

Approche modèle moyen - Commande d'un redresseur à absorption sinusoïdale

Projet CCSA1 2023/2024 : Douglas LIMA MILITÃO PINHEIRO

Table of Contents

1. Données numériques	1
1.1 Expliquer à quoi sert un PFC et quels sont les objectifs de commandes.	2
2. Modèle moyen du système et transformation de Park.....	2
2.1. Bilan de puissance AC et DC.....	2
2.2. Transformée Park.....	2
2.3. Valeurs de U_d et U_q	4
3. Analyse du système dans le repère d-q.....	5
3.1. Quelle est la nature du système d'équation (2) ?.....	5
3.2. Donner l'expression de G_v et sa valeur numérique.	5
3.3. L'ordre de grandeur des dynamiques.....	5
3.3. Déterminer la valeur de courant en régime établi pour de	6
4. Approche fréquentielle.....	7
4.1. Commande des courants i_d , i_q	7
4.1.1. Consigne	7
4.1.2. Cahier des charges et placement des pôles.....	7
4.1.3. Tester les correcteurs de courant sur Matlab/Simulink avec le modèle moyen d-q (pfc_dq_2019.slx). Vérifier le respect du cahier des charges.....	9
4.2. Commande de la tension de sortie U_{dc}	11
4.2.3. Mettre en place une anti-saturation pour ne pas dépasser les limites de la commande.....	14
4.2.4. Tester le correcteur de tension sur Matlab/Simulink avec le modèle moyen d-q pour la consigne de . Vérifier le respect du cahier des charges.....	14
4.2.5. Vérifier le bon fonctionnement de l'ensembles des correcteurs et tester la robustesse vis-à-vis d'une variation brusque de la charge de à	14
4.3. Validation sur le modèle triphasé.....	16
4.3.1. Analyser le modèle triphasé donné dans le fichier PFC_abc_2019.slx.....	16
4.3.2. Appliquer les commandes synthétisées sur ce modèle.....	16
4.3.3. Analyser le THD des courants et vérifier le facteur de puissance obtenu.....	20
5. Approche temporelle.....	21
5.1 Commande optimale des courants ,	21
5.1.1. A partir de l'équation (2), écrire le système sous la forme d'état.....	21
5.1.2. Réaliser une commande optimale à la place des correcteurs utilisés dans 4.1	22
5.2 Commande optimale de la tension de sortie U_{dc}	24
5.2.1. Montrer que pour , on a	24
5.2.2. Réaliser une commande optimale à la place des correcteurs utilisés dans 4.2	25
6. Implémentation et conclusion.....	29
6.1. Compléter le schéma technologique (Figure 2) de l'ensemble du système commandé.....	29
6.2. Commenter les commandes synthétisées et conclure sur votre projet.....	30

1. Données numériques

```
close all; clear; clc;
E = 311 ; % [V] Amplitude de la source triphasé
f = 50 ; % [Hz] fréquence de la source triphasé
w = 2*pi*f ; % [rad/s] pulsation de la source triphasé
r = 1 ; % [Ω] resistance interne de la source
L = 1e-3 ; % [H] inductance interne de la source
```

$C = 4700e-6$; % [F] capacité du côté dc
 $R_{ch} = 100$; % [Ω] résistance de charge du côté dc
 $U_{dc_cons} = 600$; % [V] consigne de tension du bus dc

1.1 Expliquer à quoi sert un PFC et quels sont les objectifs de commandes.

Un PFC est une stratégie/méthode utilisée pour améliorer le facteur de puissance d'un circuit en réduisant le taux de distorsion harmonique (THD), en améliorant sa performance, dans ce cas un circuit redresseur. En cas d'utilisation sans être bien contrôlé, le circuit redresseur va générer de nombreux composants harmoniques de grande amplitude. En effet, les diodes ne conduisent que lorsque la tension des signaux AC est plus grande que la tension du condensateur du bus DC. Ainsi, à la fin, la courant vu par le réseaux AC sera des courbes avec grande amplitude et courte durée. C'est-à-dire, les courants AC auront plein d'harmoniques, augmentant le taux de distorsion harmonique et réduisant le facteur de puissance, ce qui est mauvais pour le réseaux. La stratégie d'implémentation du PFC dans ce circuit redresseur est basée sur la méthode de commande.

2. Modèle moyen du système et transformation de Park

2.1. Bilan de puissance AC et DC

Le circuit donne :

$$\begin{cases} V_{ra} = U_a - r.i_a - L \frac{di_a}{dt} \\ V_{rb} = U_b - r.i_b - L \frac{di_b}{dt} \\ V_{rc} = U_c - r.i_c - L \frac{di_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

Faire le bilan de puissance en AC et DC afin d'exprimer le courant de la capacité :

En faisant l'assumption que la puissance du bus AC est égal à la puissance du bus DC

$$P_{ac} = V_{ra}i_a + V_{rb}i_b + V_{rc}i_c = P_{dc} = \frac{U_{dc}^2}{R_{ch}} + U_{dc} \left(C \frac{dU_{dc}}{dt} \right) \leftrightarrow C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{U_{dc}} (V_{ra}i_a + V_{rb}i_b + V_{rc}i_c) - \frac{U_{dc}}{R_{ch}}$$

2.2. Transformée Park

Pour commander efficacement le PFC, les grandeurs triphasées abc sont projetées dans un repère orthogonal diphasé (repère d,q) tournant. Avec la transformée de Park en conservant l'amplitude des tensions et des courants, montrer que le modèle (1) et l'équation de courant dans le repère d, q s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{rd} = U_d - r i_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q \\ V_{rq} = U_q - r i_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d \end{cases} \quad (2)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{1}{U_{dc}} (V_{rd}i_d + V_{rq}i_q) - \frac{U_{dc}}{R_{ch}}$$

Les équations en (1) peuvent être réécrit comme :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Soit Γ la matrice pour transposer au système au repère dq0 (transformée de Park)

$$\Gamma \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \Gamma \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \Gamma \frac{d}{dt} \left(\Gamma^{-1} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \Gamma \frac{d}{dt} \left(\Gamma^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \right)$$

Par définition $\frac{d}{dt} \left(\Gamma^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \right) = \left(\frac{d\Gamma^{-1}}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \Gamma^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \right)$, donc :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \left(\frac{d\Gamma^{-1}}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \Gamma^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \Gamma \frac{d\Gamma^{-1}}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \Gamma^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

Où $\Gamma \Gamma^{-1} = I$ et $\Gamma \frac{d\Gamma^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

On considère que la composant homopolaire est toujours nulle, parce que le système est purement alternatif :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L\omega \\ -L\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

Comme les composantes de tension et courant sont maintenu avec les mêmes amplitudes, la puissance maximale est décrit :

$$P_{ab} = (V_{ra}i_a + V_{rb}i_b + V_{rc}i_c) = \frac{3}{2}VI \rightarrow P_{abc} = \frac{3}{2}P_{dq}$$

$$P_{dq} = (V_{rd}i_d + V_{rq}i_q) = VI$$

Donc on arrive au modèle (2), écrit comme :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L\omega \\ -L\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

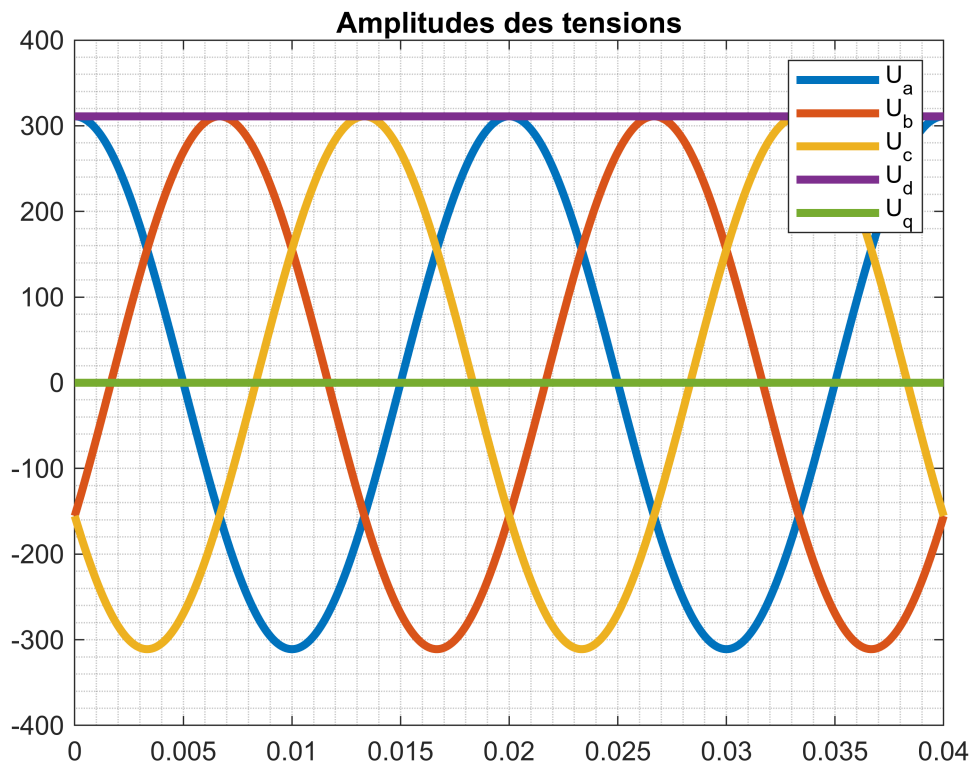
$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{U_{dc}} \frac{3}{2} (V_{rd}i_d + V_{rq}i_q) - \frac{U_{dc}}{R_{ch}}$$

2.3. Valeurs de Ud et Uq

A partir des trois tensions triphasées U_a , U_b et U_c , déterminer la valeur de U_d et U_q à l'aide d'un schéma Simulink. L'angle de la transformée de Park est synchronisé avec la valeur maximale de U_a .

```
Amplitude_Ud_Uq_results = sim("Amplitude_Ud_Uq.slx");

figure
plot(Amplitude_Ud_Uq_results.t, [Amplitude_Ud_Uq_results.Uabc
Amplitude_Ud_Uq_results.Udq0(:,1:2)], LineWidth=3)
grid minor
legend("U_a", "U_b", "U_c", "U_d", "U_q")
title("Amplitudes des tensions")
```



Les amplitudes sont conservées :

$$\begin{aligned} U_d &= E; \\ U_q &= 0; \end{aligned}$$

3. Analyse du système dans le repère d-q

3.1. Quelle est la nature du système d'équation (2) ?

Il est un système non-linéaire à variables couplées. La non-linéarité est liée à la variable U_{dc} qui est élevée à puissance -1 en multipliant des autres variables (I_d et I_q) du système.

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (V_{rd}i_d + V_{rq}i_q) U_{dc}^{-1} - \frac{U_{dc}}{R_{ch}}$$

3.2. Donner l'expression de G_v et sa valeur numérique.

Pour simplifier le problème de commande, on approxime le terme $\frac{1}{U_{dc}} (V_{rd}i_d + V_{rq}i_q)$ par $\frac{E}{U_{dc}^{\#}} i_d$ dans (2) ou

$U_{dc}^{\#}$ est la consigne de tension du bus continu. Ce qui donne :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}} i_d - \frac{U_{dc}}{R_{ch}}$$

$$C U_{dc}(p) p = \frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}} i_d(p) - \frac{1}{R_{ch}} U_{dc}(p)$$

$$C U_{dc}(p) p + \frac{1}{R_{ch}} U_{dc}(p) = \frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}} i_d(p)$$

$$U_{dc}(p) \left(Cp + \frac{1}{R_{ch}} \right) = \frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}} i_d(p)$$

$$\frac{U_{dc}(p)}{i_d(p)} = \frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}} \frac{1}{\left(Cp + \frac{1}{R_{ch}} \right)} = \frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}} R_{ch} \frac{1}{(R_{ch}Cp + 1)} = \frac{G_v}{(R_{ch}Cp + 1)}$$

où $G_v = \frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}} R_{ch}$

$$G_v = (3/2) * E * R_{ch} / U_{dc_cons}$$

$$G_v = 77.7500$$

3.3. L'ordre de grandeur des dynamiques

Donner l'ordre de grandeur de la dynamique des courants et de la tension U_{dc} en boucle ouverte.

Quelle structure de commande qu'on peut envisager ? Justifier votre réponse.

Pour le boucle de la tension Udc

$$\tau_{udc} = R_{ch} \cdot C$$

$$\tau_{udc} = 0.4700$$

Pour les boucles de courant Id et Iq

$$V_{rd,rq} = U_{d,q} - r i_{d,q} - L \frac{di_{d,q}}{dt} \pm \omega L i_{q,d} \leftrightarrow r i_{d,q} + L \frac{di_{d,q}}{dt} = U_{d,q} - V_{rd,rq} \pm \omega L i_{q,d} = U_{d,q}^*$$

$$i_{d,q}(p)(r + Lp) = U_{d,q}^*(p)$$

$$\frac{i_{d,q}(p)}{U_{d,q}^*(p)} = \frac{\frac{1}{r}}{\left(\frac{L}{r}p + 1\right)}$$

Où $U_{d,q}^* = U_{d,q} - V_{rd,rq} \pm \omega L i_{q,d}$ sont des commandes fictives à être fait un feedforward. Donc, la constante de temp est :

$$\tau_{id iq} = L/r$$

$$\tau_{id iq} = 1.0000e-03$$

Les boucles des courants ont des constantes de temp beaucoup plus rapide que la boucle de tension. On a donc deux possibilités envisagés:

- Boucles imbriquées - la boucle de tension génère le consigne des boucles de courant internes. Les boucles de courant ont des constantes de temp plus faibles que la boucle de tension. Un feedforward est utilisé pour découpler les variables.
- Retour d'état - tous les variables sont maîtrisées via retour d'état.

3.3. Déterminer la valeur de courant i_d en régime établi (i_{de}) pour de $U_{dc} = U_{dc}^{\#}$.

En supposant que l'entrée est un échelon d'amplitude i_{de} :

$$U_{dc}(p) = \frac{i_{de}}{p} \frac{G_v}{(R_{ch}Cp + 1)}$$

Selon le théorème de la valeur finale :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U_{dc}(t) = U_{dc}^{\#} = \lim_{p \rightarrow 0} p U_{dc}(p) = p \frac{i_{de}}{p} \frac{G_v}{(R_{ch}Cp + 1)} \leftrightarrow U_{dc}^{\#} = i_{de} G_v \rightarrow i_{de} = \frac{U_{dc}^{\#}}{G_v}$$

$$i_{de} = U_{dc_cons}/G_v$$

$$i_{de} = 7.7170$$

4. Approche fréquentielle

4.1. Commande des courants i_d , i_q

4.1.1. Consigne $i_q^\#$

On cherche d'abord à commander les deux courants i_d, i_q avec $i_d^\# = i_{de}$. Comment choisir la consigne $i_q^\#$?

Dans la section 3, une simplification a été faite pour la commande de U_{dc} , le terme lié à i_q est négligé.

C'est-à-dire que i_q ne sera pas utilisé pour contrôler U_{dc} seulement i_d , donc sa consigne est prise toujours égale à 0, parce que quelque soit sa alteration, elle sera considéré comme une perturbation au système (par rapport à U_{dc}).

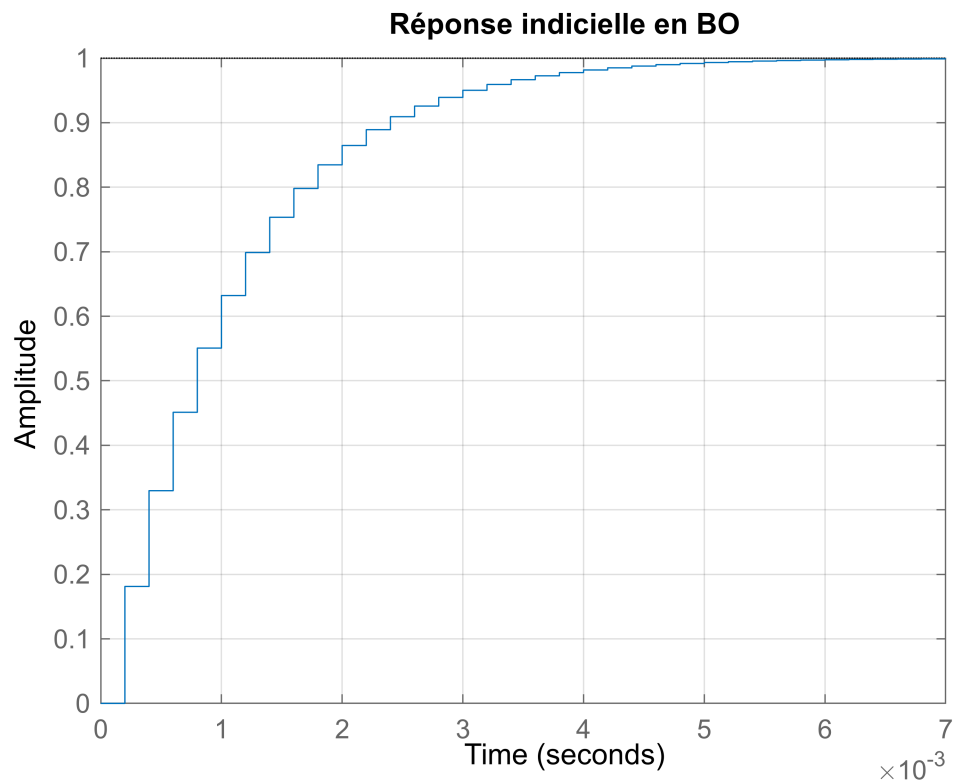
4.1.2. Cahier des charges et placement des pôles

- Nous désirons un temps de réponse à 5% de 12 ms sans erreur statique.
- Pour une implémentation numérique, la période d'échantillonnage est choisie à 0,2 ms.

```
Te = 0.2e-3;  
tau_bf = (12e-3)/3; % approximation utilisé pour trouver la constant de temp d'un  
système de premier ordre  
pole_bf_courant_z = pole(c2d(tf(1,[tau_bf 1]),Te,'zoh')); % pole discret souhaitée  
en boucle fermée
```

Le systeme discretisé :

```
H_courant_z = c2d(tf(1/r,[L/r 1]),Te,'zoh');  
figure  
hold on  
step(H_courant_z);  
grid minor  
title("Réponse indicielle en B0")  
hold off
```



```
[num_H_courant_z, den_H_courant_z] = tfdata(H_courant_z, 'v');
```

Calcul des paramètres du PI discret

```
r0_courant = (1 - pole_bf_courant_z)/num_H_courant_z(2);
r1_courant = r0_courant*den_H_courant_z(2);
K_PI = tf([r0_courant r1_courant],[1 -1],Te,'Variable','z^-1')
```

K_PI =

$$\frac{0.2691 - 0.2203 z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

Sample time: 0.0002 seconds
Discrete-time transfer function.
Model Properties

Vérification des paramètres du correcteur

```
H_test_bf_courant = minreal(feedback(K_PI*H_courant_z,1))
```

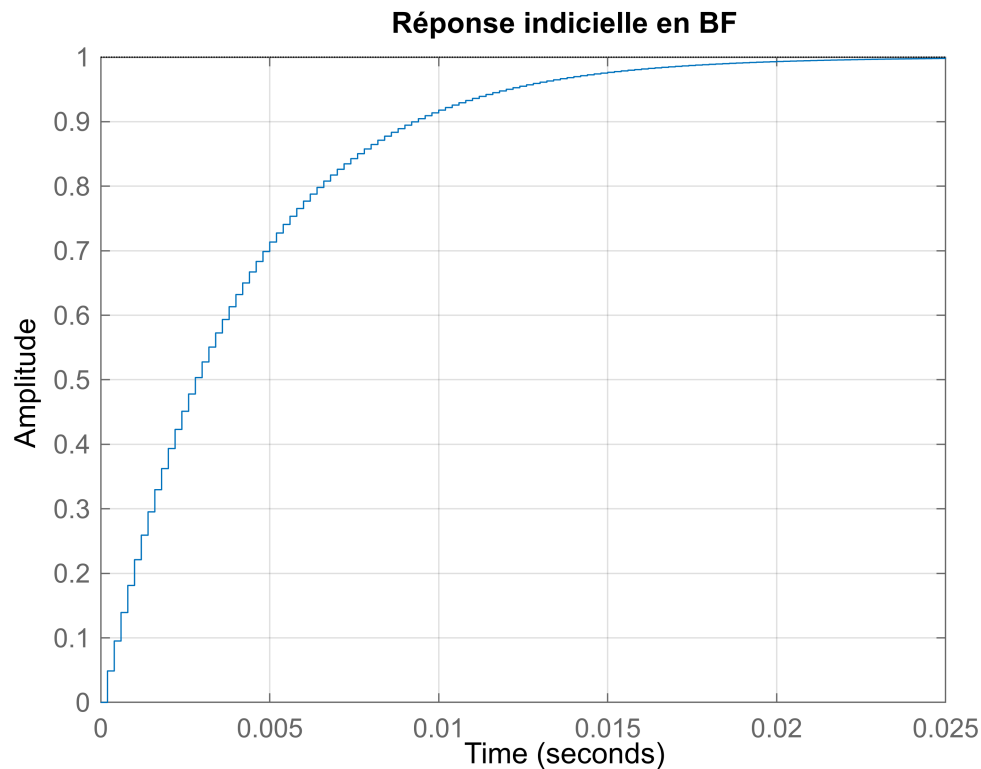
H_test_bf_courant =

$$\frac{0.04877 z^{-1}}{1 - 0.9512 z^{-1}}$$

Sample time: 0.0002 seconds

Discrete-time transfer function.
Model Properties

```
figure
hold on
step(H_test_bf_courant);
grid MINOR
title("Réponse indicielle en BF")
```



```
step2 = stepinfo(H_test_bf_courant, 'RiseTimeThreshold', [0 0.95]); % Calcul le temp
de reponse a 5%
step2.RiseTime
```

```
ans = 0.0118
```

Le correcteur est bien paramétré pour le modèle discret.

4.1.3. Tester les correcteurs de courant sur Matlab/Simulink avec le modèle moyen d-q (*pfc_dq_2019.slx*). Vérifier le respect du cahier des charges.

```
Control_Udc = 0; R_K_PIDf = 1; S_K_PIDf = 1; %desactive le controle de Udc dans le
fichier de simulation
temp_simu = 5; id_sat = 0;
PFC_dq_2019_frequentielle_results = sim("PFC_dq_2019_frequentielle.slx");

figure
subplot(221)
```

```

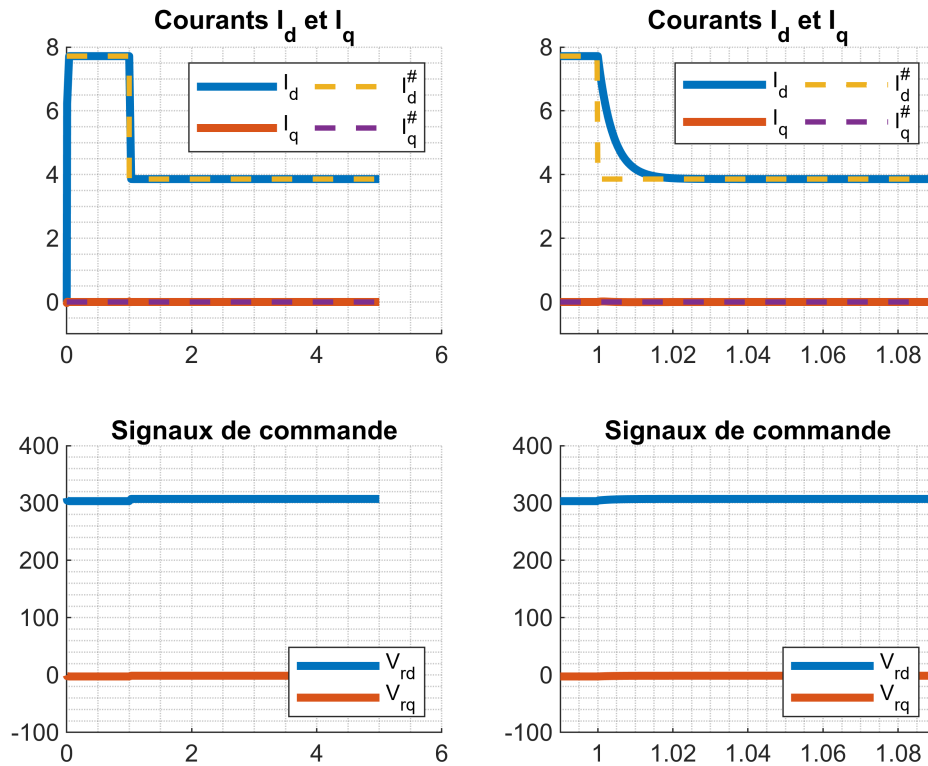
hold on
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results.t, [PFC_dq_2019_frequentielle_results.Id,
PFC_dq_2019_frequentielle_results.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_dq_2019_frequentielle_results.Id_cons,
PFC_dq_2019_frequentielle_results.Iq_cons], '--',LineWidth=2)
grid minor
legend("I_d","I_q","I_d^#","I_q^#",'NumColumns',2)
ylim([-1 8])
title("Courants I_d et I_q")

subplot(223)
hold on
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results.t, [PFC_dq_2019_frequentielle_results.Vrd
PFC_dq_2019_frequentielle_results.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
legend("V_{rd}","V_{rq}",'Location','southeast')
title("Signaux de commande")
ylim([-100 400])

subplot(222)
hold on
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results.t, [PFC_dq_2019_frequentielle_results.Id,
PFC_dq_2019_frequentielle_results.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_dq_2019_frequentielle_results.Id_cons,
PFC_dq_2019_frequentielle_results.Iq_cons], '--',LineWidth=2)
grid minor
legend("I_d","I_q","I_d^#","I_q^#",'NumColumns',2)
title("Courants I_d et I_q")
xlim([0.99 1.09])
ylim([-1 8])

subplot(224)
hold on
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results.t, [PFC_dq_2019_frequentielle_results.Vrd
PFC_dq_2019_frequentielle_results.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
legend("V_{rd}","V_{rq}",'Location','southeast')
title("Signaux de commande")
xlim([0.99 1.09])
ylim([-100 400])

```



La figure montre que les deux courants sont bien maîtrisés par le correcteur et la réponse est comme souhaitée initialement.

4.2. Commande de la tension de sortie Udc

- Cahier des charges :

```
w_0v = 50;
qsi_0v = 3;
```

```
H_udc_bf_z = c2d(tf(w_0v^2,[1 2*qsi_0v*w_0v w_0v^2]),Te);
H_udc_bf_z.Variable = 'z^-1'
```

```
H_udc_bf_z =
```

```
4.901e-05 z^-1 + 4.804e-05 z^-2
-----
1 - 1.942 z^-1 + 0.9418 z^-2
```

```
Sample time: 0.0002 seconds
Discrete-time transfer function.
Model Properties
```

- Fonction transfert du système :

```
H_udc_z = c2d(tf(Gv*1,conv([tau_bf 1],[Rch*C 1])),Te,'zoh'); % produit entre les
deux systèmes
```

```
H_udc_z.Variable = 'z^-1'
```

```
H_udc_z =
```

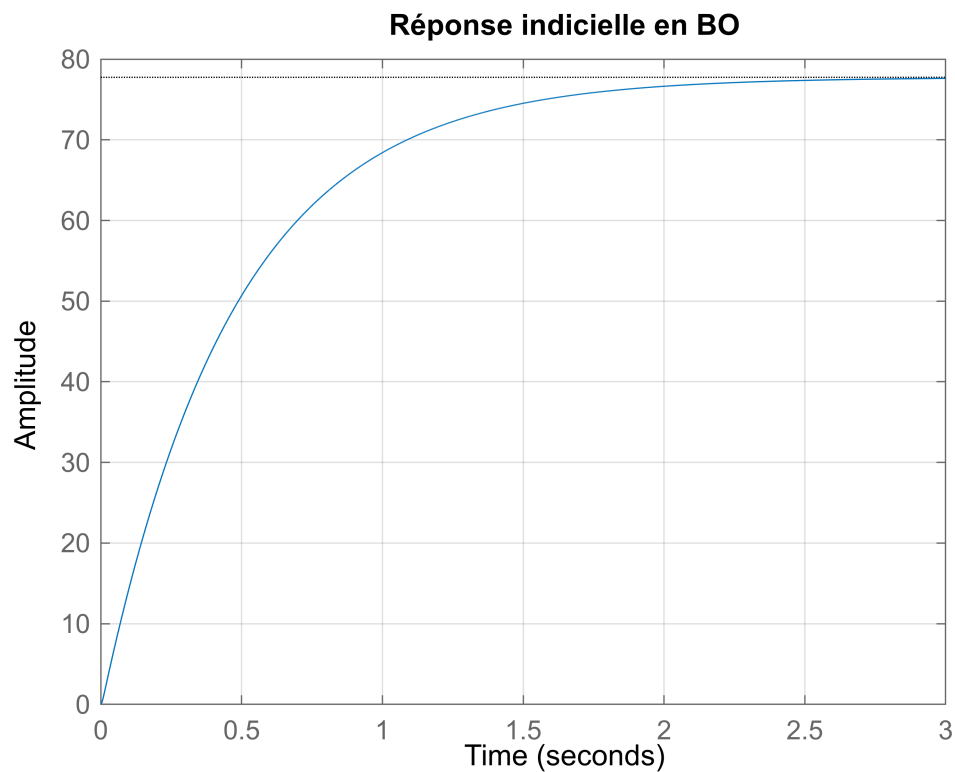
$$\frac{0.0008134 z^{-1} + 0.0007998 z^{-2}}{1 - 1.951 z^{-1} + 0.9508 z^{-2}}$$

Sample time: 0.0002 seconds

Discrete-time transfer function.

Model Properties

```
figure  
hold on  
step(H_udc_z);  
grid MINOR  
title("Réponse indicielle en BO")
```



Calcul des paramètres du PID filtré discret

```
[~, den_H_udc_bf_z] = tfdata(H_udc_bf_z, 'v');  
[num_H_udc_z, den_H_udc_z] = tfdata(H_udc_z, 'v');  
  
r0_udc = (1+den_H_udc_bf_z(2)+den_H_udc_bf_z(3))/(num_H_udc_z(2)+num_H_udc_z(3));  
r1_udc = den_H_udc_z(2)*r0_udc;  
r2_udc = den_H_udc_z(3)*r0_udc;  
s1_udc = r0_udc*num_H_udc_z(3) - den_H_udc_bf_z(3);  
K_PIDf = tf([r0_udc r1_udc r2_udc], conv([1 -1], [1 s1_udc]), Te, 'Variable', 'z^-1');
```

```
H_test_bf_udc = minreal(feedback(K_PIDf*H_udc_z,1),1e-5)
```

```
H_test_bf_udc =
```

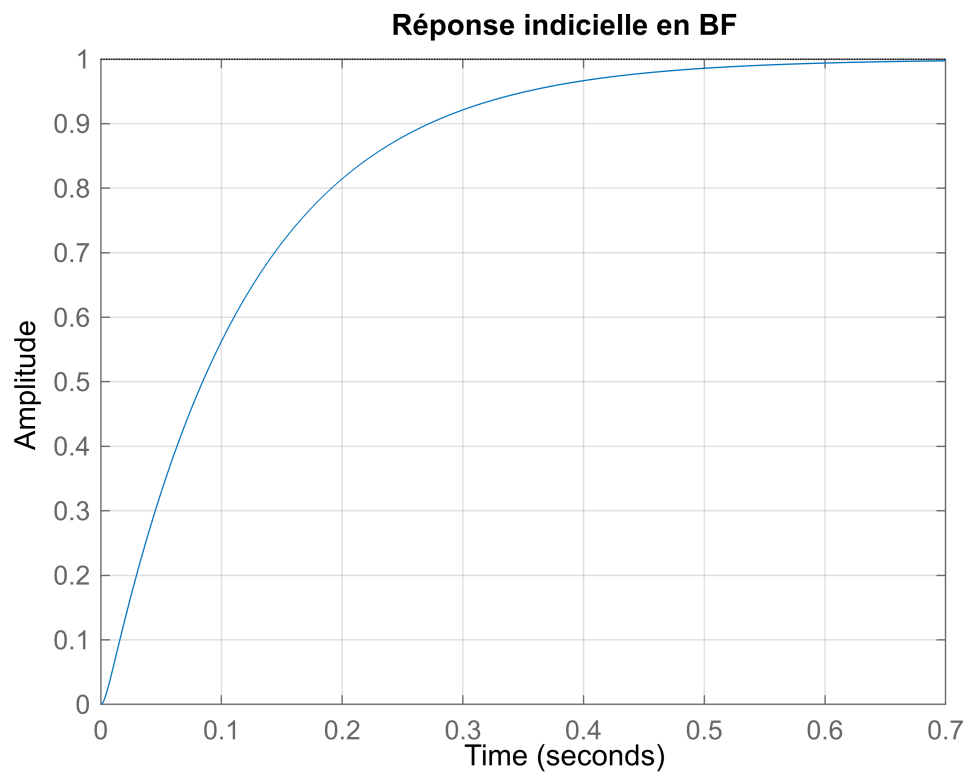
$$\frac{4.894e-05 z^{-1} + 4.812e-05 z^{-2}}{1 - 1.942 z^{-1} + 0.9418 z^{-2}}$$

Sample time: 0.0002 seconds

Discrete-time transfer function.

Model Properties

```
figure
hold on
step(H_test_bf_udc);
grid MINOR
title("Réponse indicielle en BF")
```



```
pole(H_udc_bf_z)
```

```
ans = 2×1
    0.9983
    0.9434
```

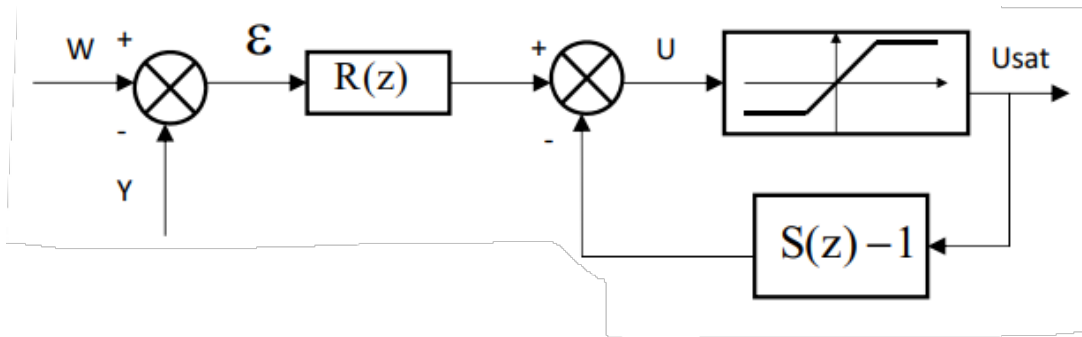
```
pole(H_test_bf_udc)
```

```
ans = 2×1
    0.9983
    0.9434
```

Les poles en boucle fermée sont égales aux pôles du modèle souhaitée, donc le correcteur est bien paramétré pour le modèle discret.

4.2.3. Mettre en place une anti-saturation pour ne pas dépasser les limites de la commande.

Pour mettre en oeuvre l'anti-saturation du correcteur PID filtré, le correcteur sera implémenté dans la structure suivant :



Où $R(z)$ et $S(z)$ sont respectivement les zéros et pôles du correcteur. L'équations décrivent ce système comme :

$$u(z) = R(z)e(z) - (S(z) - 1)u_{\text{sat}}(z), \text{ où } u_{\text{sat}} = \text{sat}(u)$$

C'est-à-dire donc, que si on travaille dans la zone lineaire (non-saturée), $u_{\text{sat}} = u$ donc :

$$u(z) = R(z)e(z) - (S(z) - 1)u(z) \rightarrow \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{R(z)}{S(z)}$$

Le correcteur n'est pas affecté et fonctionnera comme initialement projeté. Par contre, si on travaille dans la zone non-lineaire :

$$u(z) = R(z)e(z) - (S(z) - 1)u_{\text{sat}}(z)$$

```
[R_K_PIDf,S_K_PIDf] = tfdata(K_PIDf,'v');
id_sat = 40;
```

4.2.4. Tester le correcteur de tension sur Matlab/Simulink avec le modèle moyen d-q pour la consigne de

$U_{\text{dc}}^{\#} = 600V$. Vérifier le respect du cahier des charges.

4.2.5. Vérifier le bon fonctionnement de l'ensembles des correcteurs et tester la robustesse vis-à-vis d'une variation brusque de la charge R_{ch} de 100Ω à 50Ω .

La variation de la charge est appliquée en t égale à 2.5s.

```
Control_Udc = 1; %active le controle de Udc dans le fichier de simulation
temp_simu = 8;
PFC_dq_2019_frequentielle_results_2 = sim("PFC_dq_2019_frequentielle.slx");

figure
subplot(311)
hold on
```

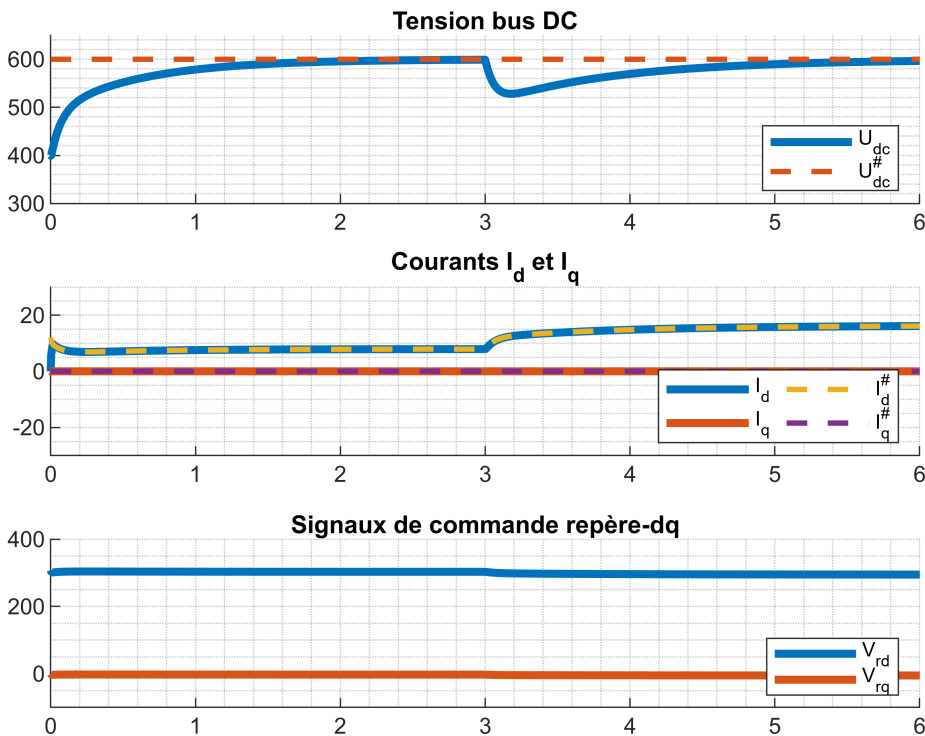
```

plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.t,
[PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Udc],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.t,
PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Udc_cons,'--',LineWidth=2)
ylim([300 650])
xlim([0 6])
grid minor
legend("U_{dc}", "U_{dc}^#", 'Location', 'southeast')
title("Tension bus DC")

subplot(312)
hold on
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.t,
[PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Id,
PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.t,
[PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Id_cons,
PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Iq_cons], '--',LineWidth=2)
xlim([0 6])
ylim([-30 30])
grid minor
legend("I_d", "I_q", "I_d^#", "I_q^#", 'NumColumns', 2, 'Location', 'southeast')
title("Courants I_d et I_q")

subplot(313)
hold on
plot(PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.t,
[PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Vrd
PFC_dq_2019_frequentielle_results_2.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
ylim([-100 400])
xlim([0 6])
legend("V_{rd}", "V_{rq}", 'Location', 'southeast')
title("Signaux de commande repère-dq")

```



La méthode de commande a été validée dans le repère dq. Malgré des zéros qui ne sont pas maîtrisés en utilisant le PID filtré et les approximations mathématiques qui ont été faites pour le développement du système de commande, le comportement en boucle fermée a des différences de temps entre l'initiale souhaitée et l'obtenue. Par contre, le système est toujours contrôlé et même avec la variation de la charge il a été capable de retourner le niveau de tension à la consigne.

4.3. Validation sur le modèle triphasé

4.3.1. Analyser le modèle triphasé donné dans le fichier *PFC_abc_2019.slx*.

Le modèle se rassemble au modèle utilisé dans le repère dq. Par contre, les signaux d'entrée doivent être des sinusoïdales et le courant aussi est dans le repère abc. C'est-à-dire qu'il faut utiliser la transformée de Park pour appliquer la méthode de contrôle développée et utiliser la transformée inverse pour obtenir les signaux de commande dans le repère abc.

4.3.2. Appliquer les commandes synthétisées sur ce modèle.

```
temp_simu = 8;
PFC_abc_2019_frequentielle_results = sim("PFC_abc_2019.slx");

figure
subplot(311)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Udc], LineWidth=3)
```



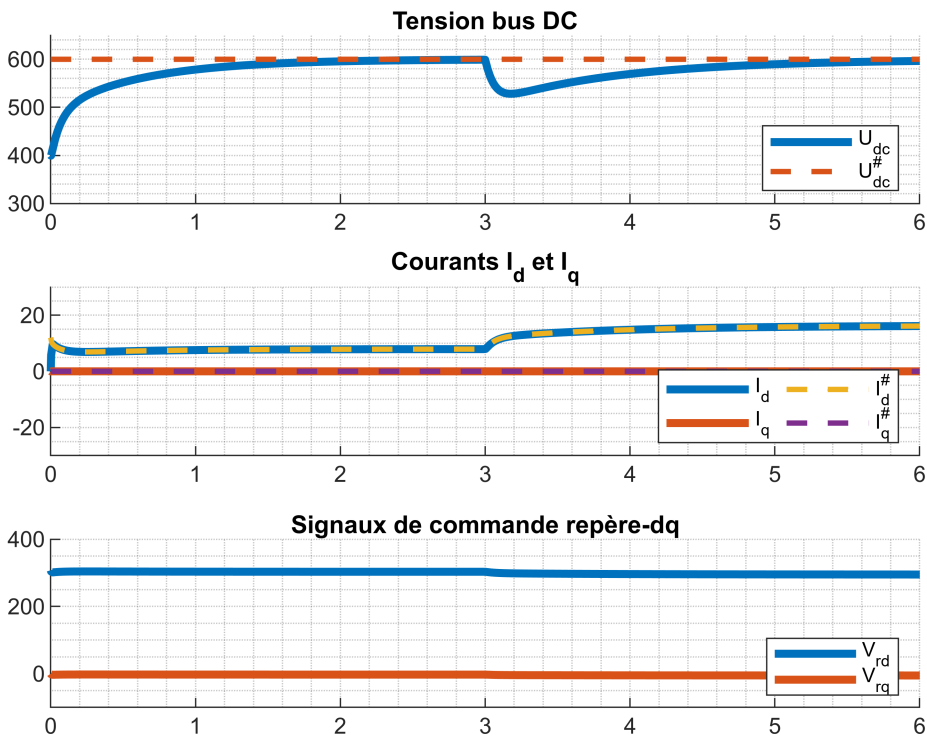
```

plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
PFC_abc_2019_frequentielle_results.Udc_cons,'--',LineWidth=2)
ylim([300 650])
xlim([0 6])
grid minor
legend("U_{dc}", "U_{dc}^#", 'Location', 'southeast')
title("Tension bus DC")

subplot(312)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t, [PFC_abc_2019_frequentielle_results.Id,
PFC_abc_2019_frequentielle_results.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Id_cons,
PFC_abc_2019_frequentielle_results.Iq_cons], '--',LineWidth=2)
xlim([0 6])
ylim([-30 30])
grid minor
legend("I_d", "I_q", "I_d^#", "I_q^#", 'NumColumns', 2, 'Location', 'southeast')
title("Courants I_d et I_q")

subplot(313)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t, [PFC_abc_2019_frequentielle_results.Vrd
PFC_abc_2019_frequentielle_results.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
ylim([-100 400])
xlim([0 6])
legend("V_{rd}", "V_{rq}", 'Location', 'southeast')
title("Signaux de commande repère-dq")

```



```
figure
subplot(321)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Udc],LineWidth=3)
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
PFC_abc_2019_frequentielle_results.Udc_cons,'--',LineWidth=2)
ylim([300 650])
xlim([0 6])
grid minor
legend("U_{dc}", "U_{dc}^#", 'Location', 'southeast')
title("Tension bus DC")

subplot(323)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Iabc],LineWidth=1.5)
xlim([0 6])
ylim([-30 30])
grid minor
legend("I_a", "I_b", "I_c")
title("Courants repère-abc")

subplot(325)
hold on
```

```

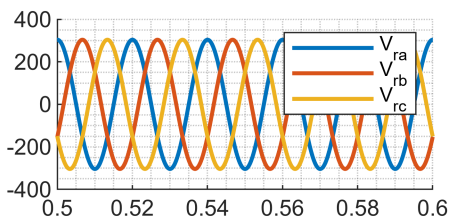
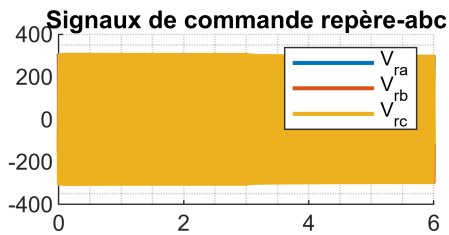
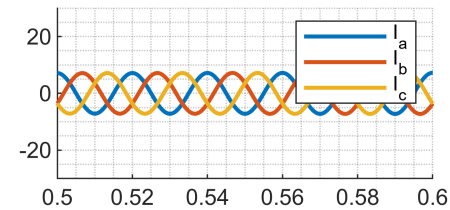
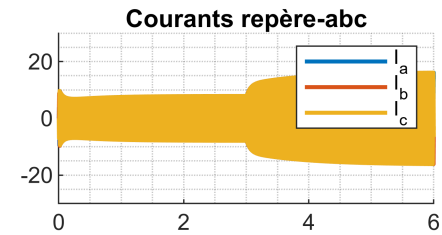
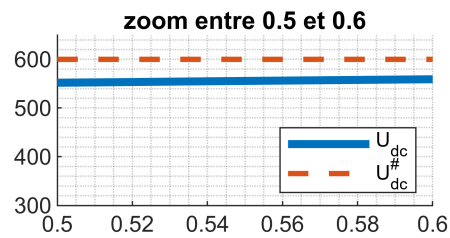
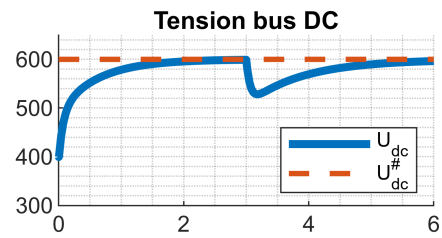
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Vrabc],LineWidth=1.5)
grid minor
ylim([-400 400])
xlim([0 6])
legend("V_{ra}", "V_{rb}", "V_{rc}")
title("Signaux de commande repère-abc")

subplot(322)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Udc],LineWidth=3)
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
PFC_abc_2019_frequentielle_results.Udc_cons, '--',LineWidth=2)
xlim([0.5 0.6])
ylim([300 650])
grid minor
legend("U_{dc}", "U_{dc}^#", 'Location', 'southeast')
title("zoom entre 0.5 et 0.6")

subplot(324)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Iabc],LineWidth=1.5)
xlim([0.5 0.6])
ylim([-30 30])
grid minor
legend("I_a", "I_b", "I_c")

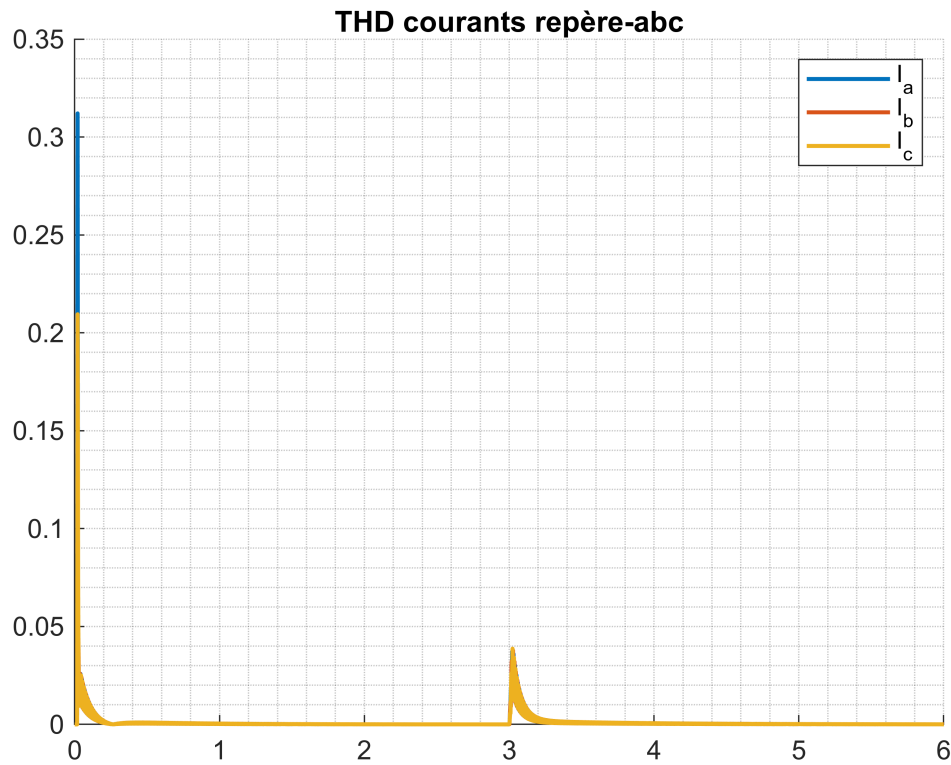
subplot(326)
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.Vrabc],LineWidth=1.5)
grid minor
ylim([-400 400])
xlim([0.5 0.6])
legend("V_{ra}", "V_{rb}", "V_{rc}")

```



4.3.3. Analyser le THD des courants et vérifier le facteur de puissance obtenu.

```
figure
hold on
plot(PFC_abc_2019_frequentielle_results.t,
[PFC_abc_2019_frequentielle_results.THD_Iabc],LineWidth=1.5)
xlim([0 6])
grid minor
legend("I_a","I_b","I_c")
title("THD courants repère-abc")
```



Le THD en fonction du temps montre que la distorsion est la plus importante pendant les transitoires de tension et qu'en régime permanent, sa valeur est presque nulle. Cela signifie que la commande a amélioré le facteur de puissance dans le côté AC en réduisant les harmoniques de courant.

5. Approche temporelle

5.1 Commande optimale des courants I_d , I_q

5.1.1. A partir de l'équation (2), écrire le système sous la forme d'état

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$$

Sous la forme d'état :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rd} - U_d \\ V_{rq} - U_q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + 0 \begin{bmatrix} V_{rd} - U_d \\ V_{rq} - U_q \end{bmatrix}$$

$$x = y = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} V_{rd} - U_d \\ V_{rq} - U_q \end{bmatrix}$$

```
A_courant = [-r/L w; ...
             -w   -r/L];
B_courant = [-1/L 0; ...
             0   -1/L];
C_courant = eye(2);
D_courant = zeros(2);
```

5.1.2. Réaliser une commande optimale à la place des correcteurs utilisés dans 4.1

```
Q = [1 0; 0 100]; % 100 dans Q(2,2) pour améliorer la vitesse de la dynamique de
Iq, vu que on veut le laisser toujours nulle
R = [1 0; 0 1];

[K_courant, S_courant, CLP_courant] = lqr(A_courant,B_courant,Q,R)
```

```
K_courant = 2x2
   -0.4465    0.2350
    0.2350   -9.0398
S_courant = 2x2
    0.0004   -0.0002
   -0.0002    0.0090
CLP_courant = 2x1
104 x
   -0.1452
   -1.0035
```

Calcul de Γ pour corriger l'erreur statique

```
Gamma_courant = -inv(C_courant/(A_courant-B_courant*K_courant)*B_courant)
```

```
Gamma_courant = 2x2
   -1.4465    0.5492
   -0.0791  -10.0398
```

5.1.3. Tester les correcteurs de courant sur Matlab/Simulink comme 4.1.3.

```
temp_simu = 5;
PFC_dq_2019_temporelle_results = sim("PFC_dq_2019_temporelle_courant.slx");

figure
subplot(221)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results.Id,
PFC_dq_2019_temporelle_results.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results.Id_cons,
PFC_dq_2019_temporelle_results.Iq_cons], '--',LineWidth=2)
grid minor
legend("I_d","I_q","I_d^#","I_q^#",'NumColumns',2)
ylim([-1 8])
```

```

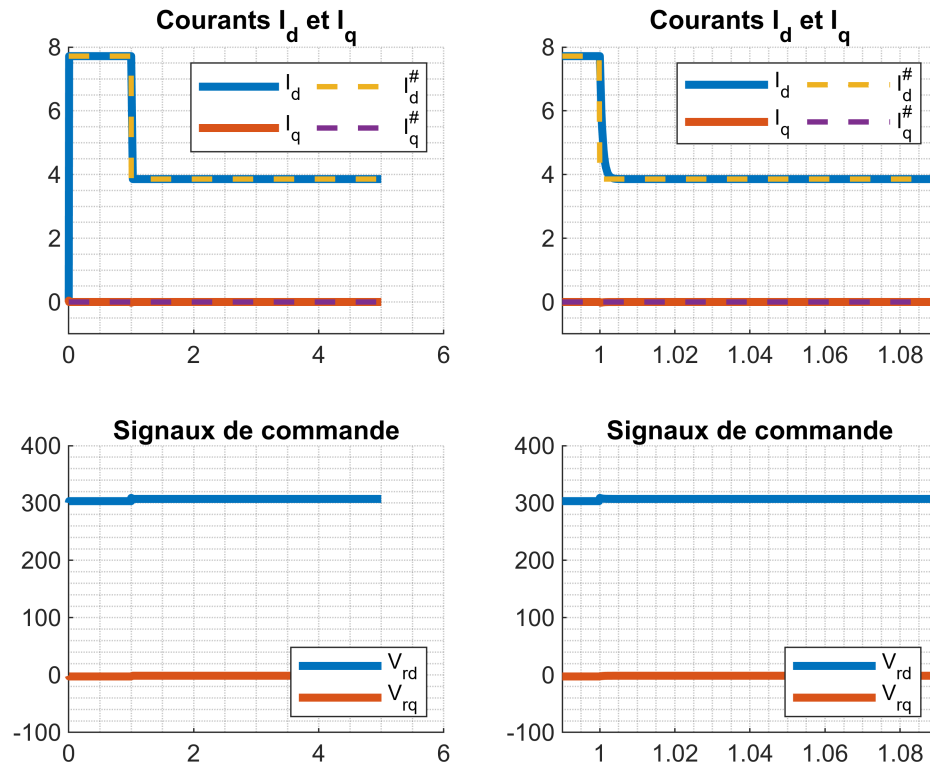
title("Courants I_d et I_q")

subplot(223)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results.Vrd
PFC_dq_2019_temporelle_results.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
legend("V_{rd}", "V_{rq}", 'Location', 'southeast')
title("Signaux de commande")
ylim([-100 400])

subplot(222)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results.Id,
PFC_dq_2019_temporelle_results.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results.Id_cons,
PFC_dq_2019_temporelle_results.Iq_cons], '--', LineWidth=2)
grid minor
legend("I_d", "I_q", "I_d^#", "I_q^#", 'NumColumns', 2)
title("Courants I_d et I_q")
xlim([0.99 1.09])
ylim([-1 8])

subplot(224)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results.Vrd
PFC_dq_2019_temporelle_results.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
legend("V_{rd}", "V_{rq}", 'Location', 'southeast')
title("Signaux de commande")
xlim([0.99 1.09])
ylim([-100 400])

```



La figure montre que les deux courants sont bien maîtrisés par le correcteur.

5.2 Commande optimale de la tension de sortie U_{dc}

5.2.1. Montrer que pour $x = \begin{bmatrix} i_d \\ U_{dc} \end{bmatrix}$, $y = [U_{dc}]$ et $u = [I_d^#]$, on a

$$A_v = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0} & 0 \\ \frac{K}{C} & -\frac{1}{R_{ch}C} \end{bmatrix}, B_v = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_0} \\ 0 \end{bmatrix}, C_v = [0 \quad 1], D_v = 0$$

Si on prend le resultat de la section 4.1, la courant I_d en boucle fermée est exprimée comme :

$$\frac{I_d(p)}{I_d^{\#}(p)} = \frac{1}{T_0 p + 1} \rightarrow I_d(p)(T_0 p + 1) = I_d^{\#}(p)$$

Où $I_d^{\#}$ est la consigne. En faisant la transformée inverse de Laplace :

$$T_0 \frac{di_d}{dt} + i_d = i_d^{\#} \rightarrow \frac{di_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} i_d + \frac{1}{T_0} i_d^{\#}$$

Avec l'approximation fait en 3.2, la dynamique de U_{dc} est comme :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{K_v}{C} i_d - \frac{1}{R_{ch}C} U_{dc}$$

Où K_v est égal à $\frac{3}{2} \frac{E}{U_{dc}^{\#}}$

$$K_v = (3/2) * E / U_{dc_cons};$$

Donc, sous la forme d'état, le système est réécrit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0} & 0 \\ \frac{K_v}{C} & -\frac{1}{R_{ch}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_0} \\ 0 \end{bmatrix} I_d^{\#}$$

$$U_{dc} = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_d \\ U_{dc} \end{bmatrix} + 0 I_d^{\#}$$

Où $x = \begin{bmatrix} i_d \\ U_{dc} \end{bmatrix}$, $y = U_{dc}$ et $u = I_d^{\#}$

```
A_udc = [-1/tau_bf 0; ...
          Kv/C    -1/(Rch*C)];
B_udc = [1/tau_bf 0]';
C_udc = [0 1];
D_udc = 0;
```

5.2.2. Réaliser une commande optimale à la place des correcteurs utilisés dans 4.2

```
Q = [1 0; 0 1];
R = 500; % valeur important pour reduire l'effort (dans ce cas l'amplitude de la
courant id)

[K_udc, S_udc, CLP_udc] = lqr(A_udc,B_udc,Q,R)
```

```
K_udc = 1x2
    0.0228    0.0334
S_udc = 2x2
    0.0457    0.0668
    0.0668    0.1041
CLP_udc = 2x1
   -7.6942
  -250.1406
```

Calcul de Γ pour corriger l'erreur statique

$$\Gamma_{udc} = -\text{inv}(C_{udc}/(A_{udc}-B_{udc}*K_{udc})*B_{udc})$$

$$\Gamma_{udc} = 0.0465$$

5.2.3. Refaire les tests comme 3.2.5 et 3.2.6.

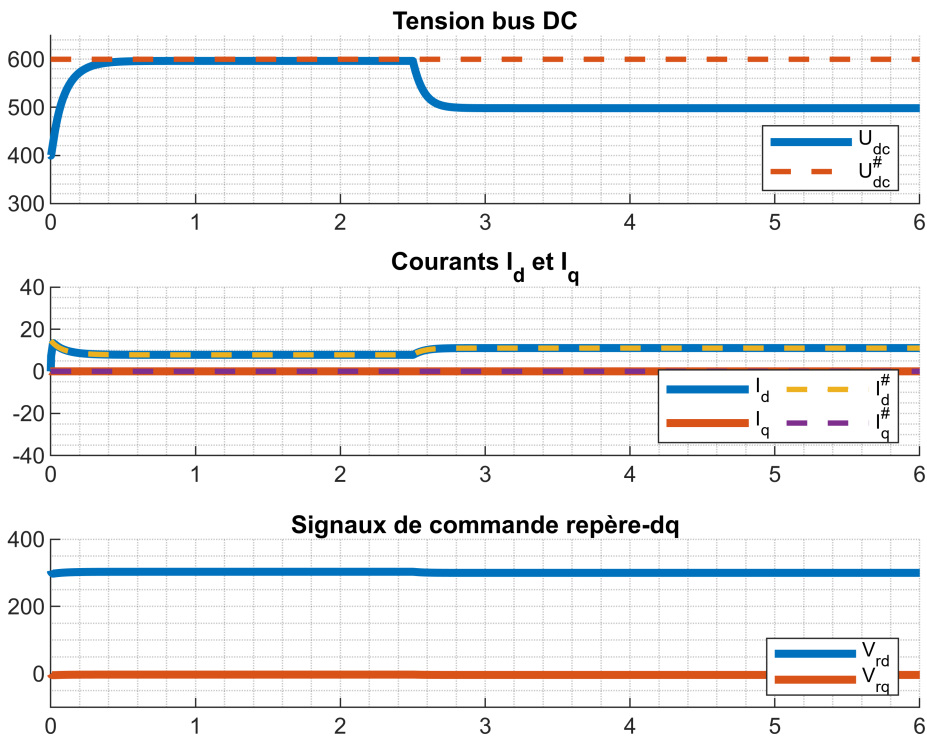
La variation de la charge est appliquée en t égale à 2.5s.

```
temp_simu = 8;
PFC_dq_2019_temporelle_results_2 = sim("PFC_dq_2019_temporelle.slx");

figure
subplot(311)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_2.t,
[PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Udc],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_2.t,
PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Udc_cons,'--',LineWidth=2)
ylim([300 650])
xlim([0 6])
grid minor
legend("U_{dc}", "U_{dc}^#", 'Location', 'southeast')
title("Tension bus DC")

subplot(312)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_2.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Id,
PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_2.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Id_cons,
PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Iq_cons], '--',LineWidth=2)
xlim([0 6])
ylim([-40 40])
grid minor
legend("I_d", "I_q", "I_d^#", "I_q^#", 'NumColumns', 2, 'Location', 'southeast')
title("Courants I_d et I_q")

subplot(313)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_2.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Vrd
PFC_dq_2019_temporelle_results_2.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
ylim([-100 400])
xlim([0 6])
legend("V_{rd}", "V_{rq}", 'Location', 'southeast')
title("Signaux de commande repère-dq")
```



L'asservissement du système est bien maîtrisé, par contre quelque soit la perturbation appliqué il n'est pas capable de régler comme la variation de charge. Il faut implémenter le retour d'état étendu pour corriger les erreurs statique en ajoutant une action intégrale.

Correcteur avec action intégrale

```
A_udc_etendu = [-1/tau_bf      0      0;...
                 Kv/C      -1/(Rch*C) 0;...
                 0      -1      0];
B_udc_etendu = [1/tau_bf 0 0]';

Q = [1 0 0; 0 0 0; 0 0 1]; % Q(3,3) plus important pour accélérer la réponse de
l'erreur
R = 1;

[K_udc_etendu, S_udc_etendu, CLP_udc_etendu] = lqr(A_udc_etendu,B_udc_etendu,Q,R)

K_udc_etendu = 1x3
    0.4675    0.1159   -1.0000
S_udc_etendu = 3x3
    0.0019    0.0005   -0.0040
    0.0005    0.0010   -0.0089
   -0.0040   -0.0089    0.1348
CLP_udc_etendu = 3x1 complex
102 ×
   -0.0772 + 0.0758i
   -0.0772 - 0.0758i
```

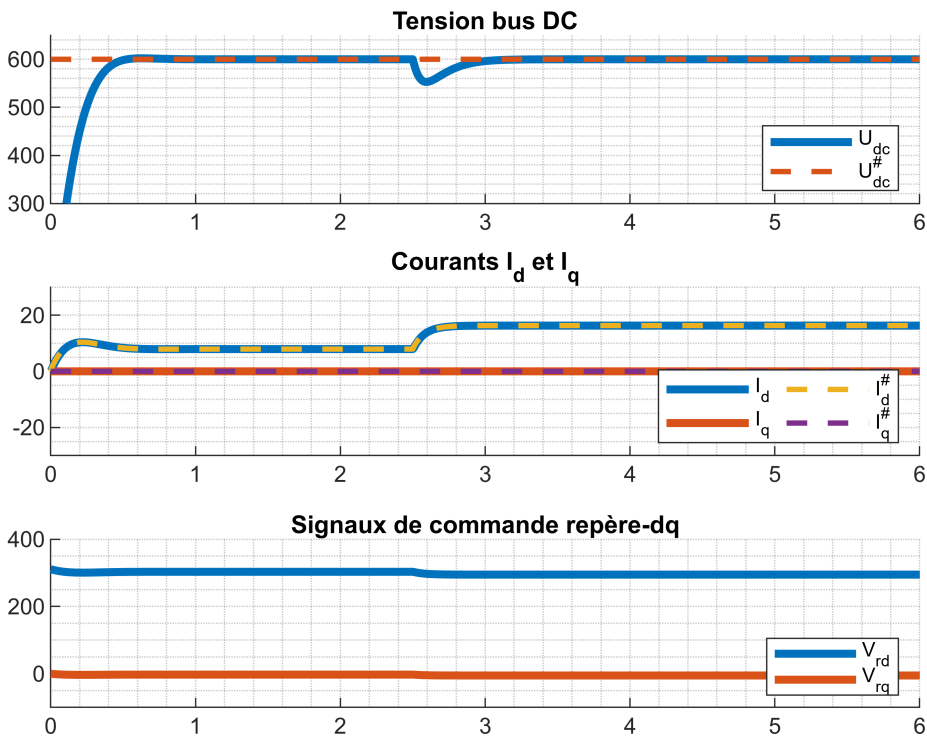
-3.5355 + 0.0000i

```
temp_simu = 8;
PFC_dq_2019_temporelle_results_3 = sim("PFC_dq_2019_temporelle_etendu.slx");

figure
subplot(311)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_3.t,
[PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Udc],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_3.t,
PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Udc_cons,'--',LineWidth=2)
ylim([300 650])
xlim([0 6])
grid minor
legend("U_{dc}", "U_{dc}^#", 'Location', 'southeast')
title("Tension bus DC")

subplot(312)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_3.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Id,
PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Iq],LineWidth=3)
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_3.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Id_cons,
PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Iq_cons], '--', LineWidth=2)
xlim([0 6])
ylim([-30 30])
grid minor
legend("I_d", "I_q", "I_d^#", "I_q^#", 'NumColumns', 2, 'Location', 'southeast')
title("Courants I_d et I_q")

subplot(313)
hold on
plot(PFC_dq_2019_temporelle_results_3.t, [PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Vrd
PFC_dq_2019_temporelle_results_3.Vrq],LineWidth=3)
grid minor
ylim([-100 400])
xlim([0 6])
legend("V_{rd}", "V_{rq}", 'Location', 'southeast')
title("Signaux de commande repère-dq")
```



L'asservissement et la regulation du système est bien maîtrisé. La perturbation appliqué en variant la charge est rapidement réglée.

6. Implémentation et conclusion

6.1. Compléter le schéma technologique (Figure 2) de l'ensemble du système commandé.

Comme $U_{dc} = 600V$ et $E = 311V$, il faut utiliser une **modulation vectorielle** pour pouvoir respecter les limites de modulation :

Van maximale pour MLI intersective :

$$U_{dc_cons}/2$$

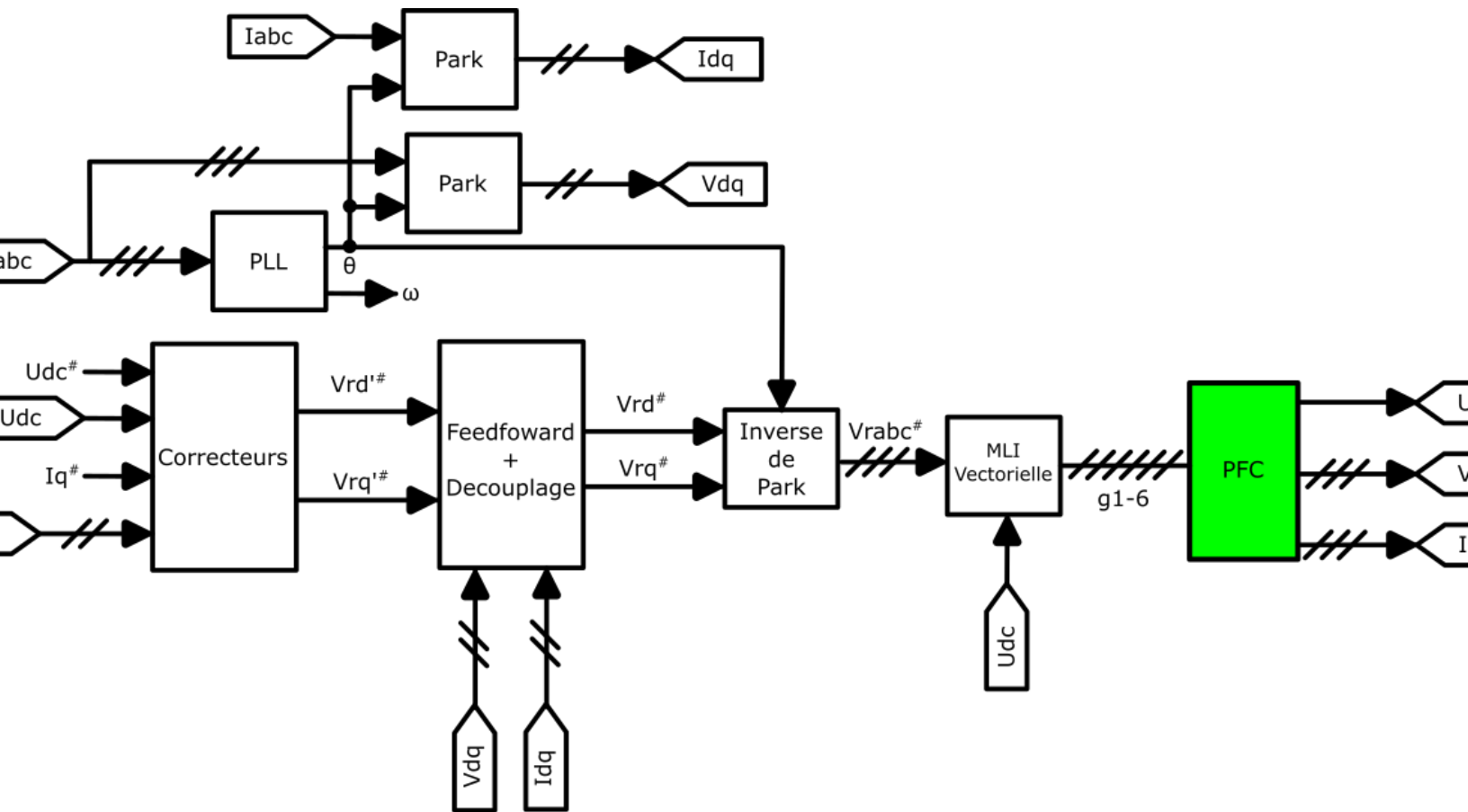
$$\text{ans} = 300$$

Van maximale pour MLI vectorielle :

$$U_{dc_cons}/\sqrt{3}$$

$$\text{ans} = 346.4102$$

L'image ci-dessous montre le schema global de commande de ce convertisseur.



6.2. Commenter les commandes synthétisées et conclure sur votre projet.

Tous les techniques ont eu des bonne resultats pour la commande de ce convetisseur.

L'approche frequentielle discretisée a permis définir la dynamique souhaitée en boucle fermée. Le méthode de feedforward a bien decouplé les composants de courantes et le système est capable de régler des variations de charge. Cependant, en raison des approximations mathématiques et même des parties des fonctions de transfert qui ont été négligées, telles que les zéros, le comportement en boucle fermée du système a montré des différences de dynamique entre le théorique et l'obtenu, pour l'asservissement et pour régulation.

L'approche temporelle en utilisant le contrôle optimal a simplifié la commande. À la place des fonctions de transfert des correcteurs, seulement une combinaison lineaire des états en utilisant le gain obtenu via LQR. La commande a montrée des bons résultats pour l'asservissement, mais pas pour la régulation. Il a fallu mise en oeuvre le retour d'état etendu pour corriger cet problème. Avec un compromis entre effort de courant et vitesse de la dynamique, le correcteur etendu a présenté des bons résultats avec une dynamique plus vite que l'approche frequentielle et plus robuste à des variations de charge.

Independent des techniques de commande, le modèle a montré que si bien controlée, le redresseur fait apparaître des courant plus sinusoïdales dans le côté AC à la place des courants pulsées comme dans un redresseur classique à diodes. Ce qui améliore le THD et ramene le facteur de puissance plus proche de 1, la valeur idéale.