Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Master Académique : CE+RE+ERE
TP : Electronique de puissance avancée

TP. N° : 02

Modélisation et simulation d'un onduleur triphasé à structure NPC à trois niveaux

Objectif

Ce TP a comme objectifs d'apprendre :
- La modélisation d'un onduleur à trois niveaux de type NPC,
- La simulation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC contrôlé par différentes techniques de modulation sinusoïdale,
- La programmation dans l'environnement Simulink en utilisant l'outil *Embedded MATLAB Function*.

Présentation de l'onduleur de tension triphasé à structure NPC

L'onduleur à trois niveaux de la figure (1) est composé de trois bras identiques, chacun est constitué de quatre interrupteurs bidirectionnels et deux diodes de bouclage. Un interrupteur bidirectionnel est constitué d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Les différents interrupteurs sont supposés parfaits, c'est à dire, les phénomènes dus à la commutation sont négligés ainsi que les chutes de tension aux bornes des interrupteurs actifs. On suppose également que les tensions aux bornes des deux condensateurs d'entrée sont constantes et égale à la moitié de la tension du bus continu.

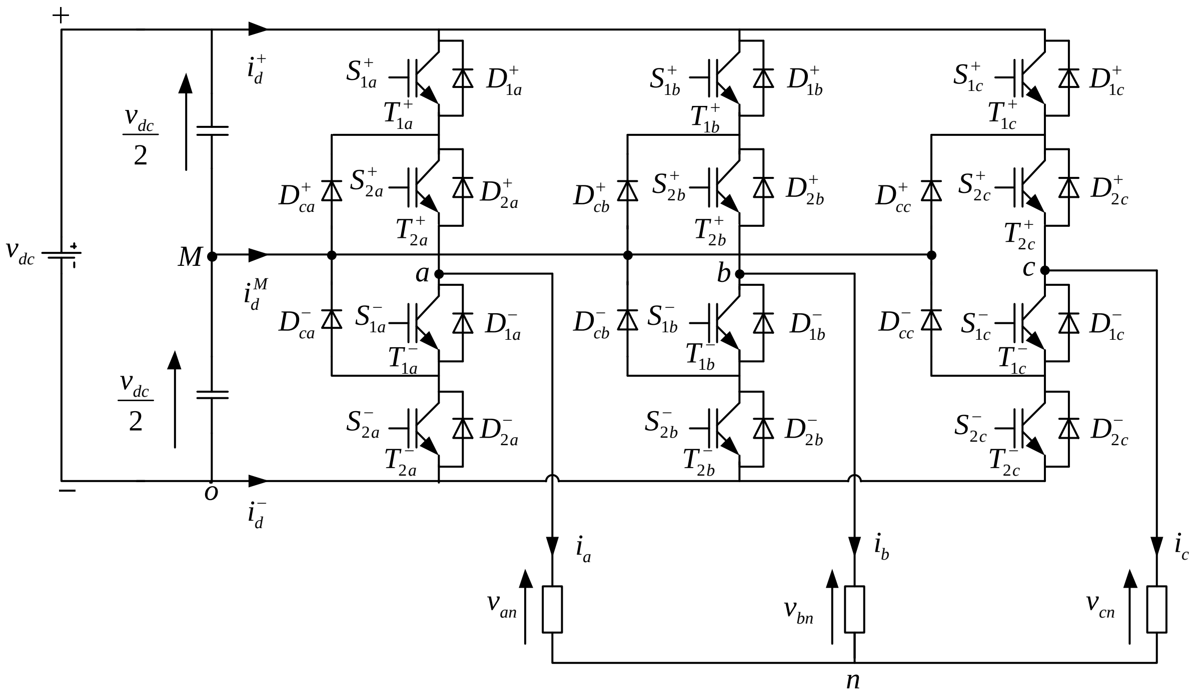

Figure (1) : Schéma de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC

Modélisation de l'onduleur triphasé de type NPC à trois niveaux

- Fonction de connexion d'un interrupteur

Chaque interrupteur supposé idéal est modélisé par une fonction logique de connexion définie par:

$$\mathbf{S_{ik}^{*}} = \begin{cases} 1 & \textbf{si } \mathbf{T_{ik}^{*}} \textbf{ est fermé et } \mathbf{T_{ik}^{*}} \textbf{ est ouvert} \\ 0 & \textbf{si } \mathbf{T_{ik}^{*}} \textbf{ est ouvert et } \mathbf{T_{ik}^{*}} \textbf{ est fermé} \end{cases}, \quad \mathbf{* = +, -;} \quad \mathbf{i = 1, 2;} \quad \mathbf{k = a, b, c}$$

Les fonctions de connexion des interrupteurs situés sur les demi-bras supérieur et inférieur sont liées par la commande complémentaire suivante :

$$\mathbf{S_{ik}^{-}} = \overline{\mathbf{S}}_{\mathbf{ik}}^{+} = 1 - \mathbf{S_{ik}^{+}}$$

- Fonctions de connexion d'un demi-bras

La fonction de connexion d'un demi-bras, notée $\mathbf{F_{k}^{*}}$, est exprimée à l'aide des fonctions de connexion des interrupteurs par :

$$\mathbf{F_{k}^{*}} = \mathbf{S_{1k}^{*} S_{2k}^{*};} \quad \mathbf{* = +, -;} \quad \mathbf{k = a, b, c}$$

Donc les fonctions de connexion des six demi-bras d'un onduleur triphasé à trois niveaux sont exprimées par :

$$\begin{aligned} \mathbf{F_{a}^{+}} &= \mathbf{S_{1a}^{+} S_{2a}^{+}}, \quad \mathbf{F_{a}^{-}} = \mathbf{S_{1a}^{-} S_{2a}^{-}} \\ \mathbf{F_{b}^{+}} &= \mathbf{S_{1b}^{+} S_{2b}^{+}}, \quad \mathbf{F_{b}^{-}} = \mathbf{S_{1b}^{-} S_{2b}^{-}} \\ \mathbf{F_{c}^{+}} &= \mathbf{S_{1c}^{+} S_{2c}^{+}}, \quad \mathbf{F_{c}^{-}} = \mathbf{S_{1c}^{-} S_{2c}^{-}} \end{aligned}$$

- Tensions de phase par rapport au point milieu du bus continu

Le potentiel du nœud «k » d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux par rapport au point milieu «M» est donné par :

$$\mathbf{v_{kM}} = \mathbf{F_{k}^{+}} \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} - \mathbf{F_{k}^{-}} \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} = (\mathbf{F_{k}^{+}} - \mathbf{F_{k}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} = (\mathbf{S_{1k}^{+} S_{2k}^{+}} - \mathbf{S_{1k}^{-} S_{2k}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2}$$

Les trois tensions $\mathbf{v_{aM}}$, $\mathbf{v_{bM}}$ et $\mathbf{v_{cM}}$ sont exprimées donc par :

$$\mathbf{v_{aM}} = (\mathbf{S_{1a}^{+} S_{2a}^{+}} - \mathbf{S_{1a}^{-} S_{2a}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2}$$

$$\mathbf{v_{bM}} = (\mathbf{S_{1b}^{+} S_{2b}^{+}} - \mathbf{S_{1b}^{-} S_{2b}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2}$$

$$\mathbf{v_{cM}} = (\mathbf{S_{1c}^{+} S_{2c}^{+}} - \mathbf{S_{1c}^{-} S_{2c}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2}$$

- Tensions composées

Les tensions composées $\mathbf{u_{ab}}$, $\mathbf{u_{bc}}$ et $\mathbf{u_{ca}}$ sont obtenues à partir des relations suivantes:

$$\begin{cases} \mathbf{u_{ab}} = \mathbf{v_{aM}} - \mathbf{v_{bM}} = (\mathbf{S_{1a}^{+} S_{2a}^{+}} - \mathbf{S_{1a}^{-} S_{2a}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} - (\mathbf{S_{1b}^{+} S_{2b}^{+}} - \mathbf{S_{1b}^{-} S_{2b}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} = ((\mathbf{S_{1a}^{+} S_{2a}^{+}} - \mathbf{S_{1a}^{-} S_{2a}^{-}}) - (\mathbf{S_{1b}^{+} S_{2b}^{+}} - \mathbf{S_{1b}^{-} S_{2b}^{-}})) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} \\ \mathbf{u_{bc}} = \mathbf{v_{bM}} - \mathbf{v_{cM}} = (\mathbf{S_{1b}^{+} S_{2b}^{+}} - \mathbf{S_{1b}^{-} S_{2b}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} - (\mathbf{S_{1c}^{+} S_{2c}^{+}} - \mathbf{S_{1c}^{-} S_{2c}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} = ((\mathbf{S_{1b}^{+} S_{2b}^{+}} - \mathbf{S_{1b}^{-} S_{2b}^{-}}) - (\mathbf{S_{1c}^{+} S_{2c}^{+}} - \mathbf{S_{1c}^{-} S_{2c}^{-}})) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} \\ \mathbf{u_{ca}} = \mathbf{v_{cM}} - \mathbf{v_{aM}} = (\mathbf{S_{1c}^{+} S_{2c}^{+}} - \mathbf{S_{1c}^{-} S_{2c}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} - (\mathbf{S_{1a}^{+} S_{2a}^{+}} - \mathbf{S_{1a}^{-} S_{2a}^{-}}) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} = ((\mathbf{S_{1c}^{+} S_{2c}^{+}} - \mathbf{S_{1c}^{-} S_{2c}^{-}}) - (\mathbf{S_{1a}^{+} S_{2a}^{+}} - \mathbf{S_{1a}^{-} S_{2a}^{-}})) \frac{\mathbf{v_{dc}}}{2} \end{cases}$$

- Tensions simples

Soit « n » le point neutre du coté alternatif de la charge, alors on a :

$$\begin{cases} v_{aM} = v_{an} + v_{nM} \\ v_{bM} = v_{bn} + v_{nM} \\ v_{cM} = v_{cn} + v_{nM} \end{cases}$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte que :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$$

La somme des tensions v_{aM}, v_{bM} et v_{cM} conduit, en utilisant l'équation précédente, à l'expression de la tension v_{nM} donnée par :

$$v_{nM} = \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM})$$

Les trois tensions simples de sortie de l'onduleur en fonction des tensions v_{aM}, v_{bM} et v_{cM} sont calculées donc par :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{aM} - v_{nM} = v_{aM} - \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}) = \frac{2}{3}v_{aM} - \frac{1}{3}v_{bM} - \frac{1}{3}v_{cM} \\ v_{bn} = v_{bM} - v_{nM} = v_{bM} - \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}) = -\frac{1}{3}v_{aM} + \frac{2}{3}v_{bM} - \frac{1}{3}v_{cM} \\ v_{cn} = v_{cM} - v_{nM} = v_{cM} - \frac{1}{3}(v_{aM} + v_{bM} + v_{cM}) = -\frac{1}{3}v_{aM} - \frac{1}{3}v_{bM} + \frac{2}{3}v_{cM} \end{cases}$$

Les trois tensions simples de sortie de l'onduleur NPC sont exprimées en termes des fonctions de connexion des interrupteurs par :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{2}{3}(S_{1a}^{+}S_{2a}^{+} - S_{1a}^{-}S_{2a}^{-})\frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(S_{1b}^{+}S_{2b}^{+} - S_{1b}^{-}S_{2b}^{-})\frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(S_{1c}^{+}S_{2c}^{+} - S_{1c}^{-}S_{2c}^{-})\frac{v_{dc}}{2} \\ v_{bn} = -\frac{1}{3}(S_{1a}^{+}S_{2a}^{+} - S_{1a}^{-}S_{2a}^{-})\frac{v_{dc}}{2} + \frac{2}{3}(S_{1b}^{+}S_{2b}^{+} - S_{1b}^{-}S_{2b}^{-})\frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(S_{1c}^{+}S_{2c}^{+} - S_{1c}^{-}S_{2c}^{-})\frac{v_{dc}}{2} \\ v_{cn} = -\frac{1}{3}(S_{1a}^{+}S_{2a}^{+} - S_{1a}^{-}S_{2a}^{-})\frac{v_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(S_{1b}^{+}S_{2b}^{+} - S_{1b}^{-}S_{2b}^{-})\frac{v_{dc}}{2} + \frac{2}{3}(S_{1c}^{+}S_{2c}^{+} - S_{1c}^{-}S_{2c}^{-})\frac{v_{dc}}{2} \end{cases}$$

Finalement, les tensions simples aux bornes de la charge triphasée équilibrée s'expriment en fonction des fonctions de connections des interrupteurs par la relation matricielle suivante:

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{v_{dc}}{3}\begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} S_{1a}^{+}S_{2a}^{+} - S_{1a}^{-}S_{2a}^{-} \\ S_{1b}^{+}S_{2b}^{+} - S_{1b}^{-}S_{2b}^{-} \\ S_{1c}^{+}S_{2c}^{+} - S_{1c}^{-}S_{2c}^{-} \end{pmatrix}$$

- Courants d'entrée

Les courants d'entrée de l'onduleur i_d^{+}, i_d^{+} et i_{dM} s'expriment en fonction des courants de phase i_k, $k = a, b, c$ et les fonctions de connexion des demi-bras comme suit :

$$i_d^{+} = F_a^{+}i_a + F_b^{+}i_b + F_c^{+}i_c$$

$$i_d^{-} = F_a^{-}i_a + F_b^{-}i_b + F_c^{-}i_c$$

$$i_{dM} = -(i_d^{+} + i_d^{-})$$

<u>Simulation de l'onduleur NPC à trois niveaux commandé par la technique LSPWM</u>

- Principe du technique LSPWM

La technique de modulation sinusoïdale SPWM à porteuses décalées verticalement (Level Shifted PWM, LSPWM) d'un onduleur NPC à trois niveaux consiste à comparer trois tensions de référence à deux porteuses triangulaires de même fréquence et même amplitude. Les trois tensions de référence forment un système triphasé équilibré donné par l'équation suivante :

$$v_{aref} = r\frac{v_{dc}}{2}\sin(2\pi f_r t)$$
$$v_{bref} = r\frac{v_{dc}}{2}\sin(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3})$$
$$v_{cref} = r\frac{v_{dc}}{2}\sin(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3})$$

Où $r \in [0 \quad 1]$ est le taux de modulation et f_r est la fréquence de la référence fixée dans notre cas à 50Hz.

<u>- Schéma de simulation</u>

Le schéma de simulation d'un onduleur NPC à trois niveaux triphasé connecté à une charge ($R = 1\Omega, L = 10mH$) triphasée couplée en étoile est donné par la figure (2). L'onduleur est alimenté par deux sources de tension continue de $100\,V$ chacune.

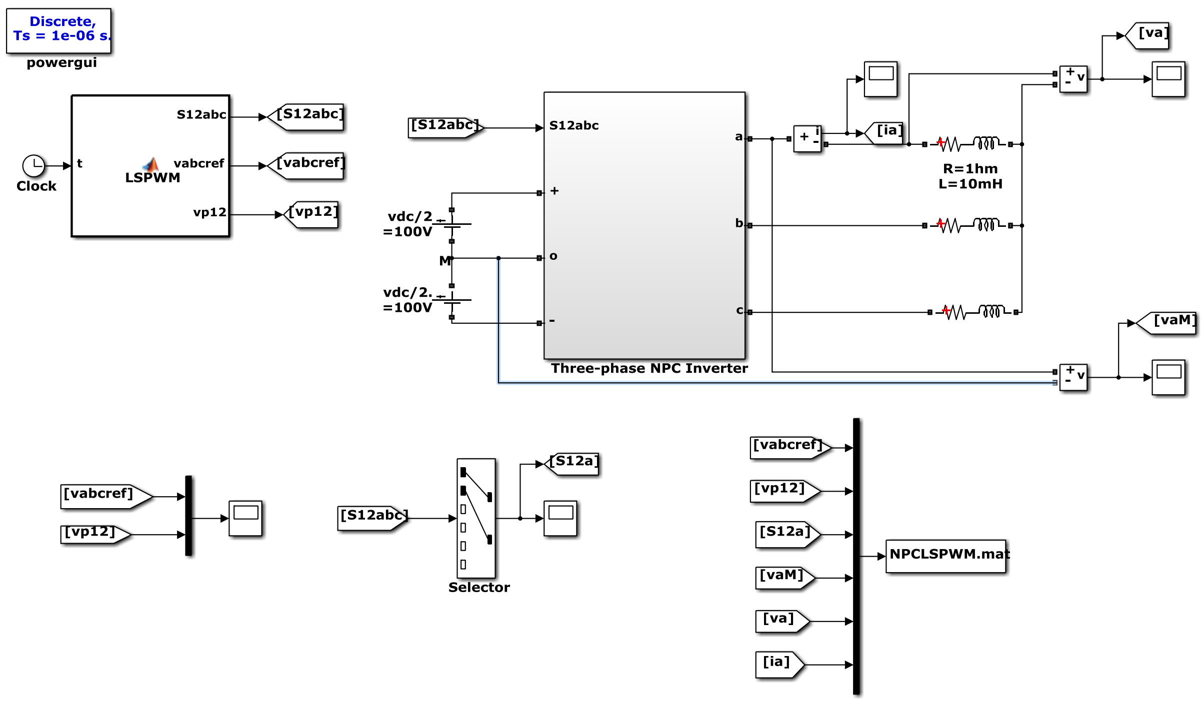

Figure (2) : Schéma block de simulation d'un onduleur triphasé à structure NPC contrôlé par la modulation LSPWM

Le bloc « Three-phase NPC inverter» représente le circuit de puissance de l'onduleur donné par :

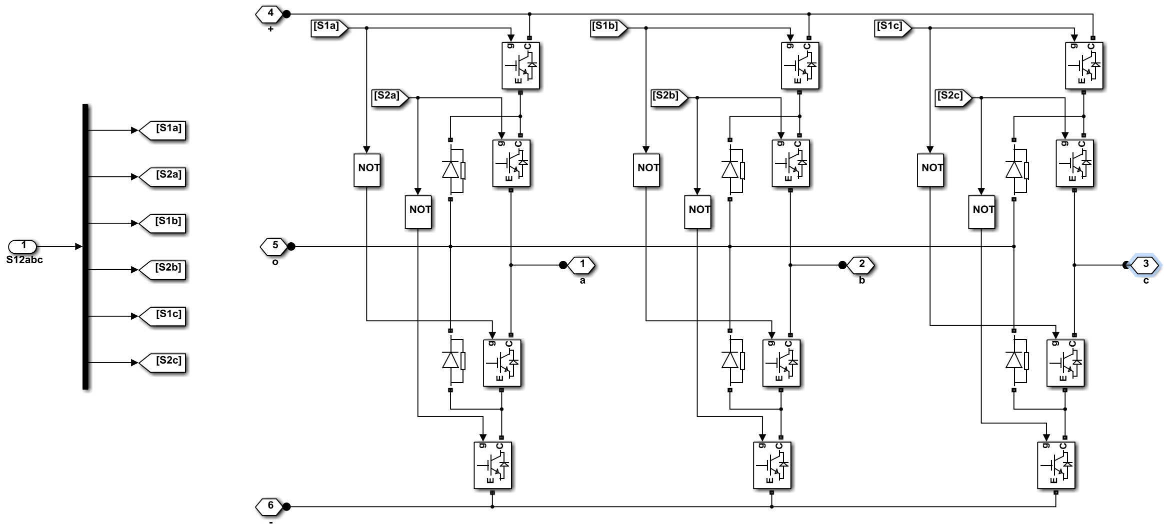

Figure (3) : Schéma block de l'onduleur triphasé à structure NPC

- Implémentation de la technique LSPWM

La technique PWM sinusoïdale à porteuse décalées (LSPWM) est programmée en utilisant le block *Embedded MATLAB Function* (connue aussi sous le nom *Embedded MATLAB Function*). Ce bloc fait partie de la bibliothèque *User Defined Functions*. Il peut être inséré dans un modèle similink de la même manière que tout autre bloc. Le code suivant représente l'implémentation de l'algorithme LSPWM en utilisant *MATLAB Function*.

```
function [S12abc,vabcref,vp12] = LSPWM(t)
%#codegen

% Technique SPWM à porteuses décalées verticalement d'un onduleur NPC à trois niveaux

% Paramètres

% Tension continue
vdc=200;
% Indice de modulation
m=9;
% Taux de modulation
r=0.85;
% Fréquence de la référence
fr=50;
% Fréquence de la porteuse
fp=m*fr;
% Amplitude de la porteuse
Vpm=vdc/2;
% Amplitude de la référence
Vrm=r*Vpm;
% Pulsation de la référence
w=2*pi*fr;

% Tenions de référence

varef=Vrm*sin(w*t);
vbref=Vrm*sin(w*t-2*pi/3);
```

```
vcref=Vrm*sin(w*t+2*pi/3);

% Porteuses triangulaires décalées verticalement

vp1=Vpm*(1/2-asin(cos(2*pi*fp*t))/pi);
vp2=vp1-Vpm;

% Génération des signaux de commande

if varef > vp1, S1a=1; else S1a=0; end
if varef > vp2, S2a=1; else S2a=0; end
if vbref > vp1, S1b=1; else S1b=0; end
if vbref > vp2, S2b=1; else S2b=0; end
if vcref > vp1, S1c=1;  else S1c=0; end
if vcref > vp2, S2c=1;  else S2c=0; end

% Sorties

S12abc=[S1a;S2a;S1b;S2b;S1c;S2c];

vp12=[vp1;vp2];

vabcref=[varef;vbref;vcref];
```

- Tracé des résultats

Pour tracer les résultats obtenus, on peut, dans une première phase, sauvegarder les résultats dans un fichier «.mat». Par la suite, ce fichier est rechargé de nouveau et utilisé pour contrôler le tracé des résultats de simulation. En cliquant deux fois sur le bloc «NPCLSPWM.mat » on obtient la fenêtre de dialogue suivante :

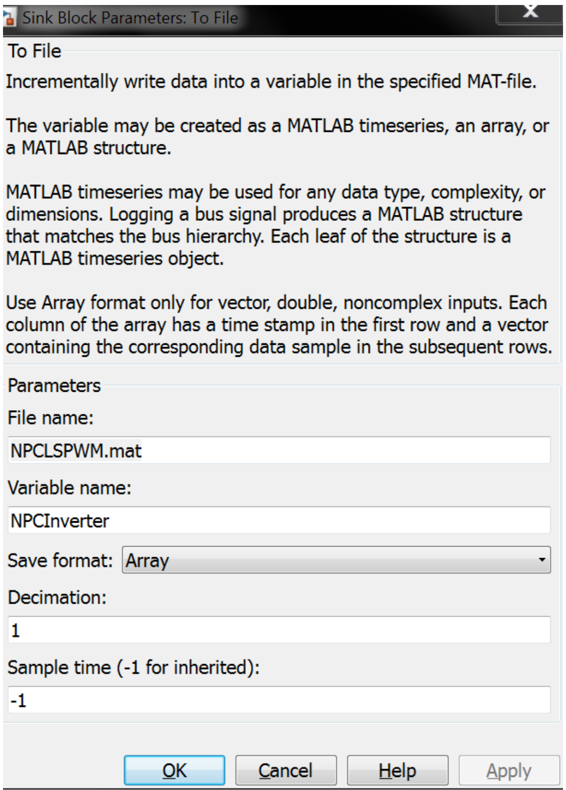

Figure (4) : Sauvegarde des données dans un fichier MAT

Dans la fenêtre de dialogue de la figure (4), le nom de fichier et le nom de la variable doivent être spécifiés. Le format de sauvegarde doit être sélectionné comme «Array».

Le programme suivant permet de recharger le fichier NPCLSPWM.mat et de tracer les résultats.

```
clc; clear all; close all;

load NPCLSPWM.mat

t=NPCInverter(1,:);
varef=NPCInverter(2,:);
vbref=NPCInverter(3,:);
vcref=NPCInverter(4,:);
vp1=NPCInverter(5,:);
vp2=NPCInverter(6,:);
S1a=NPCInverter(7,:);
S2a=NPCInverter(8,:);
vaM=NPCInverter(9,:);
va=NPCInverter(10,:);
ia=NPCInverter(11,:);

taille=9;

figure(1)
plot(t,varef,'k',t,vbref,'k',t,vcref,'k',t,vp1,'k--',t,vp2,'k-.');
xlabel('Temps (s)','FontSize',taille,'FontName','times new roman',
'FontWeight','bold');
ylabel('v_a_b_c_r_e_f, v_p_1, v_p_2','FontSize',taille,'FontName','times new
roman','FontWeight','bold');
axis([0.04 0.06 -105 105])

figure(2)
plot(t,S1a,'k',t,S2a,'k--');
xlabel('Temps (s)','FontSize',taille,'FontName','times new roman',
'FontWeight','bold');
ylabel('S_1_a, S_2_a','FontSize',taille,'FontName','times new
roman','FontWeight','bold');

axis([0.04 0.06 0 1.01])

figure(3)
plot(t,vaM,'k')
xlabel('Temps (s)','FontSize',taille,'FontName','times new
roman','FontWeight','bold');
ylabel('v_a_M (V)','FontSize',taille,'FontName','times new
roman','FontWeight','bold');
axis([0.04 0.06 -105 105])

figure(4)
plot(t,va,'k')
xlabel('Temps (s)','FontSize',taille,'FontName','times new roman',
'FontWeight','bold');
ylabel('v_a (V)','FontSize',taille,'FontName','times new roman',
'FontWeight','bold');
axis([0.04 0.08 -140 140])
```

```
figure(5)
plot(t,ia,'k')
xlabel('Temps (s)','FontSize',taille,'FontName','times new roman',
'FontWeight','bold');
ylabel('i_a (V)','FontSize',taille,'FontName','times new roman',
'FontWeight','bold');
axis([0.04 0.08 -30 30])
```

- Travail demandé

1- Simulation de la technique LSPWM

a) Tracer les signaux des trois références, les deux porteuses ainsi que les deux signaux de commande S_{1a}^{+} et S_{2a}^{+}.

b) Tracer les formes de la tension par rapport au point milieu, de la tension simple et le courant de la première phase.

c) Tracer le spectre harmonique de la tension de la première phase pour les 100 premières harmoniques.

d) Remplir le tableau suivant représentant la variation du taux de distorsion harmonique (THD) et l'amplitude du fondamental de la tension de phase (V_{a1}) en fonction du taux de modulation r.

r	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
THD															
V_{a1}															

Tracer les variations du taux de distorsion harmonique et le fondamental de la tension de la première phase en fonction du taux de modulation. Commenter les résultats.

e) Comparer les modulations sinusoïdales en termes de THD lorsque les porteuses sont en phase (PD) et en opposition de phase (POD).

2- Simulation de la technique LSPWM avec injection de l'harmonique trois

Il est possible d'améliorer la qualité de réglage en injectant la troisième harmonique dans les tensions de référence. Il faut noter que cette injection n'affecte pas la qualité de la tension simple ou composée du fait que la tension de sortie de l'onduleur triphasé ne contient pas des harmoniques multiples de trois. Les nouvelles tensions de référence seront donc :

$$v'_{kref} = v_{kref} + a\frac{V_{dc}}{2}\sin(6\pi f_r t),\ \ k = a, b, c$$

a°) Quel est l'objectif de l'injection de l'harmonique trois dans les tensions de référence ?

b°) Montrer que le taux optimal d'injection est: $a = 1/6$.

c°) Refaire le travail demandé dans le paragraphe précédent. Conclusions ?

d°) Si on ajoute cette fois-ci la composante v_{offset} dit « zéro-sequence voltage » aux tensions de références sinusoïdales pour obtenir de nouvelles références définies par :

$$\begin{aligned} v''_{aref} &= v_{aref} + v_{offset} \\ v''_{bref} &= v_{bref} + v_{offset} \qquad \text{avec} \quad v_{offset} = -\frac{\max(v_{aref}, v_{bref}, v_{cref}) + \min(v_{aref}, v_{bref}, v_{cref})}{2} \\ v''_{cref} &= v_{cref} + v_{offset} \end{aligned}$$

A quoi sert cette injection et en quoi elle différente par rapport à l'injection de l'harmonique trois.

3- Ecrire un programme utilisant *Embedded MATLAB Function* qui permet la simulation de la modulation sinusoïdale avec porteuses déphasées (Phase Shifted PWM, PSPWM)