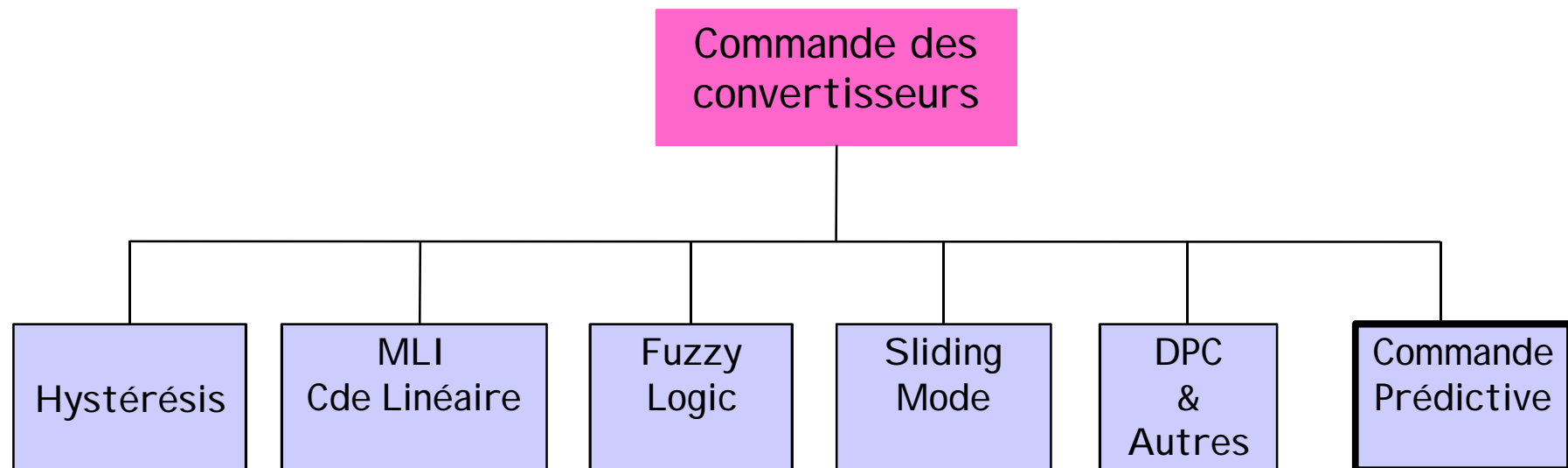




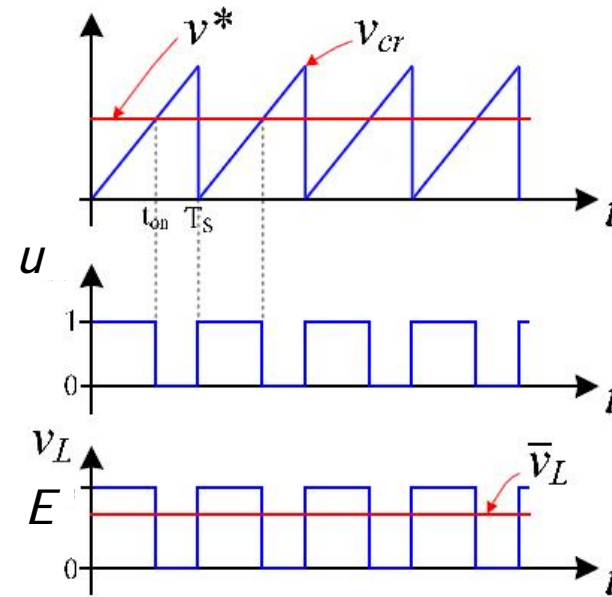
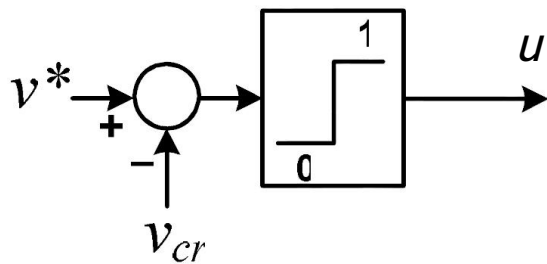
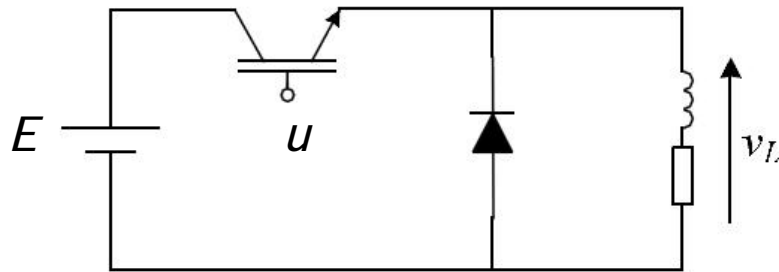
Laboratoire Plasma et Conversion d'énergie : LAPLACE

Commande Prédicative des Convertisseurs Statiques

Classification des méthodes de commande pour les convertisseurs statiques



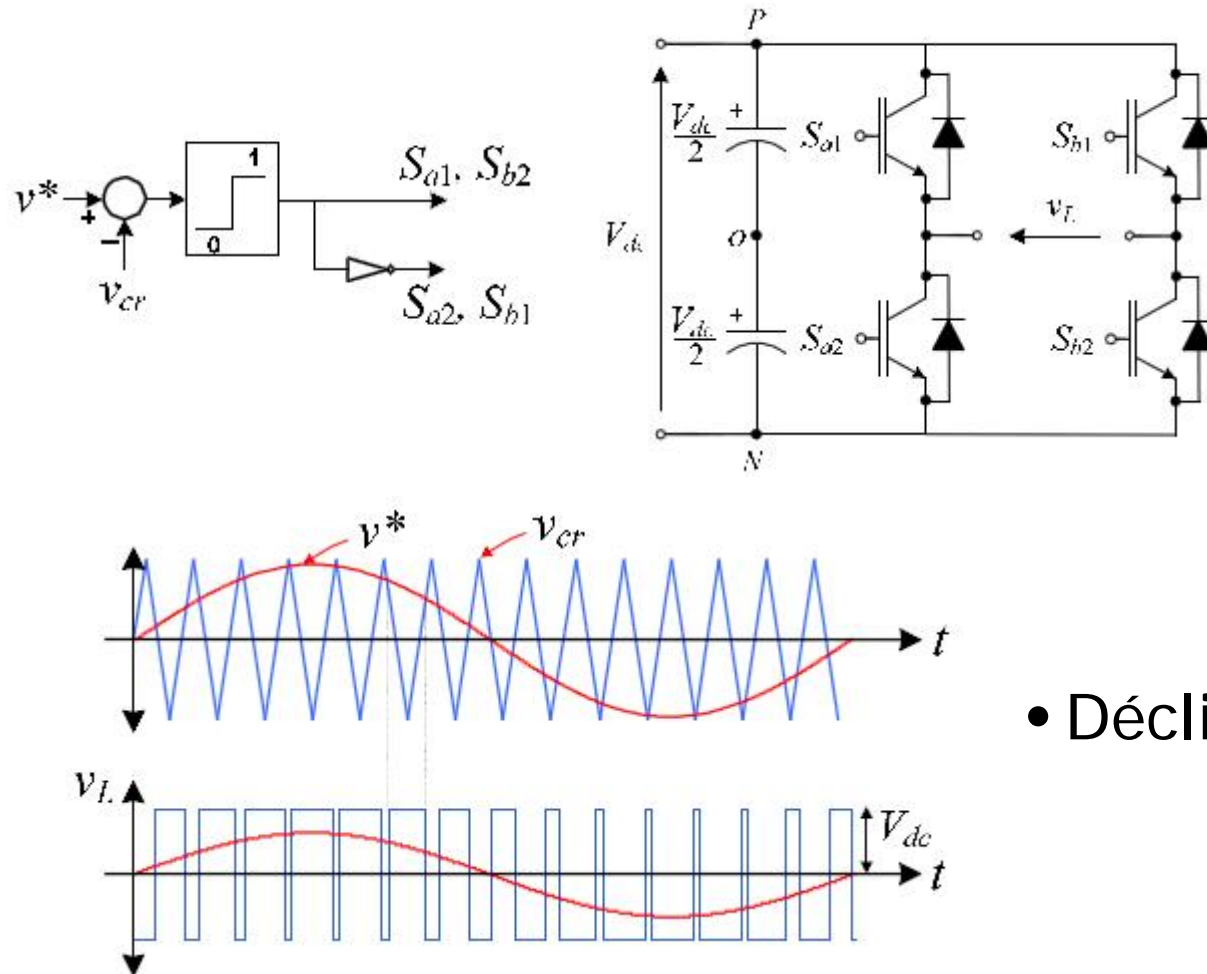
MLI (Approche traditionnelle en valeur moyenne)



Principe ancien issu de la Cde analogique et re-déployé en commande numérique

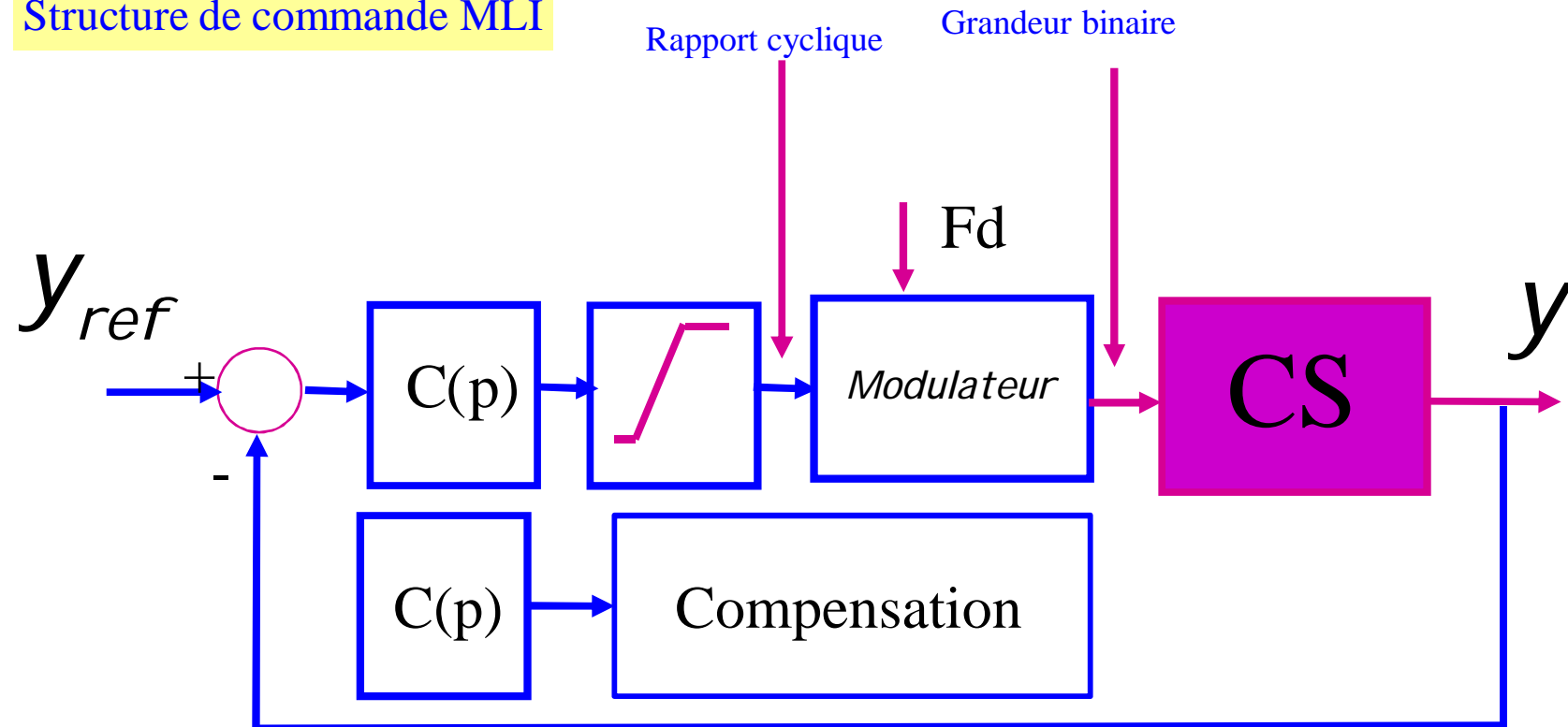
$$\bar{V}_L = \frac{t_{on}}{T_d} \cdot E = E \cdot \alpha$$

α : rapport cyclique



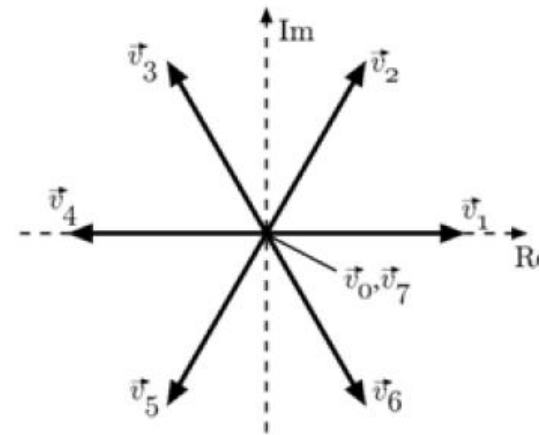
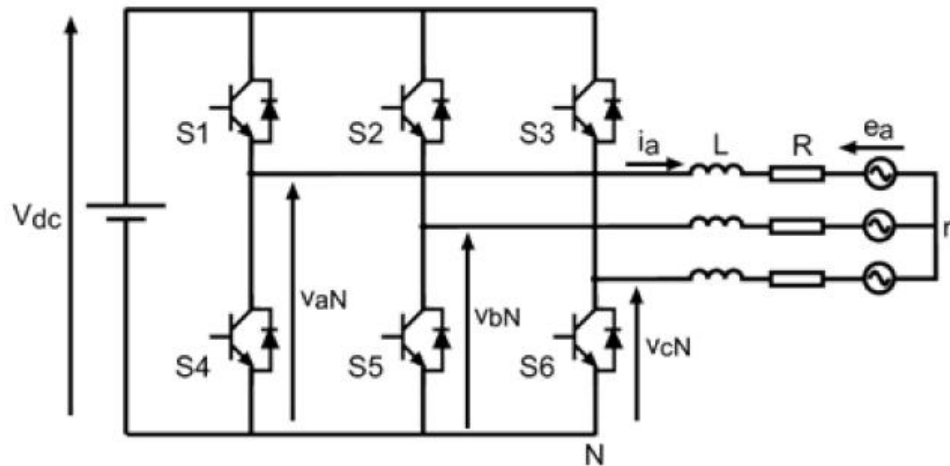
- Déclinaisons nombreuses

Structure de commande MLI



- Association Correcteur + Modulateur
- Plusieurs structures de réglages peuvent être associées à différentes méthodes de calcul de régulateur
- Compensation des NL par inversion de modèle

Commande Prédicative d'un Convertisseur triphasé



$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{if } S_1 \text{ on and } S_4 \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_1 \text{ off and } S_4 \text{ on} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{if } S_2 \text{ on and } S_5 \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_2 \text{ off and } S_5 \text{ on} \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{if } S_3 \text{ on and } S_6 \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_3 \text{ off and } S_6 \text{ on} \end{cases}$$

Space vectors

$$\mathbf{S} = \frac{2}{3}(S_a + \mathbf{a}S_b + \mathbf{a}^2S_c)$$

$$\mathbf{v} = \frac{2}{3}(v_{aN} + \mathbf{a}v_{bN} + \mathbf{a}^2v_{cN})$$

$$\mathbf{v} = V_{dc}\mathbf{S}$$

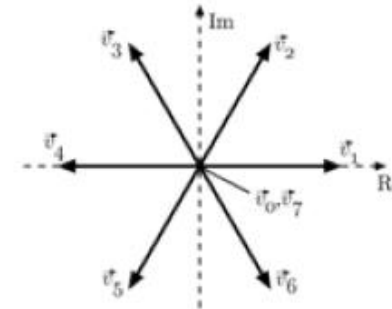
Principe de la commande Prédictive

CS représenté par une machine à états

Un modèle de la charge est utilisé pour prédire l'évolution du courant en fonction de chacun des états possibles

Une fonction coût est défini pour traduire le comportement souhaité.

Sélection de la combinaison minimisant le critère choisi.

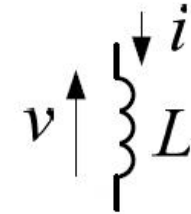


$$i(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (v(k) - e(k))$$

$$g = |i_\alpha^* - i_\alpha^p| + |i_\beta^* - i_\beta^p|$$

$$g_{\min} = \min \{ g \}$$

- Example: Prediction of the current in an inductance



- Continuous time equation

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{v(t)}{L} \quad (1)$$

- Discrete-time equation

$$\frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} = \frac{v(k)}{L} \quad (2)$$

- Equation for prediction (obtained from (2))

$$i(k+1) = i(k) + \frac{T_s}{L}v(k) \quad (3)$$

Cas de l'Onduleur triphasé

$$\mathbf{v} = R\mathbf{i} + L\frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{e}$$

where

$$\mathbf{v} = \frac{2}{3}(v_{aN} + \mathbf{a}v_{bN} + \mathbf{a}^2v_{cN})$$

$$\mathbf{i} = \frac{2}{3}(i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2i_c)$$

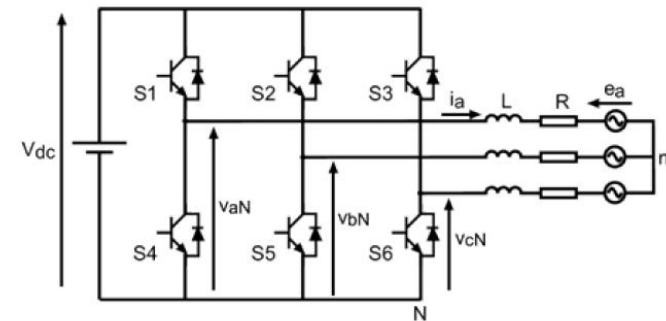
$$\mathbf{e} = \frac{2}{3}(e_a + \mathbf{a}e_b + \mathbf{a}^2e_c)$$

- Discrete-time equations

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} \approx \frac{\mathbf{i}(k+1) - \mathbf{i}(k)}{T_s}$$

$$\mathbf{i}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \mathbf{i}(k) + \frac{T_s}{L} (\mathbf{v}(k) - \mathbf{e}(k))$$

$$\hat{\mathbf{e}}(k) = \mathbf{v}(k) + \frac{L}{T_s} \mathbf{i}(k-1) - \frac{RT_s + L}{T_s} \mathbf{i}(k)$$

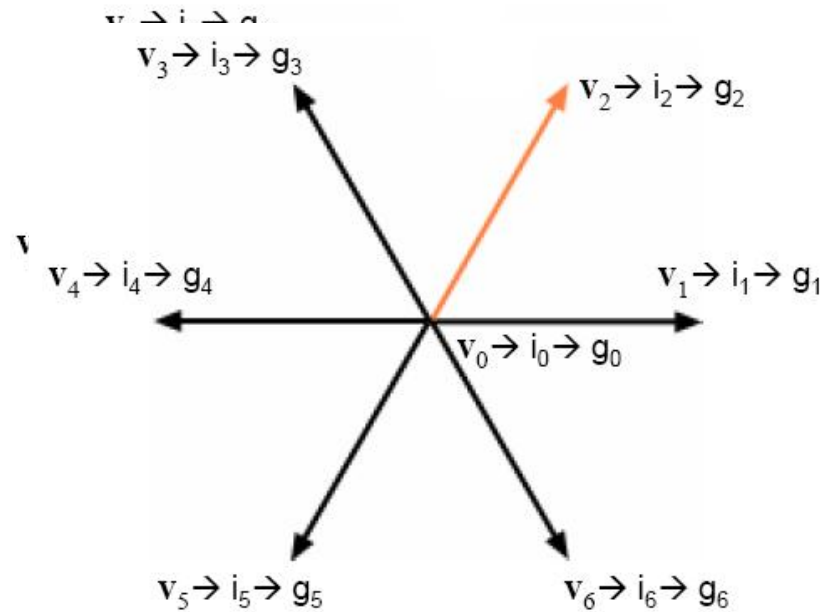


$$g = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}^p|$$

$i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*$: reference values

$i_{\alpha}^p, i_{\beta}^p$: predicted values

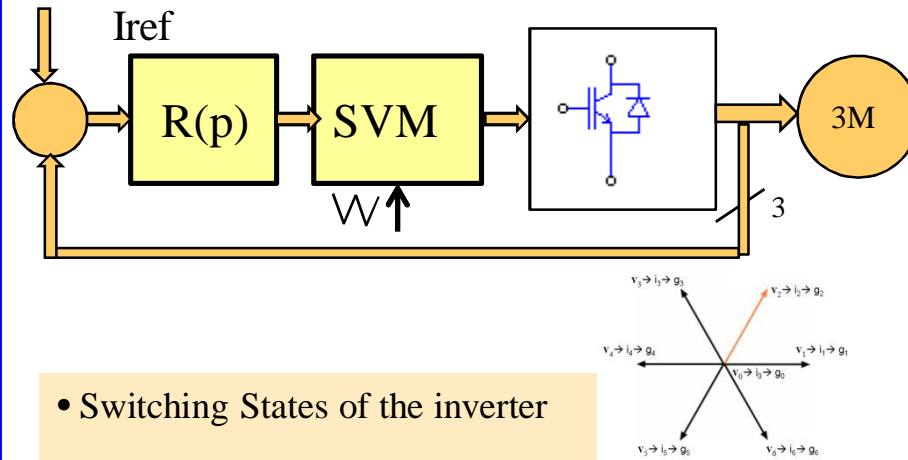
La minimisation du critère g permet de sélectionner la commande à appliquer



v₀	g₀	0.60
v₁	g₁	0.82
v₂	g₂	0.24
v₃	g₃	0.42
v₄	g₄	0.96
v₅	g₅	1.24
v₆	g₆	1.19

← g_{min}

Current Control with SVM

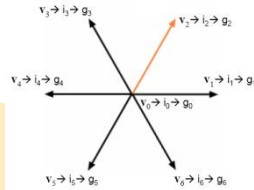


- Switching States of the inverter

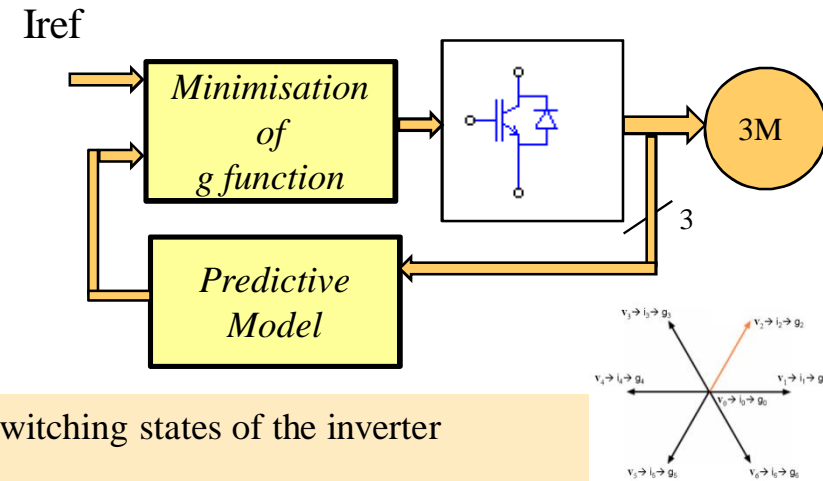
- Load model for controller parameter design

- Controller adjustment

- SVM



Predictive control

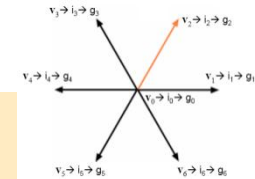


- Switching states of the inverter

- Load model for prediction

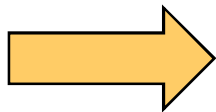
- Cos t function : evaluated for each vltage vector

And selection og g Optimal



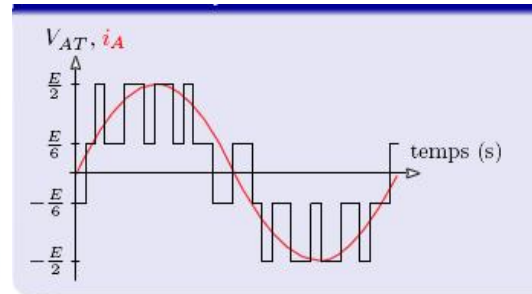
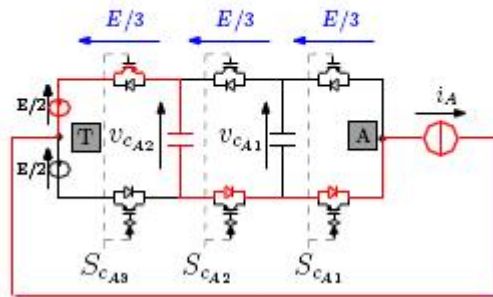
Quelques Remarques

- Approche très différente de l'approche MLI
- Extrêmement simple et général
- Absence de modulateurs et de régulateur linéaires
- Très bonnes performances
- Peut être implanté avec des processeurs standards



Number of switch increasing

Onduleur à 3 cellules:



Configurations

S_{cA3}	S_{cA2}	S_{cA1}	C_A	V_{AO}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	$E/3$
0	1	0	2	$E/3$
0	1	1	3	$2 * E/3$
1	0	0	4	$E/3$
1	0	1	5	$2 * E/3$
1	1	0	6	$2 * E/3$
1	1	1	7	E

■ Converter model

$$\frac{v_1(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C_1} (-S_1(t) + S_2(t))$$

$$\frac{v_2(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C_2} (-S_2(t) + S_3(t))$$

$$\frac{i_L(t)}{dt} = \frac{-Ri_L(t)}{L} + \frac{1}{L}v_L(t)$$

■ Discrete-time model

$$v_1(k+1) = v_1(k) + \frac{T_s i_L(k)}{C_1} (-S_1(k) + S_2(k))$$

$$v_2(k+1) = v_2(k) + \frac{T_s i_L(k)}{C_2} (-S_2(k) + S_3(k))$$

$$i_L(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L}\right) i_L(k) + \frac{T_s}{L} v_L(k)$$

▪ Cost function

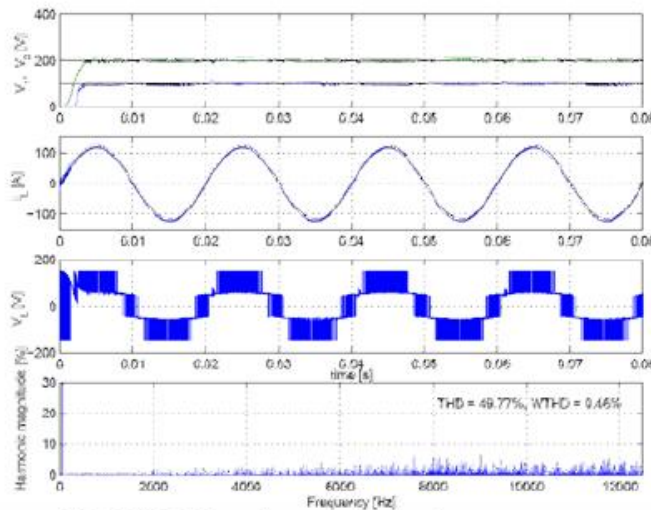
$$J = (i_L^* - i_L(k+1))^2 + \lambda_1 [(v_1^* - v_1(k+1))^2 + (v_2^* - v_2(k+1))^2] + \lambda_2 (u(k) - u(k+1))^2$$

load current error

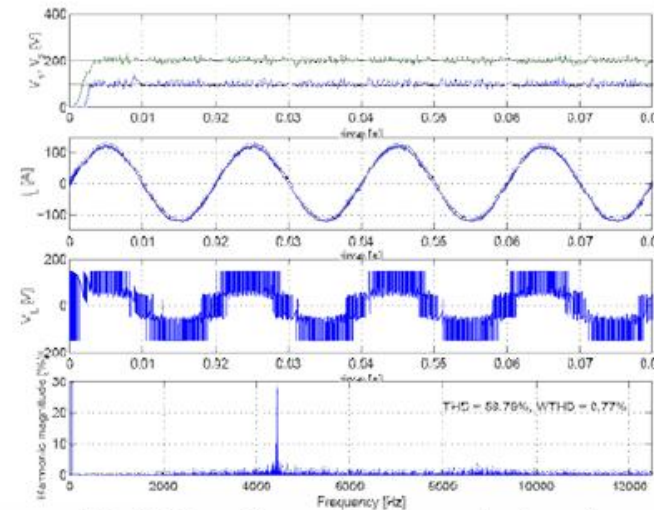
capacitor voltage errors

switching state change

▪ Simulation results

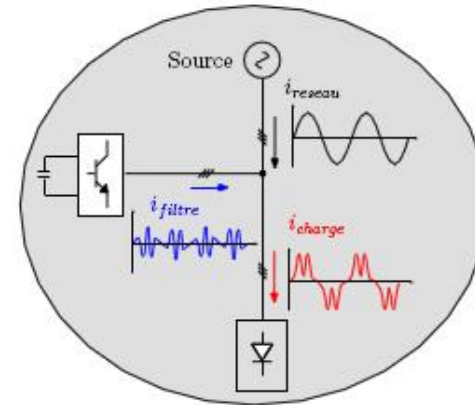
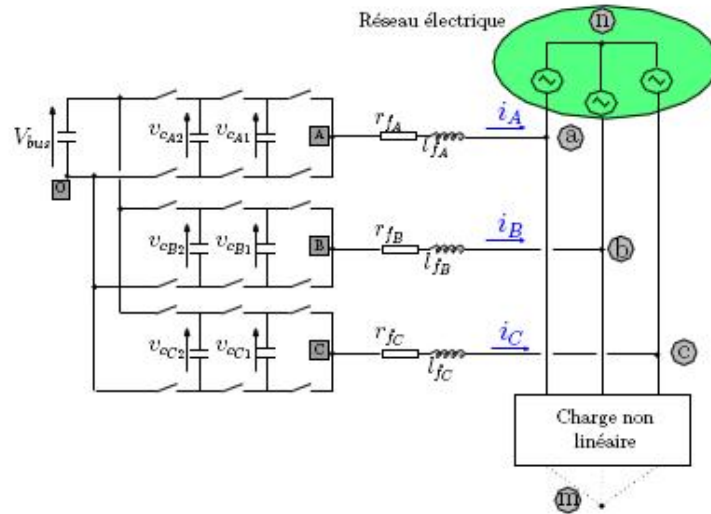


FS-MPC load current and capacitors voltage control
 $\lambda_1 = 0.1, \lambda_2 = 0$



FS-MPC with spectrum control and reduction of the switching frequency
 $\lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 70$

Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif



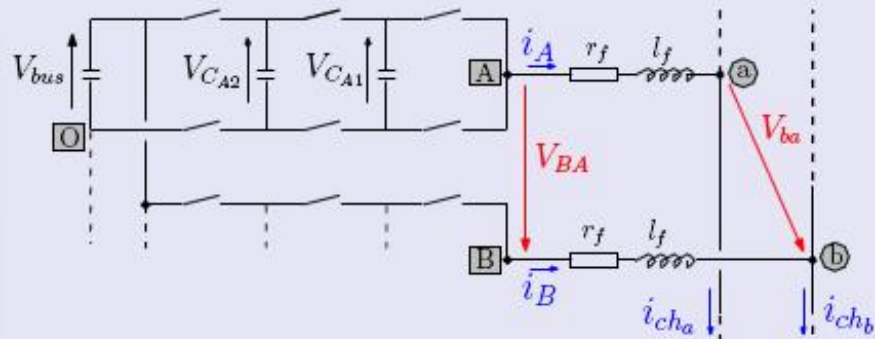
$$\begin{cases} \frac{d(i_A)}{dt} = -\frac{r_{fA}}{l_{fA}} * i_A + \frac{1}{l_{filerA}} * v_{AO} - \frac{1}{l_{fA}} * (v_{an} + v_{nO}) \\ \frac{d(i_B)}{dt} = -\frac{r_{fB}}{l_{fB}} * i_B + \frac{1}{l_{filerB}} * v_{BO} - \frac{1}{l_{fB}} * (v_{bn} + v_{nO}) \\ \frac{d(i_C)}{dt} = -\frac{r_{fC}}{l_{fC}} * i_C + \frac{1}{l_{filerC}} * v_{CO} - \frac{1}{l_{fC}} * (v_{cn} + v_{nO}) \end{cases}$$

En triphasé :

Une équation différentielle par phase pour décrire le système.

Modèle dans le repère des tensions composées (ba-ca)

Schéma entre deux phases



Conditions

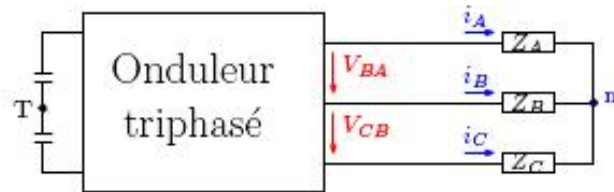
- ✓ Pour décrire l'ensemble des phases.
- ⇒ Le courant composé est introduit : $i_{BA} = i_B - i_A$

Remarques

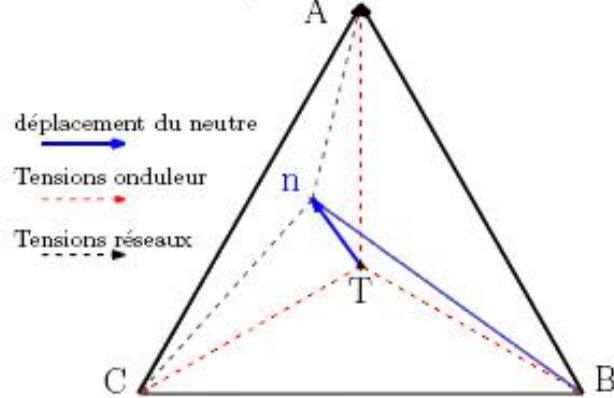
- ⇒ Deux équations suffisent pour décrire globalement le système.
- ⇒ Un repère des grandeurs composées.

Modèle entre phases (ba-ca)

$$\begin{cases} \frac{d(i_{BA})}{dt} = -\frac{r_f}{l_f} * i_{BA} + \frac{1}{l_f} * v_{BA} - \frac{1}{l_f} * v_{ba} \\ \frac{d(i_{CA})}{dt} = -\frac{r_f}{l_f} * i_{CA} + \frac{1}{l_f} * v_{CA} - \frac{1}{l_f} * v_{ca} \end{cases}$$



Si $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$:



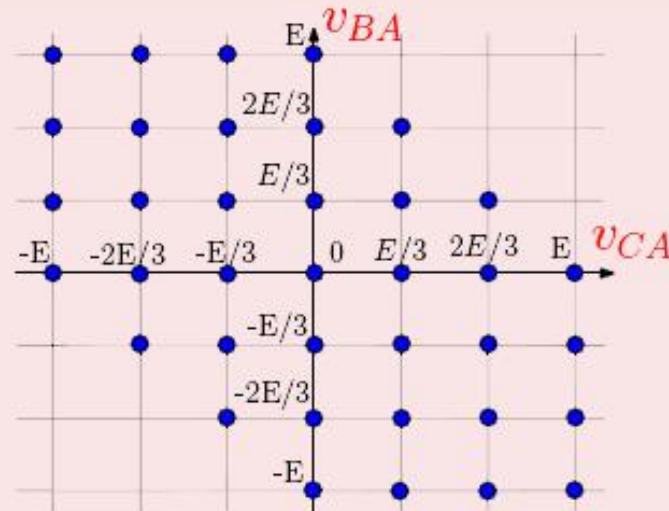
$$i_A + i_B + i_C = 0$$

$$\text{mais } V_{An} + V_{Bn} + V_{Cn} \neq 0$$

Avec un repère entre phases

$$V_{BA} + V_{AC} + V_{CB} = 0$$

Représentation de la sortie de l'onduleur



- ✓ 37 configurations de sortie dans ce repère.
- ✓ Pas de transformation triphasée-diphasée (la transformée de Concordia sous entend un point neutre centré).
- ✓ Accès direct aux variables d'état.

Modèle continu du filtre actif

$$\begin{pmatrix} \frac{d(i_{BA})}{dt} \\ \frac{d(i_{CA})}{dt} \end{pmatrix} = A_{\text{filtre}} * \begin{pmatrix} i_{BA} \\ i_{CA} \end{pmatrix} + B_{\text{filtre}} * \begin{pmatrix} v_{BA} - v_{ba} \\ v_{CA} - v_{ca} \end{pmatrix}$$

$$A_{\text{filtre}} = \begin{pmatrix} -\frac{r_f}{l_f} & 0 \\ 0 & -\frac{r_f}{l_f} \end{pmatrix}$$

$$B_{\text{filtre}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{l_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_f} \end{pmatrix}$$

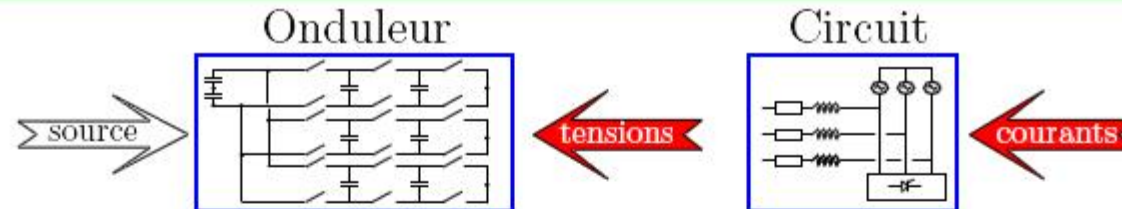
Modèle discret du filtre actif

$$\begin{pmatrix} i_{BA}^{k+1} \\ i_{CA}^{k+1} \end{pmatrix} = A_k * \begin{pmatrix} i_{BA}^k \\ i_{CA}^k \end{pmatrix} + B_k * \begin{pmatrix} v_{BA}^k - v_{ba}^k \\ v_{CA}^k - v_{ca}^k \end{pmatrix} \quad (1)$$

✓ Matrice diagonale et constante.

$$\Rightarrow \begin{cases} A_k = e^{A_{\text{filtre}} * T_d} \\ B_k = A_{\text{filtre}}^{-1} * (e^{A_{\text{filtre}} * T_d} - Id) * B_f \end{cases}$$

● T_d : période de découpage Id : matrice identité



Modèle discret entre phases :

$$\begin{pmatrix} i_{BA}^{k+1} \\ i_{CA}^{k+1} \end{pmatrix} = A_k * \begin{pmatrix} i_{BA}^k \\ i_{CA}^k \end{pmatrix} + B_k * \begin{pmatrix} v_{BA}^k - v_{ba}^k \\ v_{BA}^k - v_{ca}^k \end{pmatrix} \quad (1)$$

Récurrence à l'instant t_{k+2} :

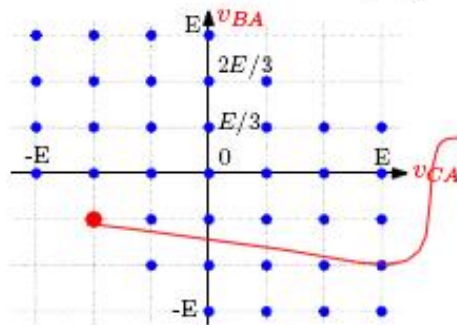
$$\begin{pmatrix} i_{BA}^{k+2} \\ i_{CA}^{k+2} \end{pmatrix} = A_k * \begin{pmatrix} i_{BA}^{k+1} \\ i_{CA}^{k+1} \end{pmatrix} + B_k * \begin{pmatrix} v_{BA}^{k+1} - v_{ba}^{k+1} \\ v_{BA}^{k+1} - v_{ca}^{k+1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

En retournant et combinant (1) et (2) :

$$\begin{pmatrix} \overline{v_{BA}^{k+1}} \\ \overline{v_{CA}^{k+1}} \end{pmatrix} = K_1 \begin{pmatrix} i_{BA}^{k+2} \\ i_{CA}^{k+2} \end{pmatrix} + K_2 \begin{pmatrix} i_{BA}^k \\ i_{CA}^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{ba}^{k+1} \\ v_{ca}^{k+1} \end{pmatrix} + K_3 \begin{pmatrix} \overline{v_{BA}^k - v_{ba}^k} \\ \overline{v_{CA}^k - v_{ca}^k} \end{pmatrix}$$

Comment appliquer la tension moyenne ($\overline{v_{BA}^k}$ et $\overline{v_{CA}^k}$) ?

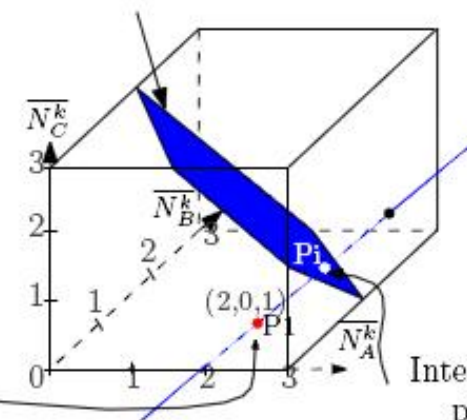
$$\begin{pmatrix} V_{BA} \\ V_{CA} \end{pmatrix} = \frac{E}{3} * \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_A \\ N_B \\ N_C \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} N_A^+ \\ N_B^+ \\ N_C^+ \end{pmatrix} = \text{SVD} * \begin{pmatrix} V_{BA} \\ V_{CA} \end{pmatrix}$$

$$\text{SVD} = \begin{pmatrix} -1/3 & -1/3 \\ 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 \end{pmatrix}$$

Plan de mode commun minimum

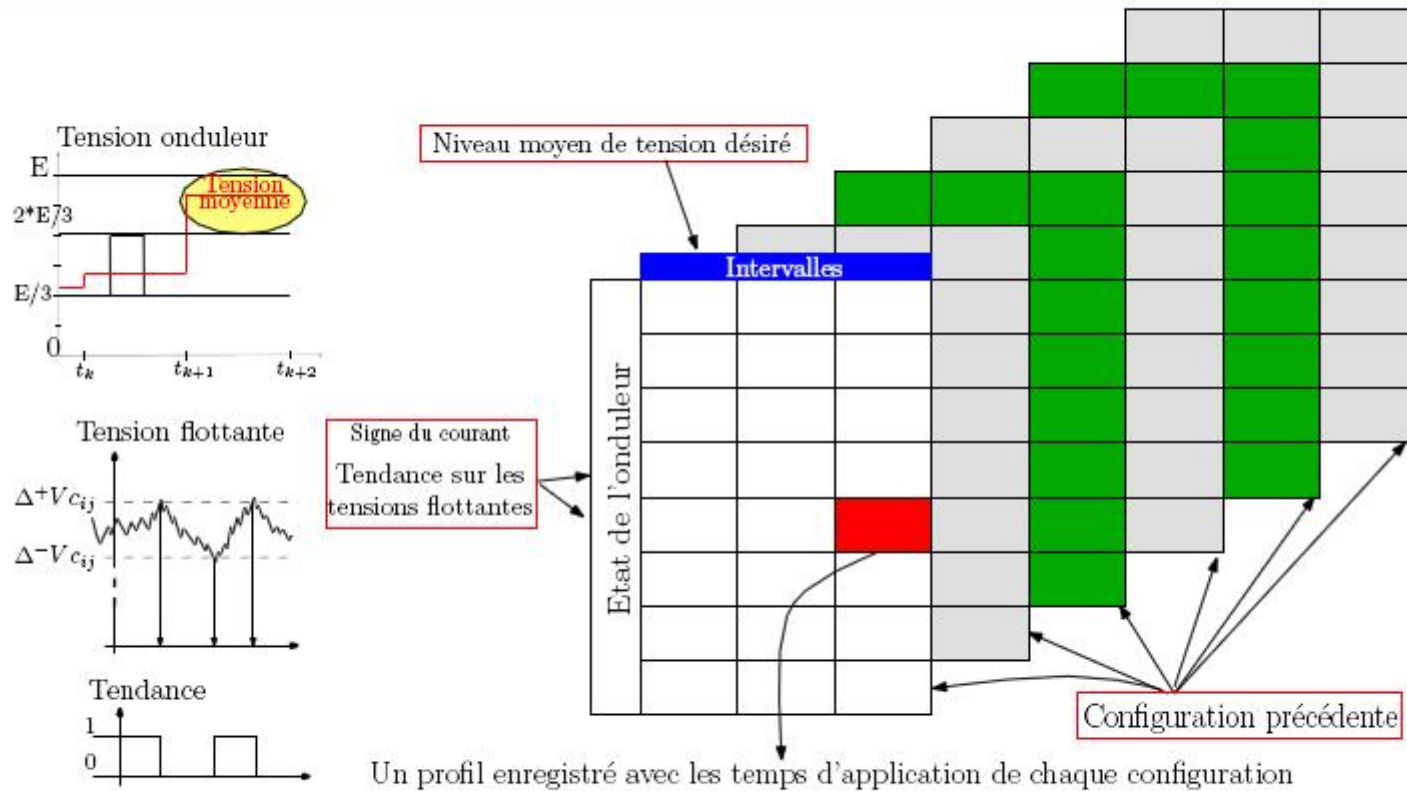


Intersection avec le plan de mode commun

Remarques

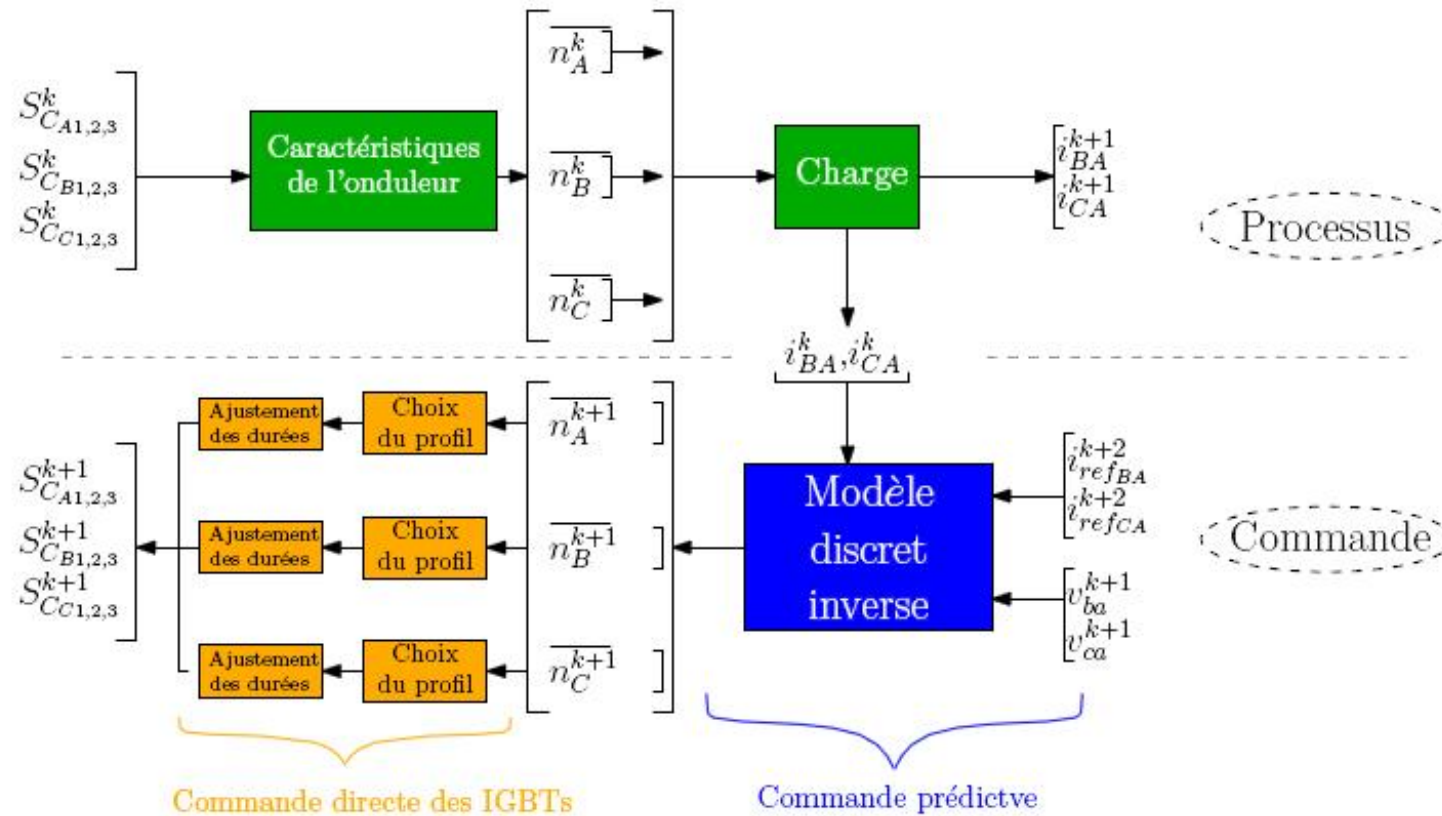
- ✓ Matrice de passage non inversible.
- ✓ Solution donnée par la decomposition en valeur singulière (S.V.D.).
- ✓ Non-unicité de la solution, choix de la réduction du mode commun.

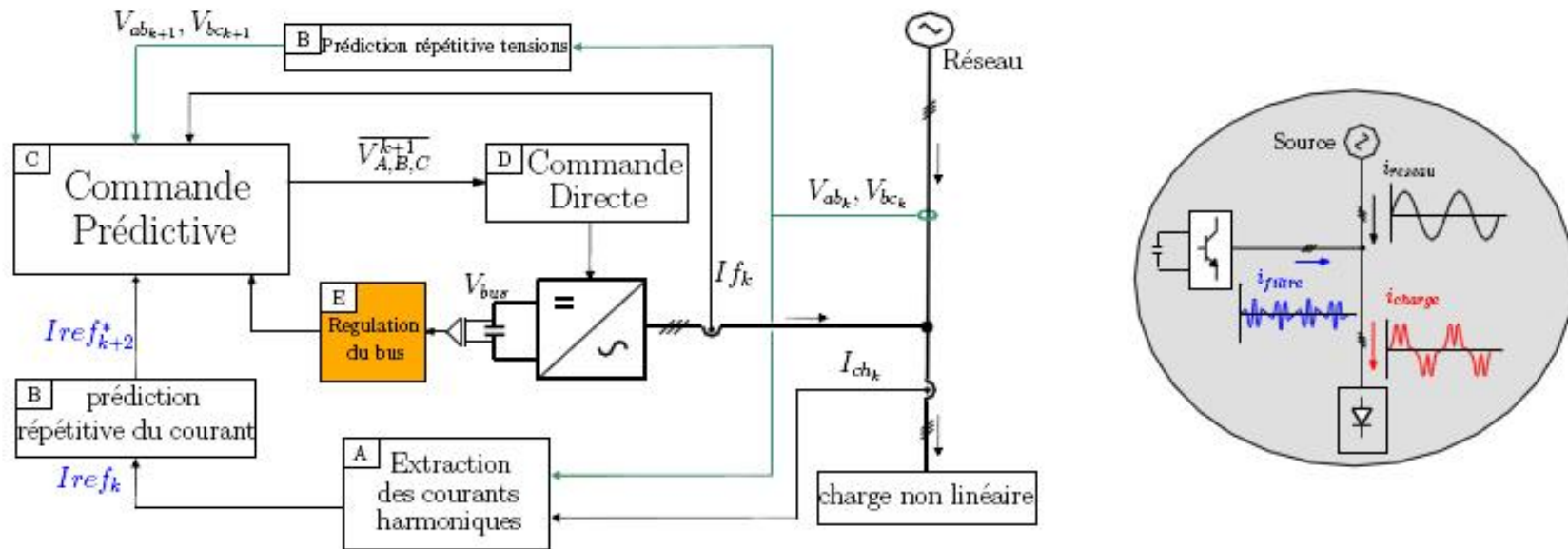
Choix des profils



- ↪ $3 * 8 * 6 = 144$ cases avec des profils et des temps d'application.
- ↪ $p * 2^p * (2^p - 2)$ en respectant les contraintes (896 pour $p=4$).

Synthèse de la commande directe prédictive



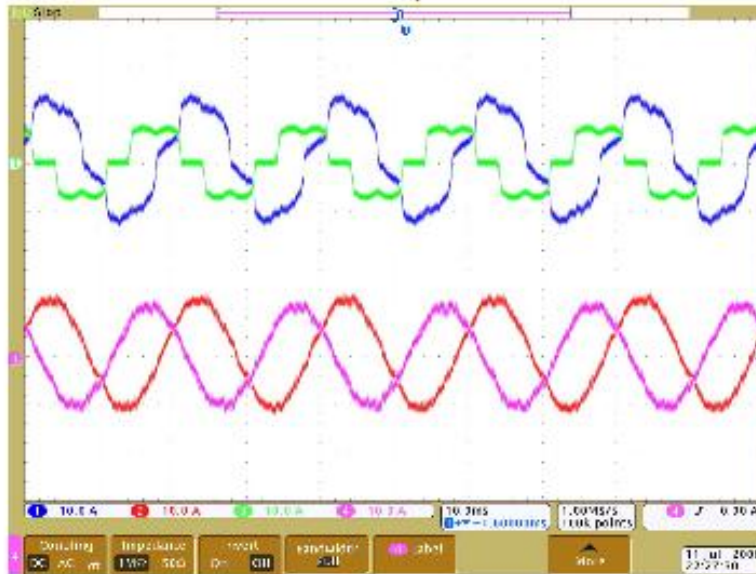


Les étapes du filtrage actif

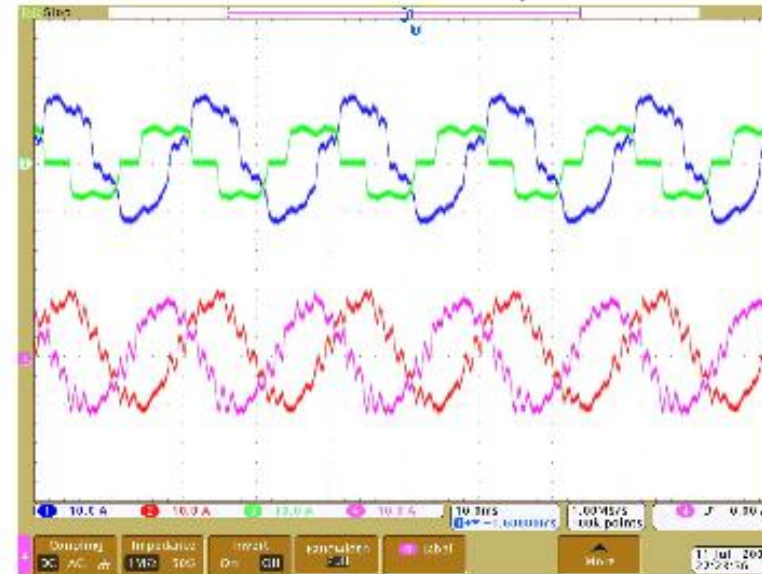
- ✓ A : Extraction des harmoniques
- ✓ B : Prédiction des références
- ✓ C,D : Commande directe et prédictive
- ✓ E : Régulation du bus continu

Charge déséquilibrée

Commande prédictive



Commande découplante



Remarques

- ✓ Bonne compensation des charges déséquilibrées.

- ✓ Augmentation de la bande passante. Limitations des commutations.
- ✓ Maîtrise des tensions avec des condensateurs de $200\mu F$ seulement.
- ✓ Capteur de tension faible résolution (seulement la tendance).

Utilisation d'un repère simple : celui des tensions composées.

- ✓ Une approche logique et amenant des degrés de liberté.
- ✓ Des avantages pour les systèmes déséquilibrés.
- ✓ Un calcul des composantes directes et inverses entièrement scalaire (sans connaître la fréquence ou l'angle).

Résultats expérimentaux très significatifs

- ✓ Une fréquence basse ($f_d = 2.5kHz$) pour une qualité de filtrage comparable (TDH) à celle d'un onduleur à 2 niveaux ($f_d = 10kHz$).
- ✓ Une augmentation de la bande passante (environ 4 par rapport à un 2 niveaux et environ 2 par rapport à une MLI déphasée avec un multicellulaire à 4 niveaux).

Commande prédictive Avec table

- Le modèle est utilisé pour établir une relation entre le courant et la tension
- L'effet de l'application d'une commande doit être évalué hors ligne
- La table de commutation doit être développée hors ligne

Commande Prédictive directe

- Le modèle est utilisé pour la prédiction
- L'effet de l'application d'une commande est évalué en temps réel par le calculateur
- La fonction coût est minimisée par le calculateur