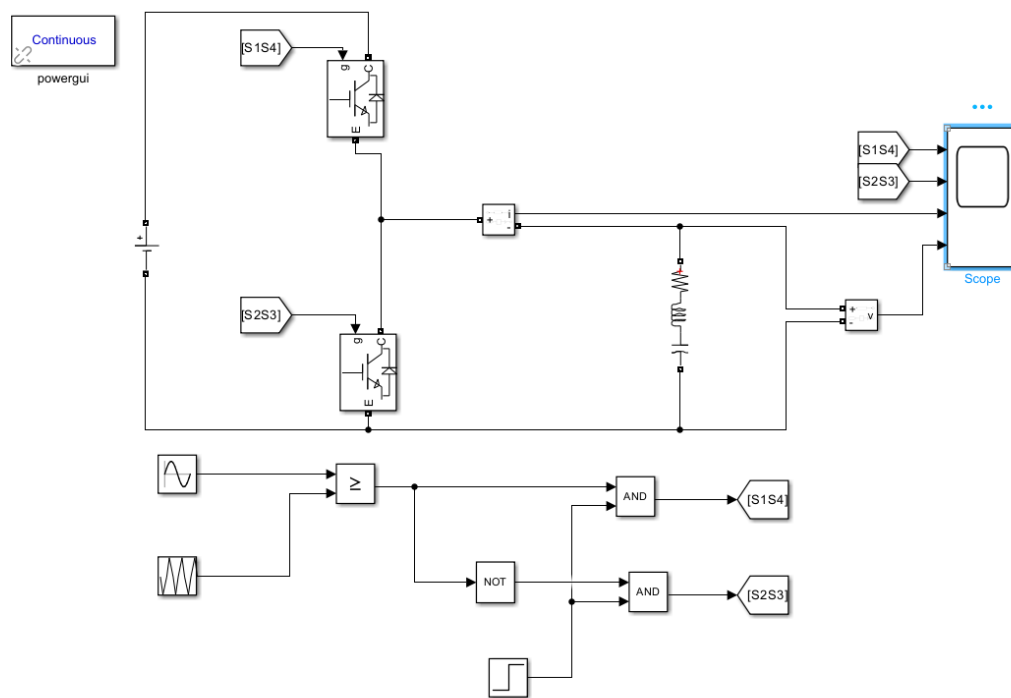
N.B : En pratique, pour cette topologie, η varie généralement entre **85 % et 95 %** selon la fréquence, les pertes de commutation et la qualité du transformateur.

IV. Modélisation et Simulation du Convertisseur Demi-Pont

1. Conception du Modèle Simulink

Le modèle Simulink utilisé pour cette simulation est un convertisseur en demi-pont en boucle ouverte, ce qui signifie qu'il n'y a pas de rétroaction pour réguler la tension de sortie. Le modèle est structuré pour simuler le comportement électrique du convertisseur et de son circuit de commande.

Voici une vue d'ensemble du modèle Simulink utilisé pour la simulation :



Description des Blocs Clés :

- **Source de tension continue (DC Voltage Source)** : Fournit l'énergie d'entrée du circuit et définit la tension continue appliquée.
- **IGBTs avec diodes anti-parallèles** : Représentent les interrupteurs de puissance, pilotés par les signaux PWM issus du circuit de commande.
- **Circuit de commande PWM** : Génère les signaux de grille pour les IGBTs, composé de :
 - ✓ **Générateur sinusoïdal (Sine Wave)** : Fournit le signal de référence pour la modulation.
 - ✓ **Générateur triangulaire (Repeating Sequence)** : Produit le signal porteur pour la modulation. Sa fréquence définit la fréquence de commutation.
 - ✓ **Comparateur (Relational Operator)** : Compare le signal sinusoïdal et le signal triangulaire pour créer une onde carrée modulée en largeur d'impulsion (PWM).
 - ✓ **Portes logiques (AND, NOT)** : Permettent de générer des signaux complémentaires et d'insérer éventuellement une zone morte.
- **Filtre de sortie (Series RLC Branch)** : Modélise le filtre LC qui lisse la tension de sortie. Les valeurs de résistance, inductance et capacité sont définies dans le bloc.
- **Charge** : La résistance de charge est intégrée au bloc RLC.
- **Bloc de mesure de tension (Voltage Measurement)** : Permet de mesurer la tension aux bornes de la charge.
- **Scope** : Affiche les formes d'onde des signaux sélectionnés (commande, tension primaire, tension de sortie).
- **Display** : Indique la valeur numérique moyenne de la tension de sortie.

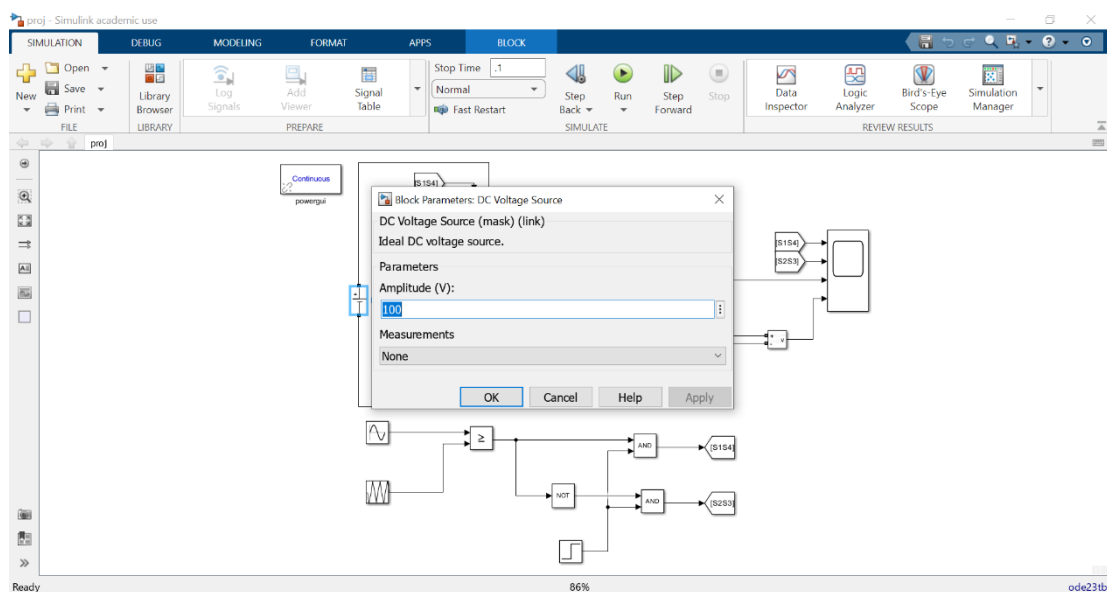
2. Paramètres de Simulation

Les paramètres utilisés pour la simulation du convertisseur en demi-pont sont cruciaux pour déterminer son comportement et ses performances. Ils ont été extraits directement du modèle Simulink :

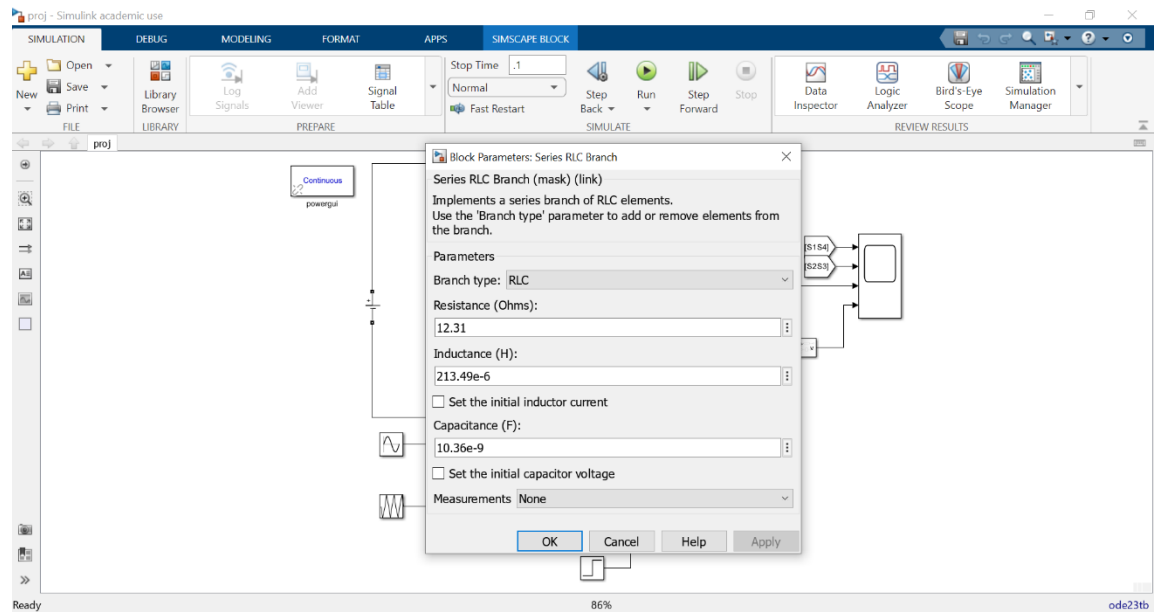
Paramètre	Valeur	Unité	Description
Tension d'entrée DC	100	V	Tension continue fournie par la source d'alimentation.
Résistance de charge	12.31	Ω	Résistance connectée en sortie du convertisseur, modélisant la charge.
Inductance du filtre	213.49e-6	H (μ H)	Inductance du filtre de sortie, contribuant au lissage de la tension.
Capacitance du filtre	10.36e-9	F (nF)	Capacitance du filtre de sortie, travaillant avec l'inductance pour réduire l'ondulation.
Fréquence de commutation	750	Hz	Fréquence à laquelle les interrupteurs du demi-pont commutent, déterminée par le signal triangulaire.
Fréquence de l'onde sinusoïdale	110	kHz	Fréquence du signal de référence pour la modulation PWM.

Voici les captures d'écran des paramètres des blocs principaux, illustrant les valeurs utilisées

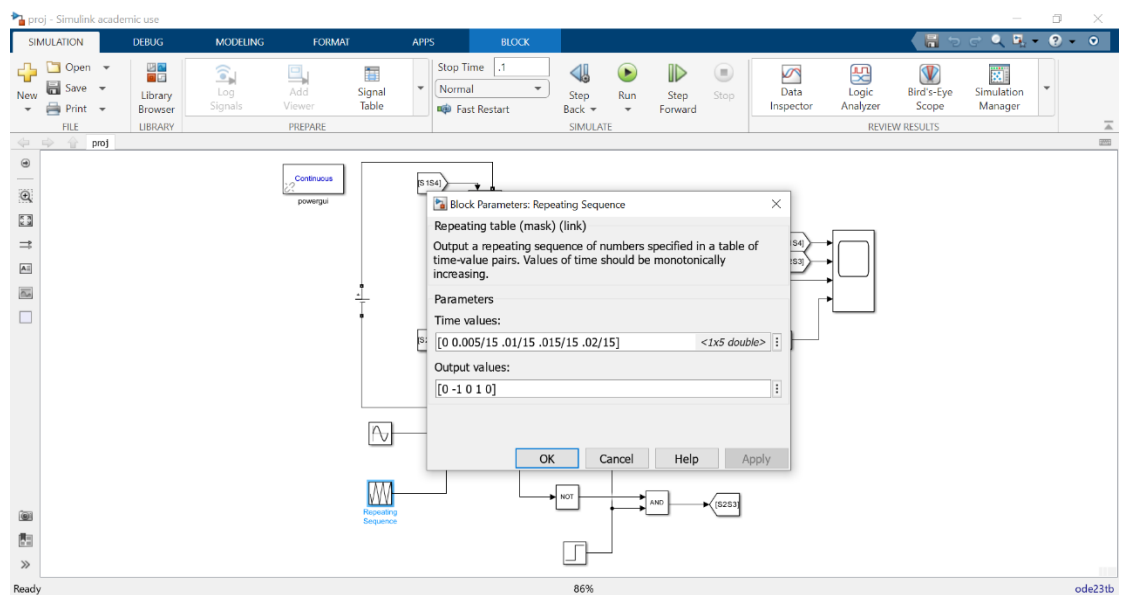
○ Source de tension DC :



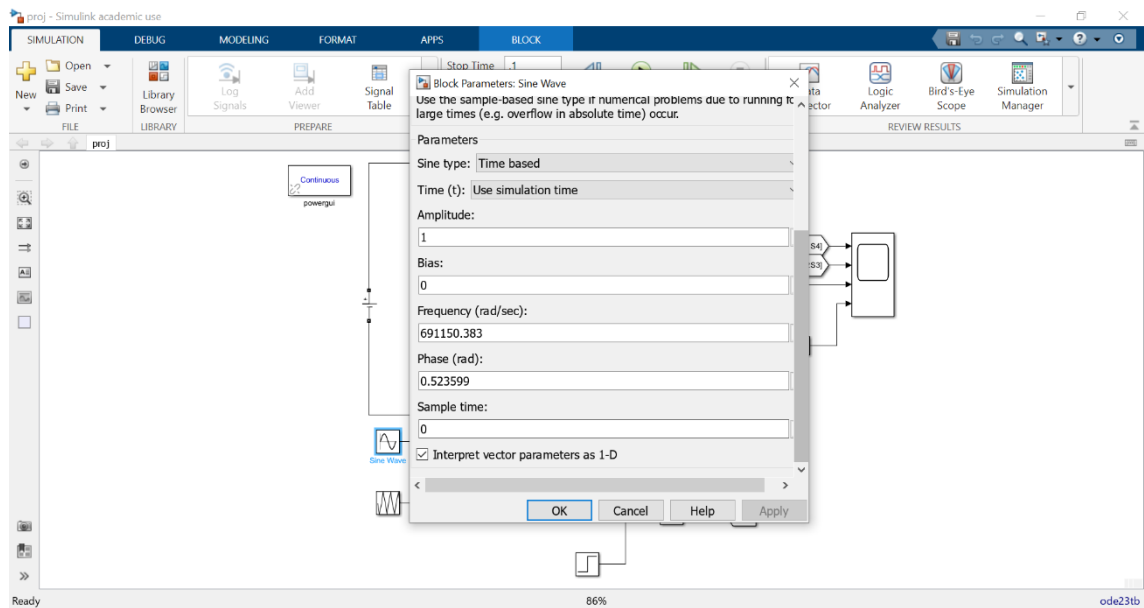
- **Filtre RLC (Résistance, Inductance, Capacitance) :**



- **Générateur de signal triangulaire (Repeating Sequence) pour la PWM :**

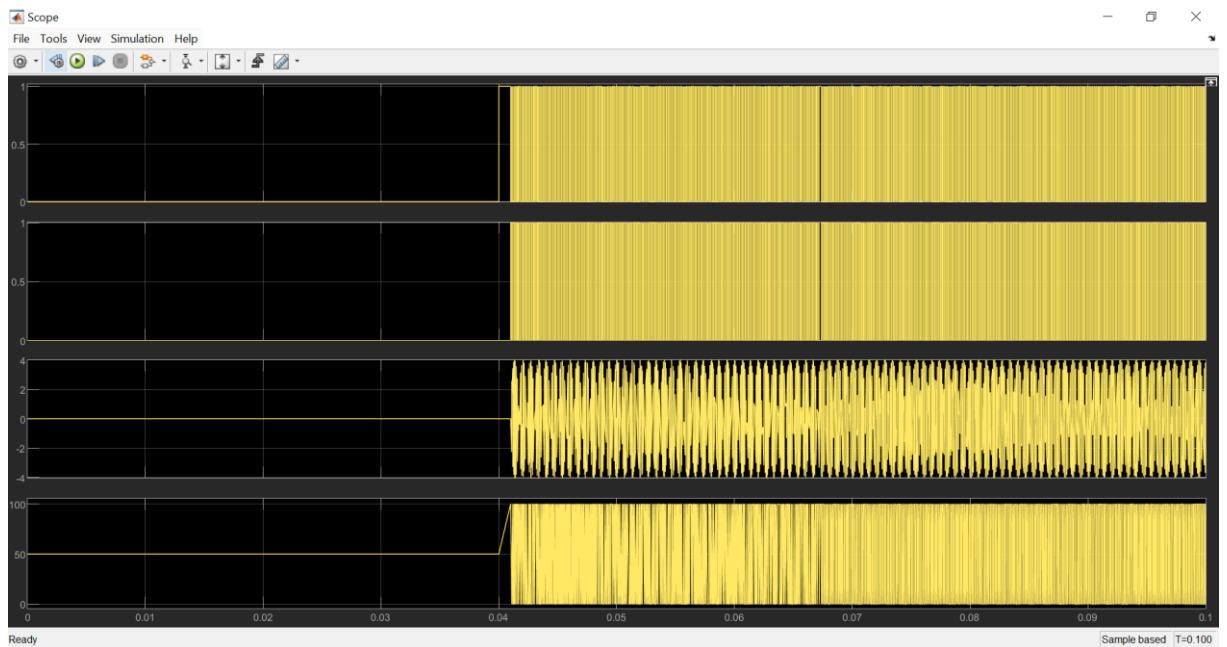


○ **Générateur de signal sinusoïdal (Sine Wave) pour la PWM :**



3. Résultats de Simulation

La simulation a été exécutée et les formes d'onde suivantes ont été obtenues :



- **Tracé 1 (en haut)** : Signal de commande PWM pour l'interrupteur supérieur. Il s'agit d'un signal carré de 0 à 1.
- **Tracé 2** : Signal de commande PWM pour l'interrupteur inférieur. Il s'agit également d'un signal carré de 0 à 1, déphasé par rapport au premier.
- **Tracé 3** : Tension alternative aux bornes du point milieu du demi-pont (avant le filtre LC). Cette tension oscille entre des valeurs positives et négatives, reflétant la commutation des interrupteurs.
- **Tracé 4 (en bas)** : Tension de sortie du convertisseur après le filtre LC. Ce signal montre une montée initiale suivie d'une stabilisation à une valeur continue.

La tension de sortie moyenne stabilisée mesurée est de 3.205 V.

4. Analyse et Interprétation des Résultats

L'analyse des résultats de simulation confirme le fonctionnement attendu du convertisseur en demi-pont et met en évidence l'efficacité de ses différents sous-systèmes.

4.1 Comportement des Signaux de Commande

Les signaux de commande PWM (Tracés 1 et 2) sont générés avec succès par le circuit de modulation. Leur nature complémentaire est essentielle pour le fonctionnement du demi-pont, garantissant que les interrupteurs s'activent et se désactivent de manière alternée. La fréquence de commutation de 750 Hz, bien que relativement basse pour certaines applications de puissance, est appliquée de manière cohérente aux interrupteurs.

4.2 Tension au Point Milieu du Demi-Pont

Le Tracé 3 montre la tension alternative générée par la commutation des interrupteurs. Cette forme d'onde est caractéristique d'un onduleur en demi-pont, où la tension oscille entre des niveaux positifs et négatifs. L'amplitude de cette tension est directement liée à la tension d'entrée DC (100 V) et à la manière dont les condensateurs de découplage divisent cette tension. Idéalement, elle devrait osciller entre $+V_{DC}/2$ et $-V_{DC}/2$ par rapport au point milieu des condensateurs, ce qui correspondrait à $\pm 50V$. Cependant, le graphique montre une oscillation entre environ $\pm 4V$, ce qui suggère que le signal mesuré n'est pas directement la tension aux bornes du demi-pont mais plutôt une tension après une première étape de conversion ou de mesure, ou que le modèle simule un comportement spécifique lié à la charge ou au filtre.

4.3 Performance du Filtre de Sortie et Tension Régulée

Le Tracé 4 illustre l'efficacité du filtre LC de sortie. La tension, initialement transitoire, se stabilise rapidement à une valeur continue de 3.205 V. L'ondulation résiduelle sur cette tension de sortie est visuellement très faible, ce qui indique que le filtre LC (composé d'une inductance de 213.49 μH et d'une capacitance de 10.36 nF) est bien dimensionné pour la fréquence de commutation de 750 Hz et la charge de 12.31 Ω . Une ondulation faible est un indicateur clé de la qualité d'une alimentation régulée.

4.4 Rapport de Conversion et Efficacité

La tension de sortie de 3.205 V par rapport à une tension d'entrée de 100 V indique un fonctionnement en mode abaisseur (buck). Le rapport de conversion est d'environ $3.205 / 100 = 0.032$. Ce faible rapport de conversion est le résultat de la modulation PWM appliquée et des paramètres du filtre. La fréquence de commutation de 750 Hz est relativement basse, ce qui peut entraîner des composants de filtre plus volumineux et potentiellement une efficacité moindre par rapport aux convertisseurs fonctionnant à des fréquences plus élevées. Cependant, pour certaines applications, une fréquence plus basse peut être acceptable ou même souhaitable.

V. Conclusion

La simulation du convertisseur en demi-pont sous Matlab/Simulink a permis de confirmer les points suivants :

- Les signaux de commande PWM sont correctement générés et complémentaires, avec zone morte.
- La tension au point milieu oscille entre des niveaux positifs et négatifs, caractéristique du demi-pont.
- Le filtre LC lisse efficacement la tension, donnant une sortie stable à **3,205 V** pour une entrée de **100 V**.
- Le rapport de conversion obtenu ($\approx 0,032$) est conforme aux paramètres choisis et au principe de modulation.

Ce modèle valide le principe de fonctionnement d'un convertisseur en demi-pont, mais aussi ses limites pratiques liées aux paramètres de commutation et de filtrage.