

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación**

**"Comparación de las Arquitecturas de control de Tensión del DC-Link en el lado de la red y en el lado de la máquina para el generador síncrono de imanes permanentes conectado a la red"**

**Autores:**

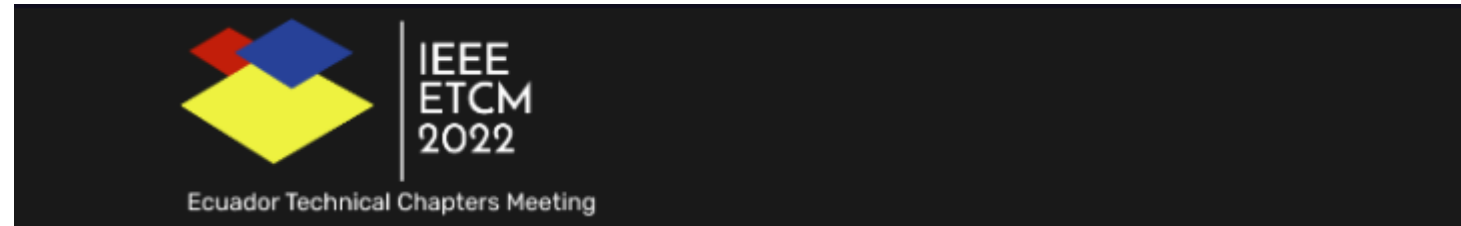
Molina Gordillo, Steven Xavier  
Santo Chiluisa, Marco Antonio

**Tutor.** Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario MSc. PhD

**Co-Tutor.** Ing. Franklin Manuel, Silva Monteros MSc

**Colaborador externo.** Jorge, Vega Herrera MSc. C.PhD





MOLINA GORDILLO, STEVEN XAVIER <sxmolina@espe.edu.ec>

Aceptado para  
Publicación

## ETCM 2022 Acceptance notification for paper 73

1 mensaje

ETCM 2022 <etcm2022@easychair.org>  
Para: Steven Molina <sxmolina@espe.edu.ec>

11 de agosto de 2022, 14:28

Dear Steven Molina,

We are pleased to inform you that your paper No. 73, title "Comparison of DC-Link Voltage Control Architectures on Grid-Side and Machine-Side for Permanent Magnet Synchronous Generator Connected to the Grid" has been accepted by the Reviewers Committee Systems and Control & Industrial Electronics of the ETCM 2022. The Committee informs you that before 31 August 2022, you should make the changes suggested by the reviewers.

In a few days, we will send Camera-Ready instructions: how to use the PDF-Express tool, where you have to upload the approved version, and how to transfer copyright to IEEE.

With Warmest Regards

Fernando Carrera - Soraya Sinche

Technical Program Chairs  
[fernando.carrera@epn.edu.ec](mailto:fernando.carrera@epn.edu.ec)  
[soraya.sinche@epn.edu.ec](mailto:soraya.sinche@epn.edu.ec)

- 1 Introducción
- 2 Funcionamiento del Proceso
- 3 Modelamiento Matemático
- 4 Diseño de Controladores
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones

- 1** **Introducción**
- 2 Funcionamiento del Proceso
- 3 Modelamiento Matemático
- 4 Diseño de Controladores
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones

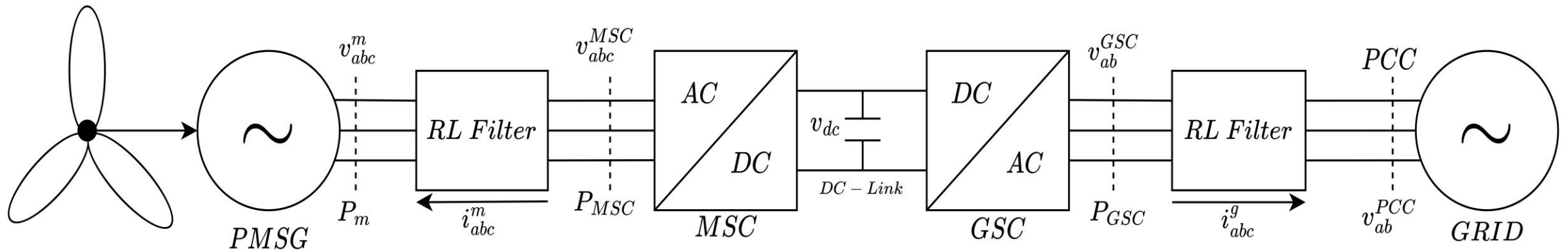
## Planteamiento del Problema

La demanda eléctrica proveniente de fuentes de energía de recursos no renovables ha ido aumentando hasta convertirse en un problema mundial. La energía eólica se considera uno de los recursos renovables que ayuda a mitigar estos problemas, sin embargo, el principal problema de este tipo de sistemas se presenta en la potencia obtenida por los aerogeneradores, ya que, mantienen una relación cúbica con la velocidad del viento, donde la variación de la velocidad produce fluctuaciones de energía y dificulta la operación del sistema, por lo tanto, es necesario:

- El uso de convertidores electrónicos de potencia
- El diseño de controladores



## Esquema de un sistema de conversión de energía eólica basado en generador síncrono de imanes permanentes (PMSG)



## **OBJETIVO GENERAL**

- Simular y controlar un aerogenerador conectado a la red con el fin de maximizar el aprovechamiento de la potencia generada y su buen desempeño.

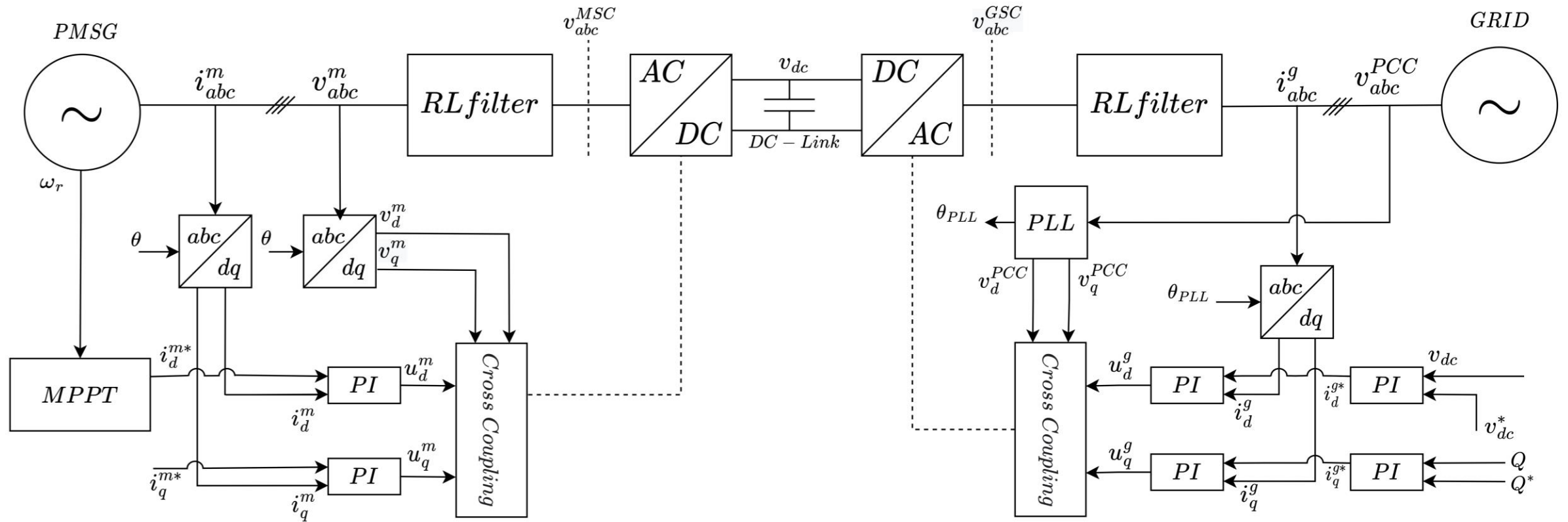
## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Investigar el funcionamiento de sistemas de generación eólica y las estrategias de control implementadas en el mismo.
- Desarrollar un simulador dinámico integrando todos los componentes que intervienen en un sistema de generación eólico, incluyendo la interface de electrónica de potencia.
- Diseñar, simular y validar una estrategia de control para un generador eólico, que permita aprovechar al máximo el recurso natural (viento).
- Reportar los resultados obtenidos en un artículo científico

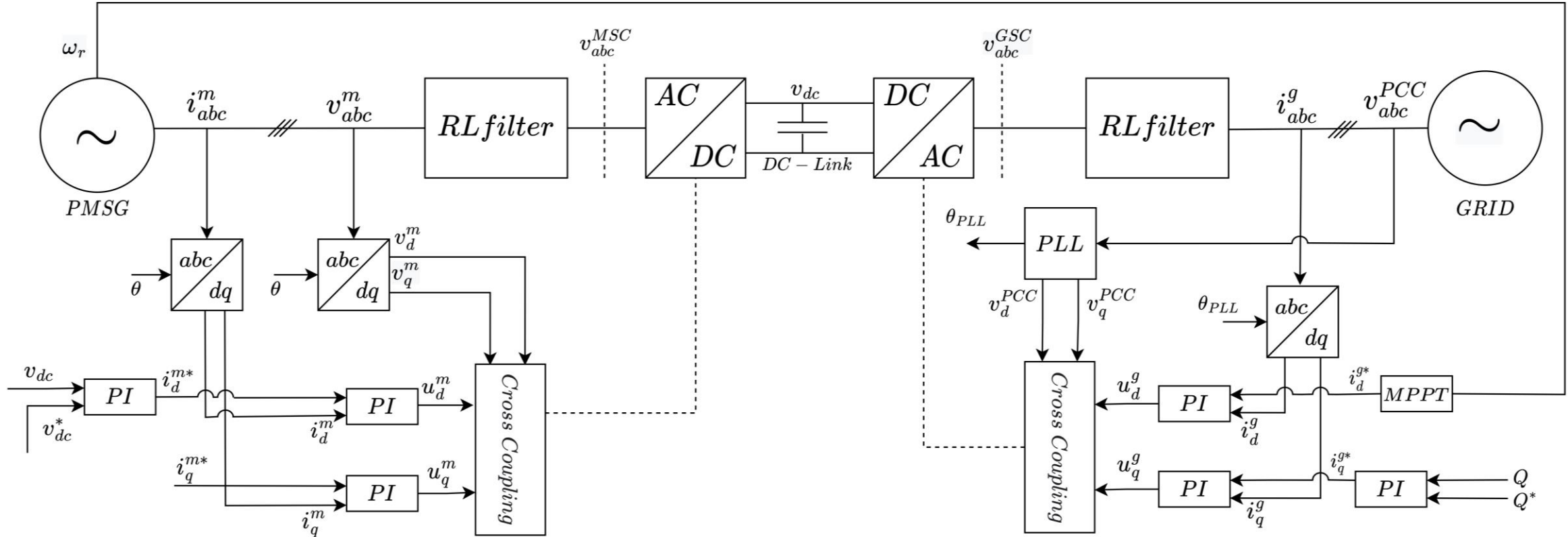
- 1 Introducción
- 2 Funcionamiento del Proceso**
- 3 Modelamiento Matemático
- 4 Diseño de Controladores
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones



## Control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de red



## Control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de máquina

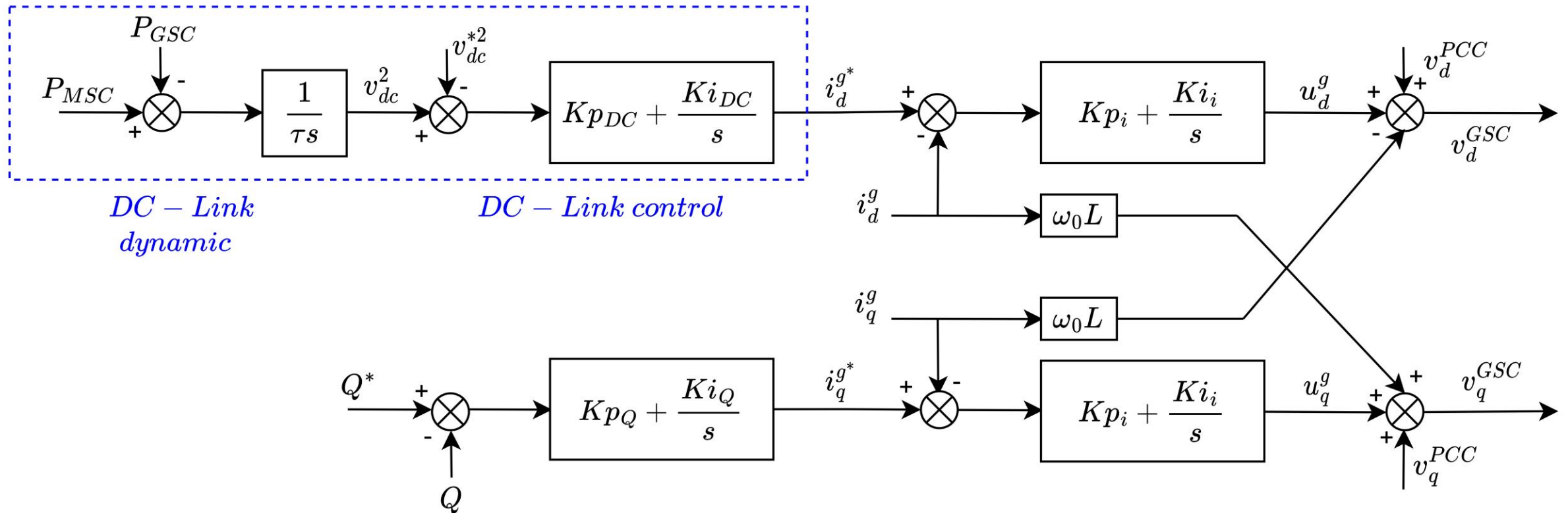


## Variables sistema de conversión de energía eólica basado en generador síncrono de imanes permanentes (PMSG)

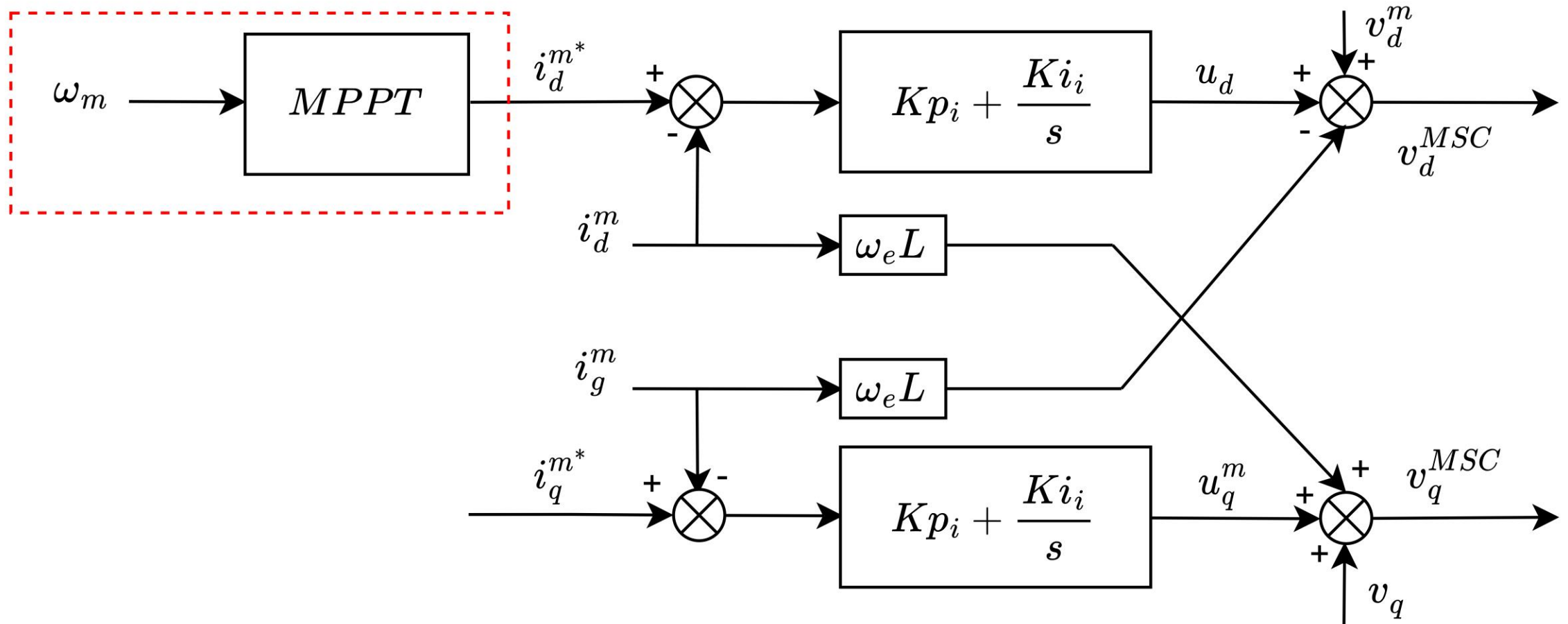
Variables Manipuladas		
$P_m$	Potencia en el generador PMSG	[W]
$P_{GRID}$	Potencia en la red	[W]
$P_{MSC}$	Potencia en MSC	[W]
$P_{GSC}$	Potencia en GSC	[W]

Variables Controladas		
$i_d^{MSC}$	Corriente en MSC (d)	[A]
$i_q^{MSC}$	Corriente en MSC (q)	[A]
$i_d^{GSC}$	Corriente en GSC (d)	[A]
$i_q^{GSC}$	Corriente en GSC (q)	[A]
$v_{dc}$	Voltaje en el DC-Link	[v]

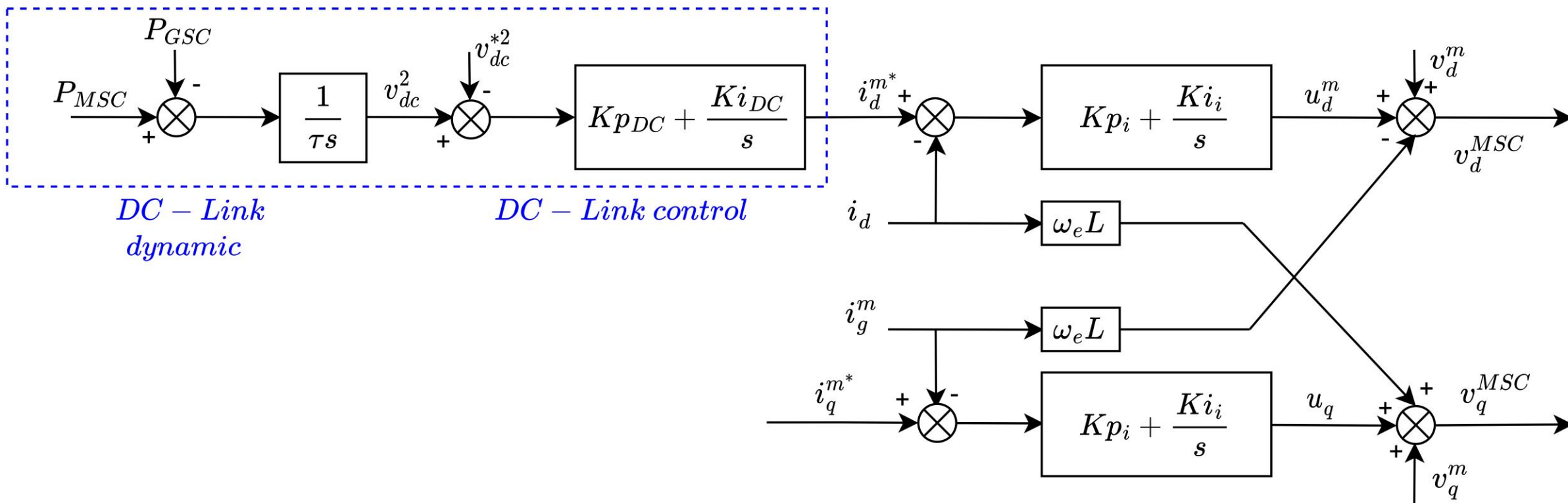
## Convertidor de lado de red (GSC) con el control de voltaje del DC-Link en el lado de red



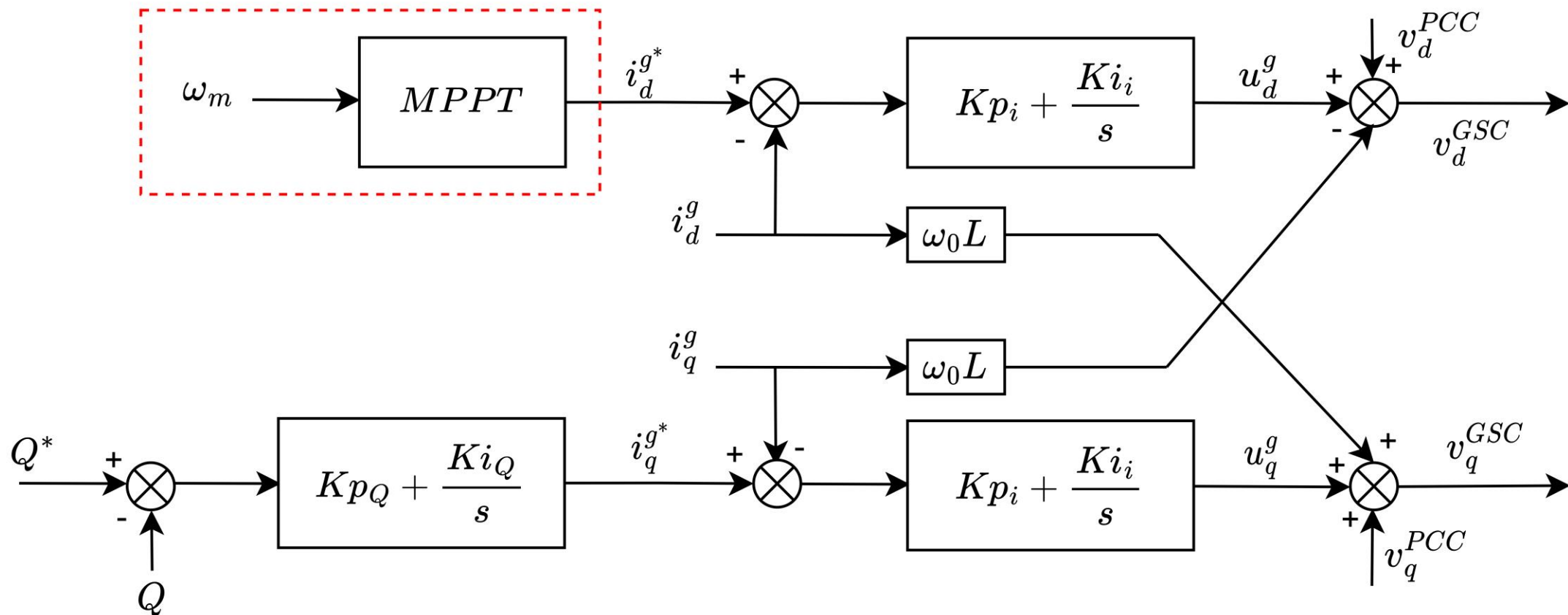
## Convertidor de lado de máquina (MSC) con el control de voltaje del DC-Link en el lado de red



## Convertidor de lado de máquina (MSC) con el control de voltaje del DC-Link en el lado de máquina



## Convertidor de lado de red (GSC) con el control de voltaje del DC-Link en el lado de maquina



- 1 Introducción
- 2 Funcionamiento del Proceso
- 3 Modelamiento Matemático**
- 4 Diseño de Controladores
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones



## MODELO DE TURBINA EÓLICA

Está compuesto por:

- Generador PMSG
- Convertidor de fuente de tensión (VSC) en configuración back-to-back (MSC y GSC)
- Filtros de tipo L
- Condensador de enlace de CC.

## Modelo PMSG

$$v_d^m = -R_s i_{sd} - \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_e \psi_{sq} \quad (1)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + \psi_{fd} \quad (3)$$

$$v_q^m = -R_s i_{sq} - \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \omega_e \psi_{sd} \quad (2)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + \psi_{fq} \quad (4)$$

Sustituyendo (3) y (4) en (2) y (1) respectivamente

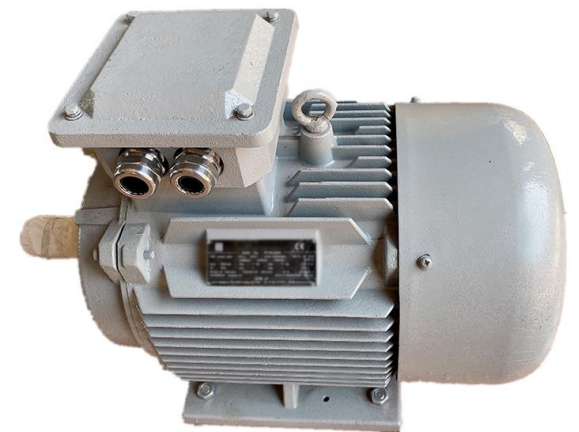
$$v_d^m = -R_s i_{sd} - \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_e L_s i_{sq} - \omega_e \psi_{fq} \quad (5)$$

$$v_q^m = -R_s i_{sq} - \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_e L_s i_{sd} - \omega_e \psi_{fd} \quad (6)$$

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = 0, \quad \frac{d\psi_{sq}}{dt} = 0, \quad R_s \approx 0\Omega, \quad L_s \approx 0H$$

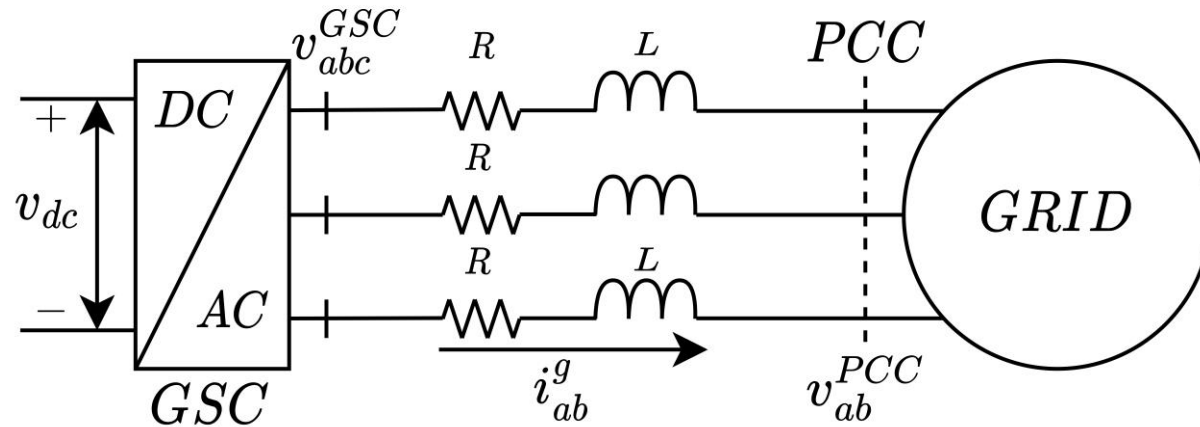
$$v_d^m = -\omega_e \psi_{fq} \quad (7)$$

$$v_q^m = -\omega_e \psi_{fd} \quad (8)$$



- 1 Introducción
- 2 Funcionamiento del Proceso
- 3 Modelamiento Matemático
- 4 Diseño de Controladores**
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones

## Diseño de Controladores de Corriente



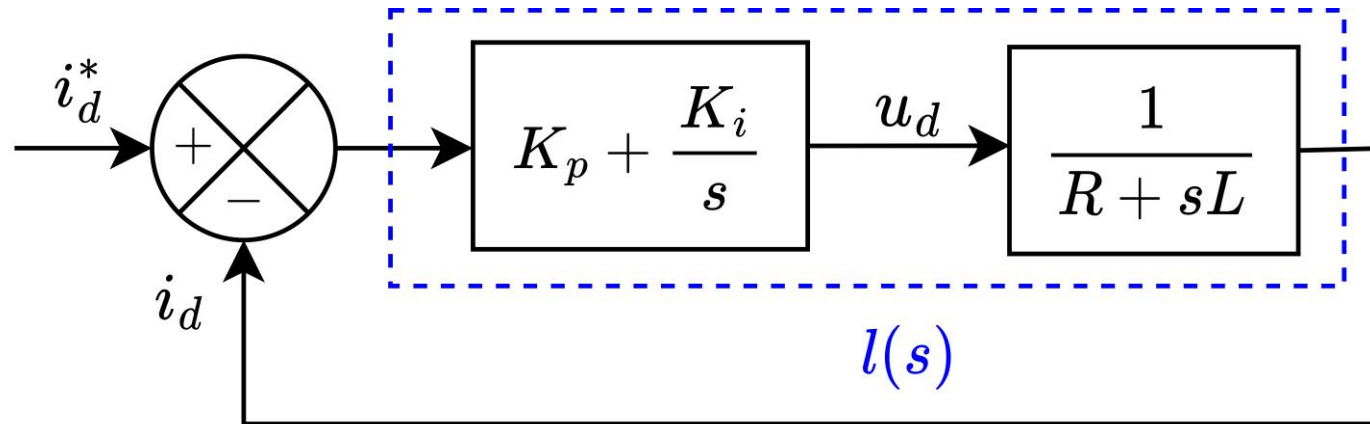
$$v_{abc}^{GSC} - v_{abc}^{PCC} = L \frac{di_{abc}^g}{dt} + Ri_{abc}^g \quad (9)$$

$$(v_d^{GSC} + jv_q^{GSC}) - (v_d^{PCC} + jv_q^{PCC}) = L \frac{d(i_d^g + ji_q^g)}{dt} + j\omega_0 L(i_d^g + ji_q^g) + R(i_d^g + ji_q^g) \quad (10)$$

$$L \frac{di_d^g}{dt} + Ri_d^g = \underbrace{v_d^{GSC} - v_d^{PCC} + \omega_0 Li_d^g}_{u_d} \quad (11)$$

$$L \frac{di_q^g}{dt} + Ri_q^g = \underbrace{v_q^{GSC} - v_q^{PCC} + \omega_0 Li_q^g}_{u_q} \quad (12)$$

## Diseño de Controladores de Corriente



$$l(s) = \frac{K_p}{sL} \left( \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s + \frac{R}{L}} \right) \quad (13)$$

## Diseño de Controladores de Corriente

El polo de la planta está muy cerca del origen, por lo que se cancela con el cero, por lo tanto,

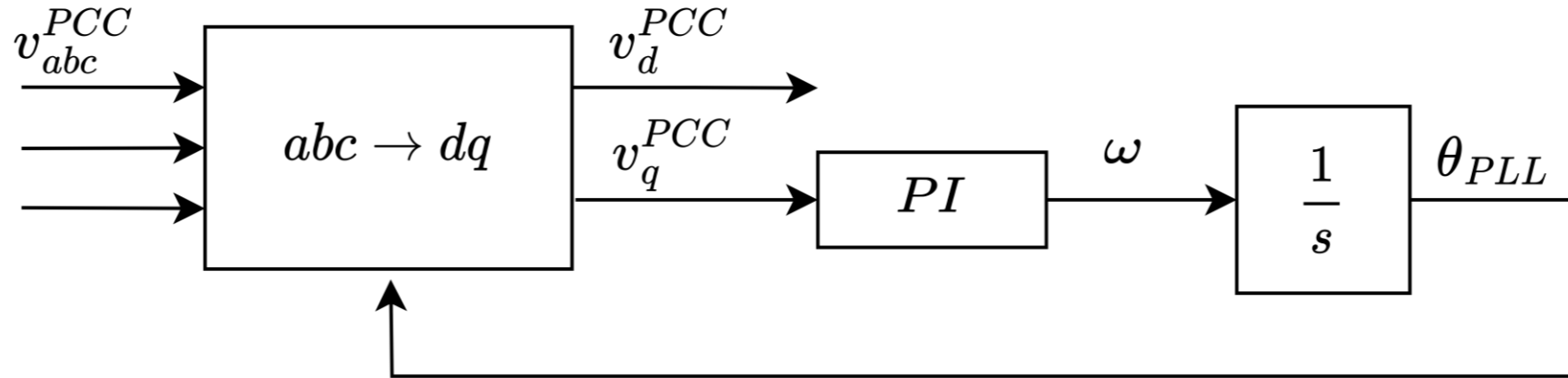
Considerando:  $\left(\frac{K_i}{K_p} = \frac{R}{L}\right)$ , entonces:

$$l(s) = \frac{K_p}{sL} \quad (14)$$

Donde:  $\tau = \frac{L}{K_p}$  y  $K_i = \frac{R}{\tau}$

$$G(s) = \frac{l(s)}{1+l(s)} = \frac{1}{\tau s+1} \quad (15)$$

## Diseño del bucle de enganche de fase (PLL)



$$v_d^{PCC} = \frac{3}{2} \left( v_a^{PCC} \cos(\theta_{PLL}) + v_b^{PCC} \cos\left(\theta_{PLL} - \frac{2\pi}{3}\right) + v_c^{PCC} \cos\left(\theta_{PLL} \mp \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

$$v_q^{PCC} = -\frac{3}{2} \left( v_a^{PCC} \sin(\theta_{PLL}) + v_b^{PCC} \sin\left(\theta_{PLL} - \frac{2\pi}{3}\right) + v_c^{PCC} \sin\left(\theta_{PLL} \mp \frac{2\pi}{3}\right) \right)$$

## Seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)

$$P_m = K_{opt} \omega_T^3 \quad (16)$$

## Diseño del controlador de voltaje en el DC-Link

$$C v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = P_{MSC} - P_{GSC} \quad (17)$$

$$P_{MSC} = \frac{3}{2} (v_d^{MSC} i_d^g + v_q^{MSC} i_q^g) \quad (18)$$

$$P_{GSC} = \frac{3}{2} (v_d^{GSC} i_q^g + v_q^{GSC} i_d^g) \quad (19)$$

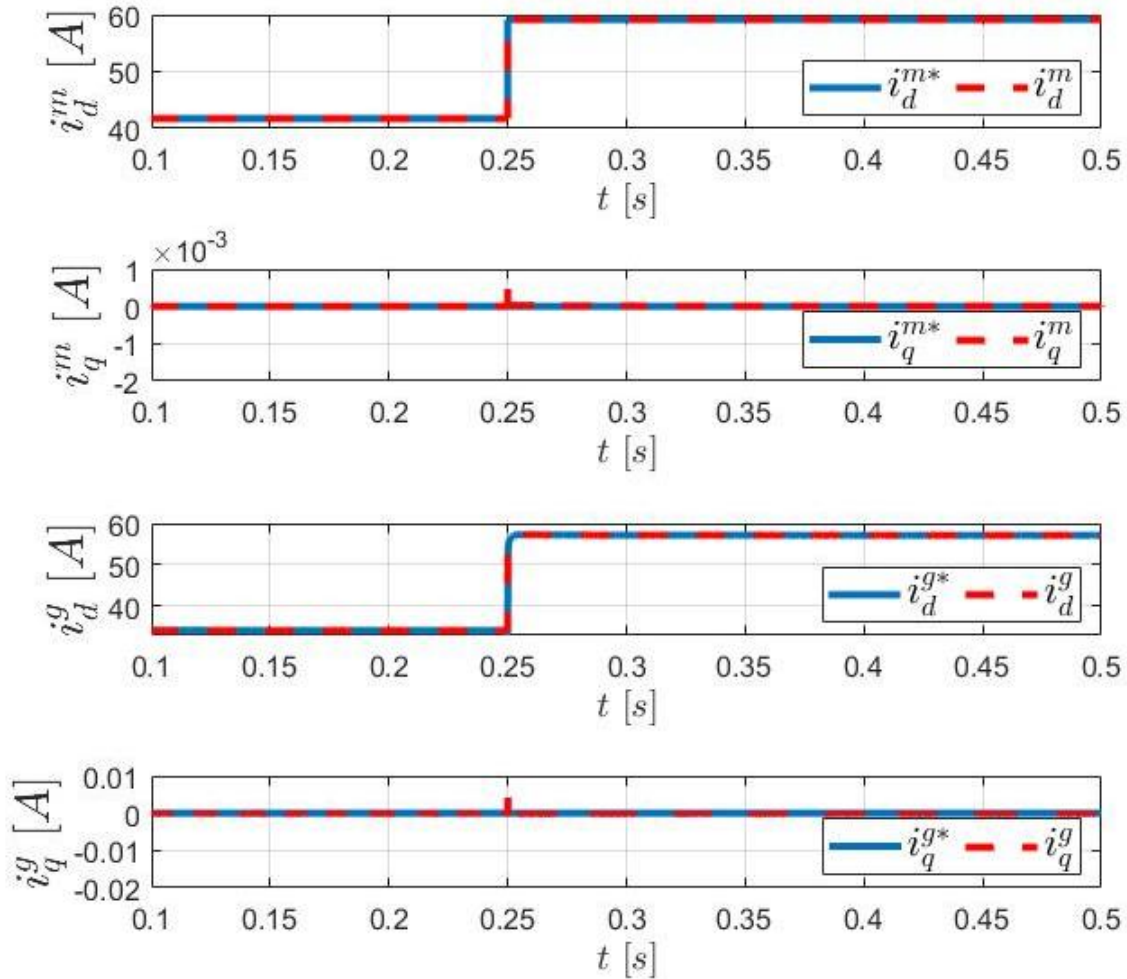


- 1 Introducción
- 2 Funcionamiento del Proceso
- 3 Modelamiento Matemático
- 4 Diseño de Controladores
- 5 Resultados**
- 6 Conclusiones

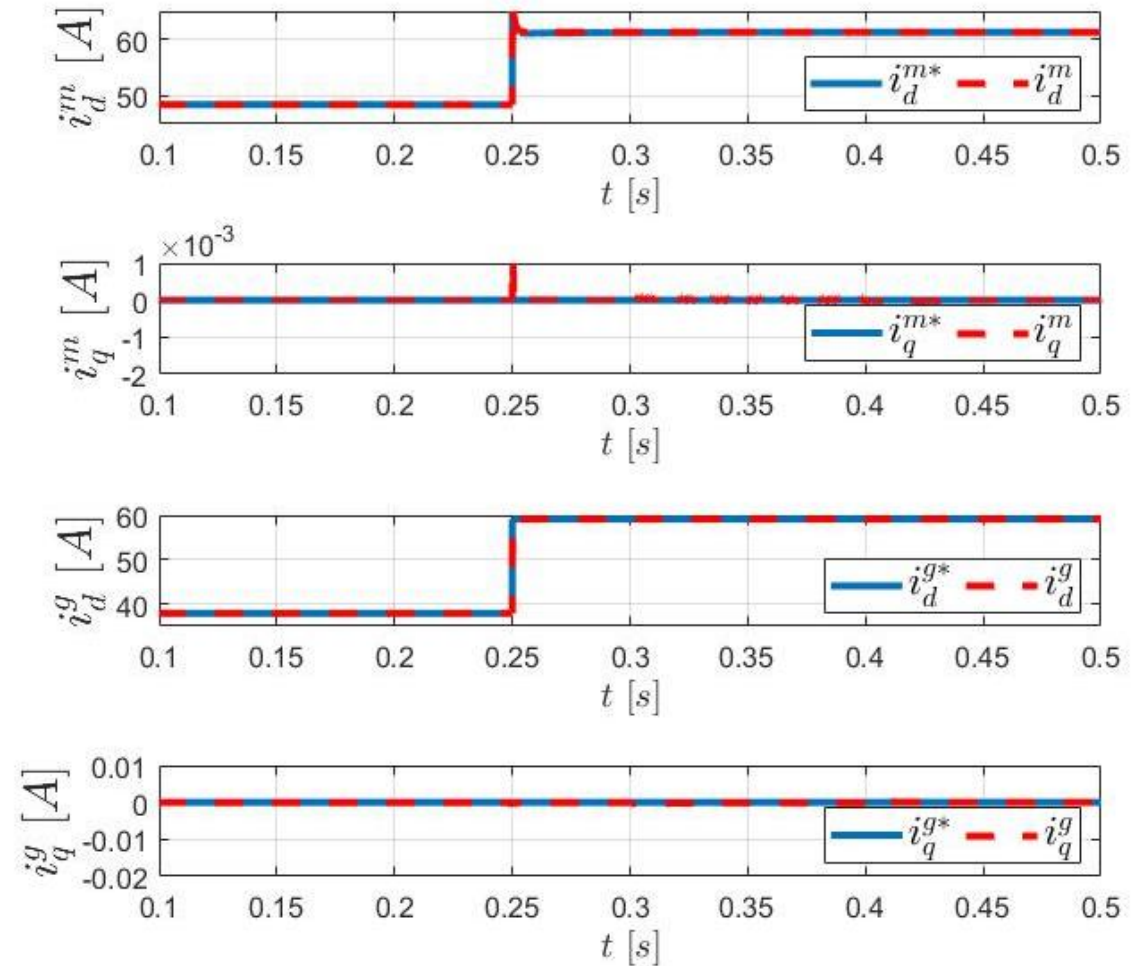
## TABLA I. PARÁMETROS DEL SISTEMA Y GANANCIAS DEL CONTROLADOR

Description	Parameters	Values
Grid phase voltage (peak value)	$v_{abc}^g$	400 v
Grid frequency	$f_g$	60 Hz
Resistor (Filter)	$R$	0.25 $\Omega$
Inductante (Filter)	$L$	0.007 H
DC-link voltage	$v_{dc}$	1200 v
Machine Constant	$K_{opt}$	0.0001778
DC-link capacitor	$C$	0.001 F
Current control	$(Kp_i, Ki_i)$	(4.398, 157.079)
PLL control	$(Kp_{PLL}, Ki_{PLL})$	(125.66, 394784.176)
DC-link control	$(Kp_{DC}, Ki_{DC})$	(3.22, 126.4)

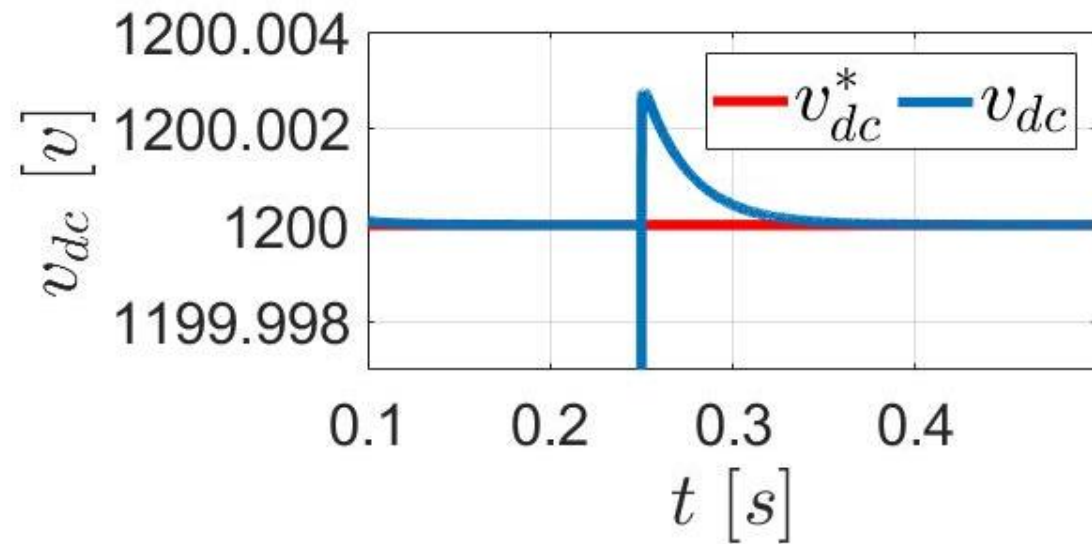
Corriente de la máquina y del generador cuando se controla el voltaje en el DC-link en el lado de red



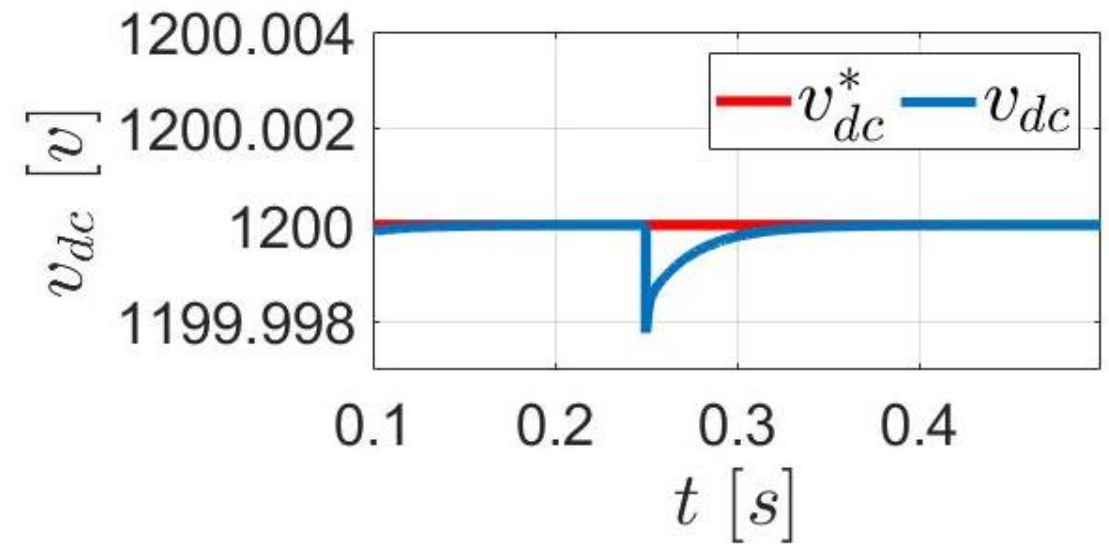
Corriente de la máquina y del generador cuando se controla el voltaje en el DC-link en el lado de maquina



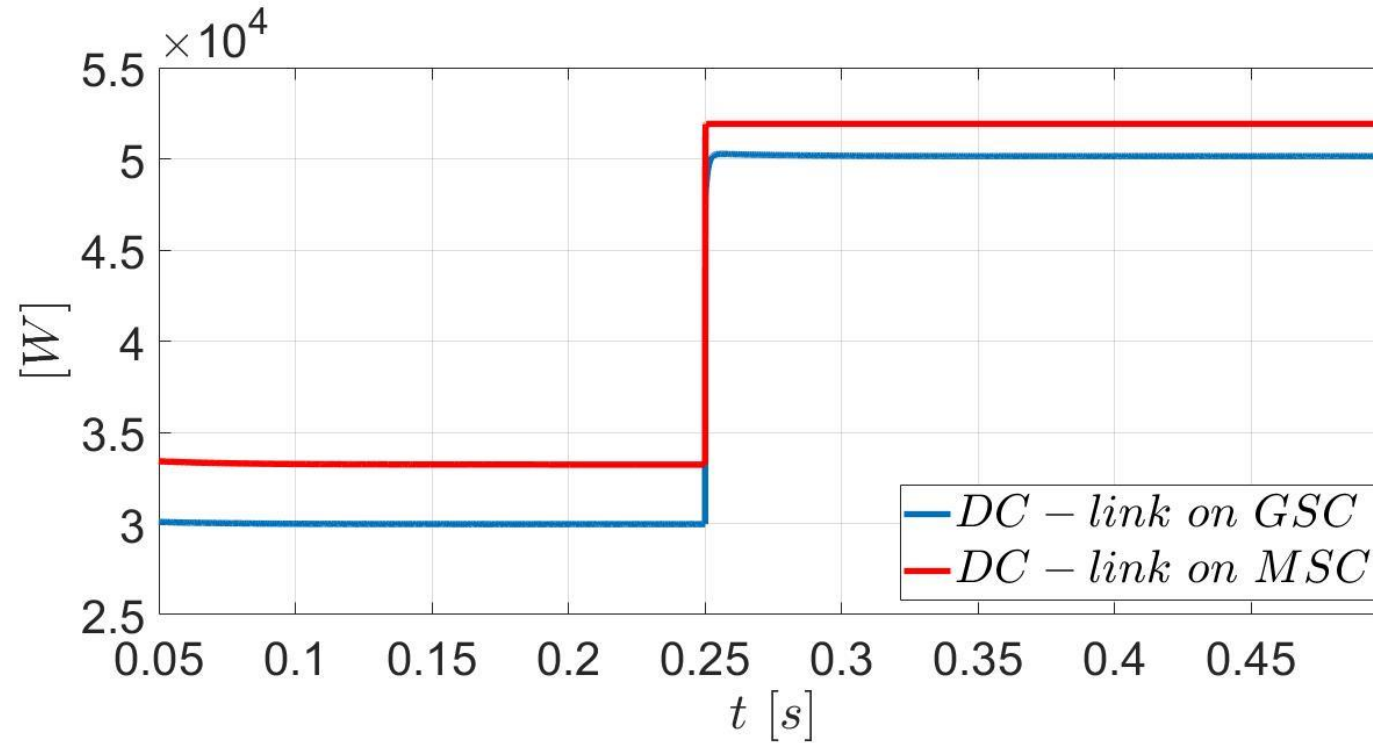
Control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de red



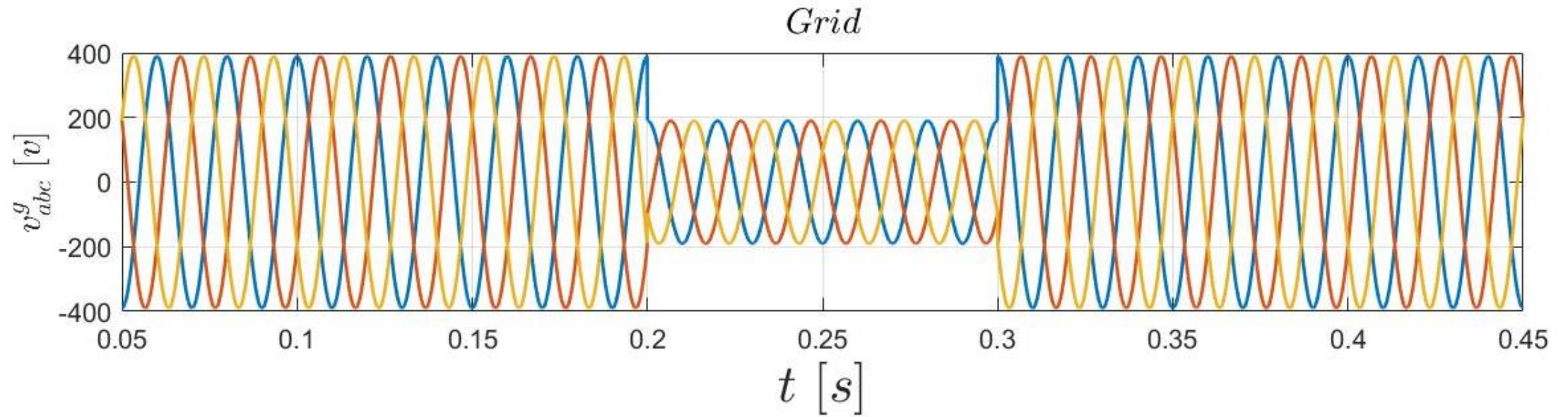
Control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de máquina.



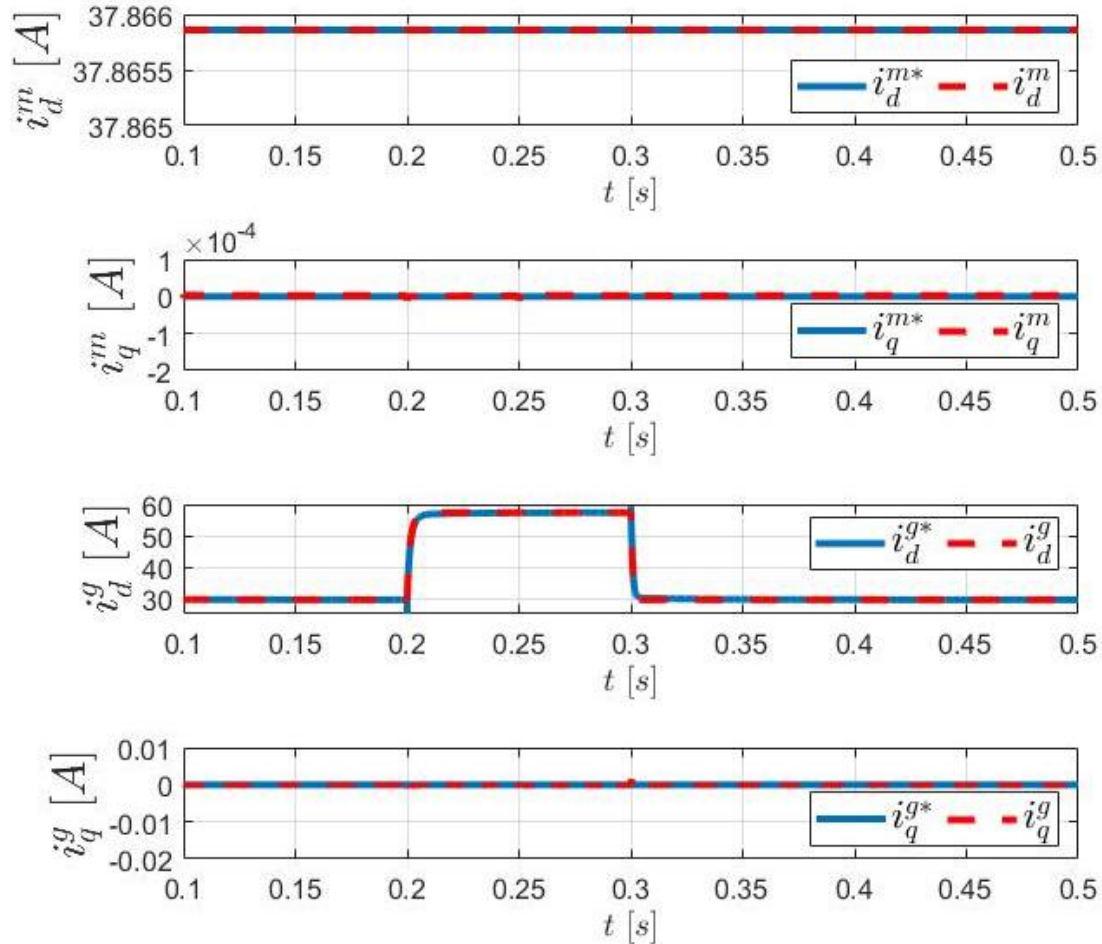
## Potencia activa en el PCC



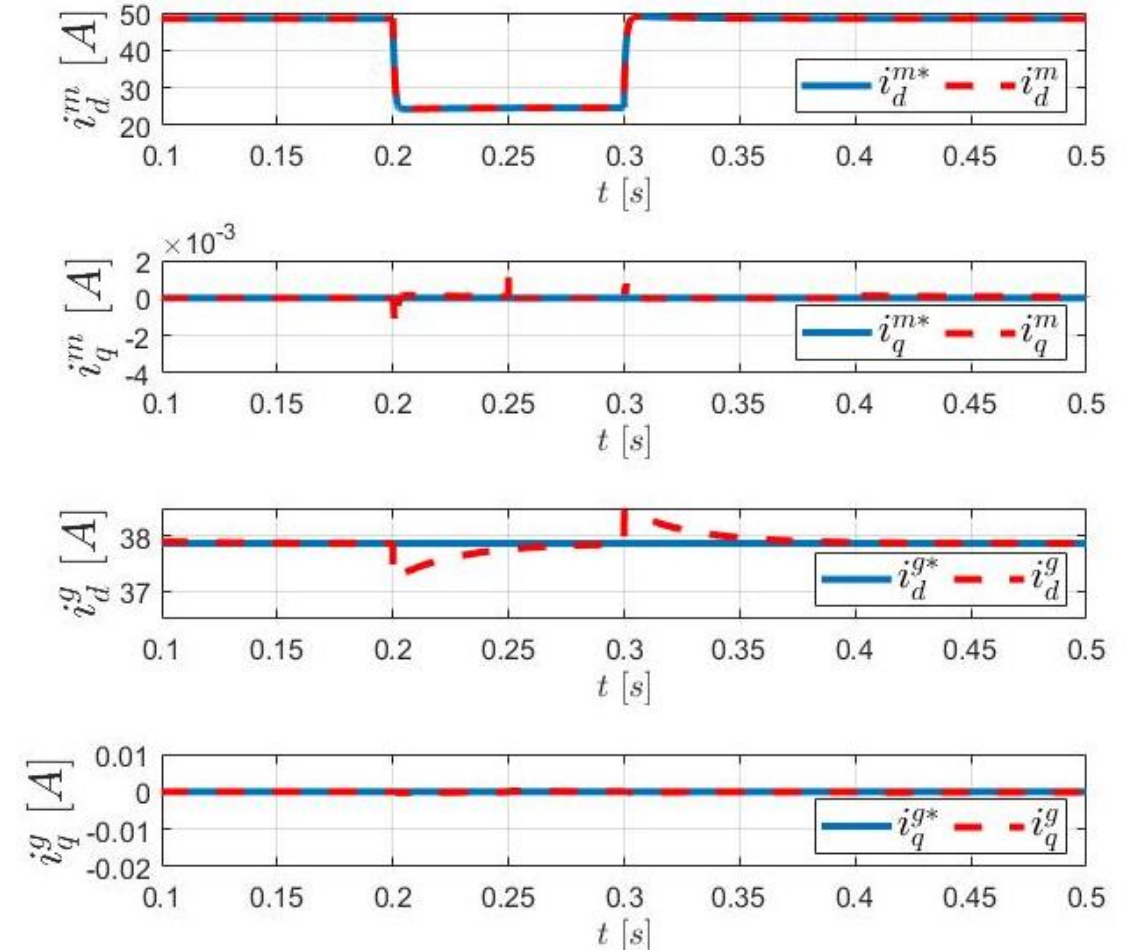
Reducción del 50% de la tensión de red  $v_{abc}^g$



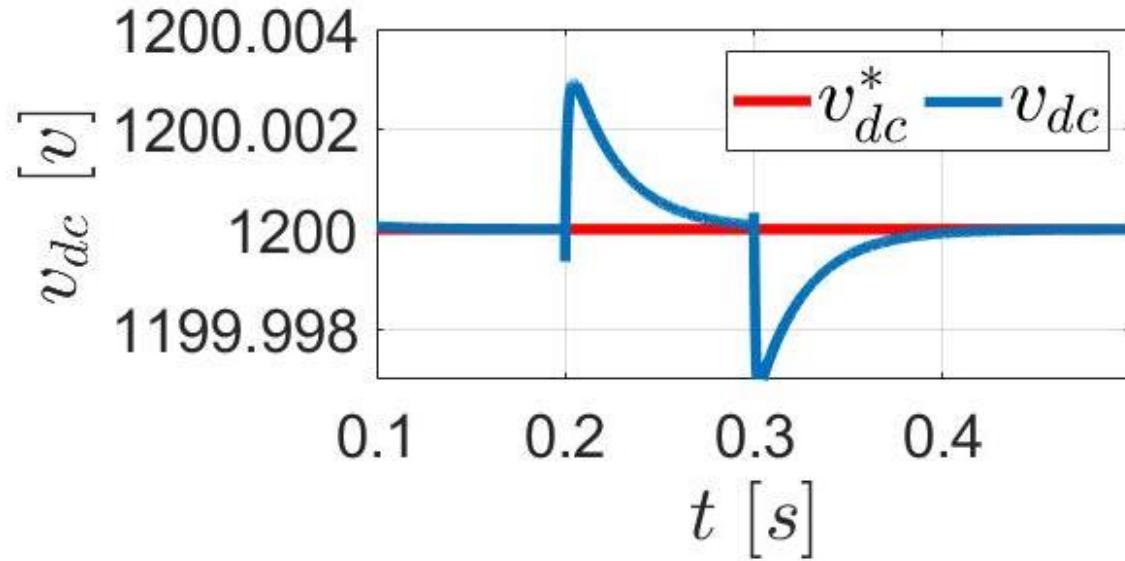
Control de la corriente d-q cuando se produce una caída de tensión en la red (control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de red)



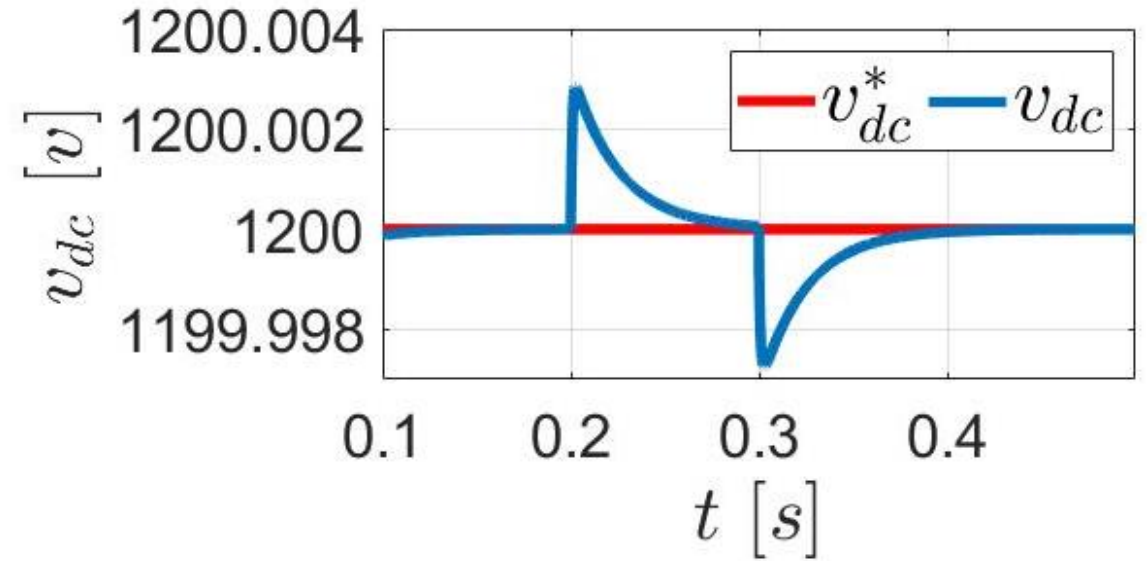
Control de la corriente d-q cuando se produce una caída de tensión en la red (control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de máquina)



Control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de red

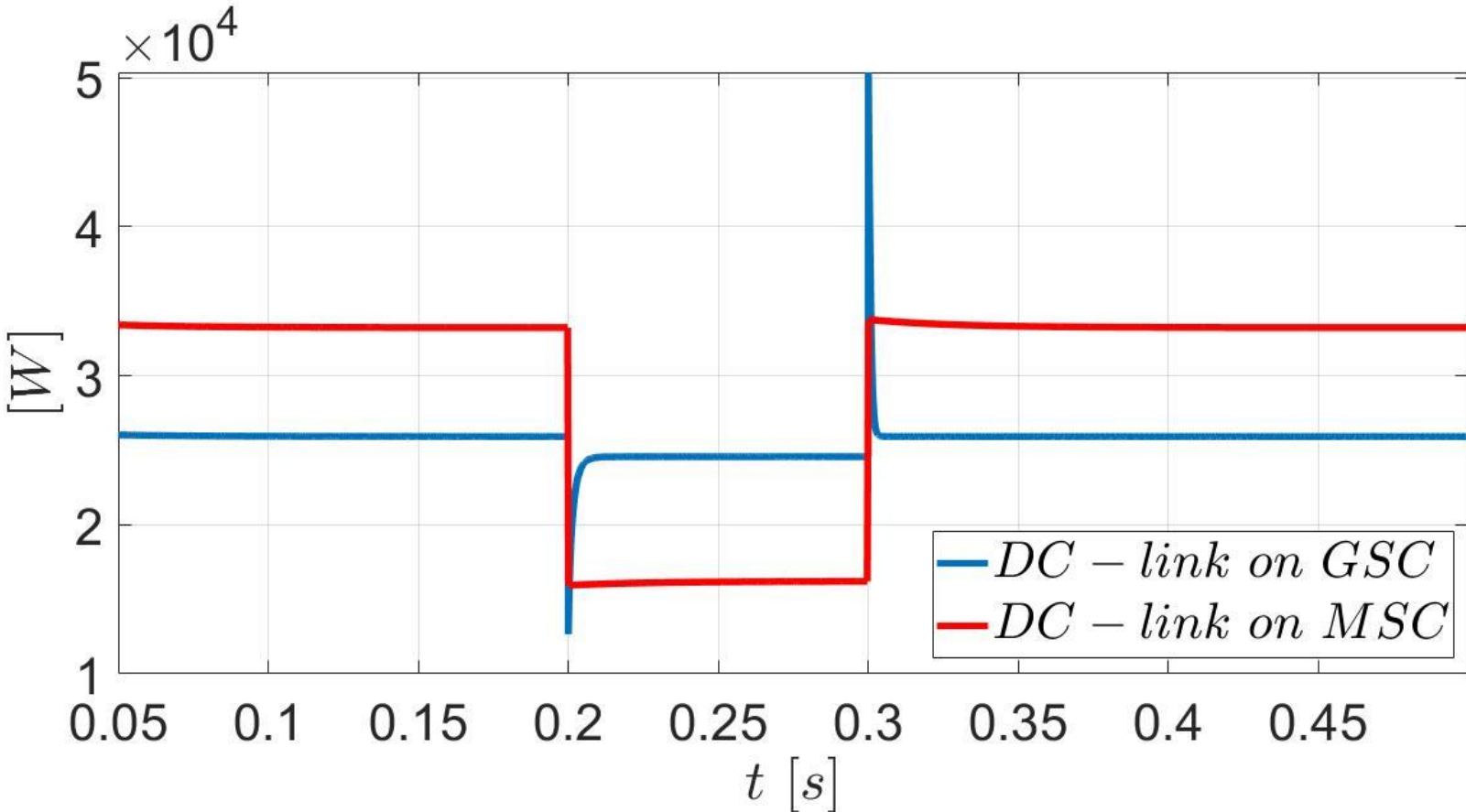


Control de voltaje en el DC-Link implementado en el lado de máquina.





Active power on PCC applying a disturbance in the grid.



- 1 Introducción
- 2 Funcionamiento del Proceso
- 3 Modelamiento Matemático
- 4 Diseño de Controladores
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones**

- En esta investigación, se implementan dos arquitecturas de control de tensión de enlace de CC y se comparan mediante simulaciones en el dominio del tiempo. La primera se diseñó en GSC y la segunda en MSC. La comparación entre las dos arquitecturas muestra que cuando la tensión del DC-link se controla en MSC, se obtiene más potencia en el PCC que cuando se controla en GSC. Esto se debe a que el MPPT envía la corriente de referencia directamente al GSC, por lo que no se tienen en cuenta las pérdidas de potencia que existen en el MSC. Se obtiene menos potencia cuando se controla la tensión del DC-link en el GSC porque se consideran las pérdidas de potencia en el MSC y en el GSC. Por lo tanto, se propone controlar la tensión del DC-link desde el MSC para aprovechar mejor la energía eólica.
- La tensión en el DC-link se mantiene en la consigna en ambas arquitecturas cuando hay variaciones de viento. La tensión del DC-link muestra un sobreimpulso insignificante cuando el control se implementa en GSC, asimismo, cuando el control se implementa en MSC la tensión del DC-link muestra un subimpulso. Por otro lado, cuando hay fallos en la red, las arquitecturas de control consiguen controlarse contra este problema, presentando un sobreimpulso de 0,000225% y 0,000166% cuando la tensión del DC-link se controla desde el GSC y el MSC, respectivamente.
- Finalmente, se comprueba que las dos arquitecturas de control son estables ya que los controladores de corriente y tensión responden correctamente cuando se producen variaciones de viento en la entrada y se producen fallos en la red. En las dos arquitecturas se muestra un buen comportamiento de la tensión del DC-link.