Aplicaciones de Control Lineal Basado en Pasividad en Convertidores Multi-celda

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requerimientos del grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Escuela de Graduados de la Universidad de Concepción

Marcelo A. Pérez L.

marceloperez@udec.cl

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Depto. de Ingeniería Eléctrica

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Accionamientos Media Tensión

- Características
  - Rango de Tensión 2200 Volts – 13.8 KVolts
  - Rango de Potencia 300KW - 75MW
- Topologías
  - NPC (Neutral Point Clamped)
  - LCI (Load Conmutated Inverter)
  - Cicloconversor
  - Fuente de Corriente
  - Multicelda

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

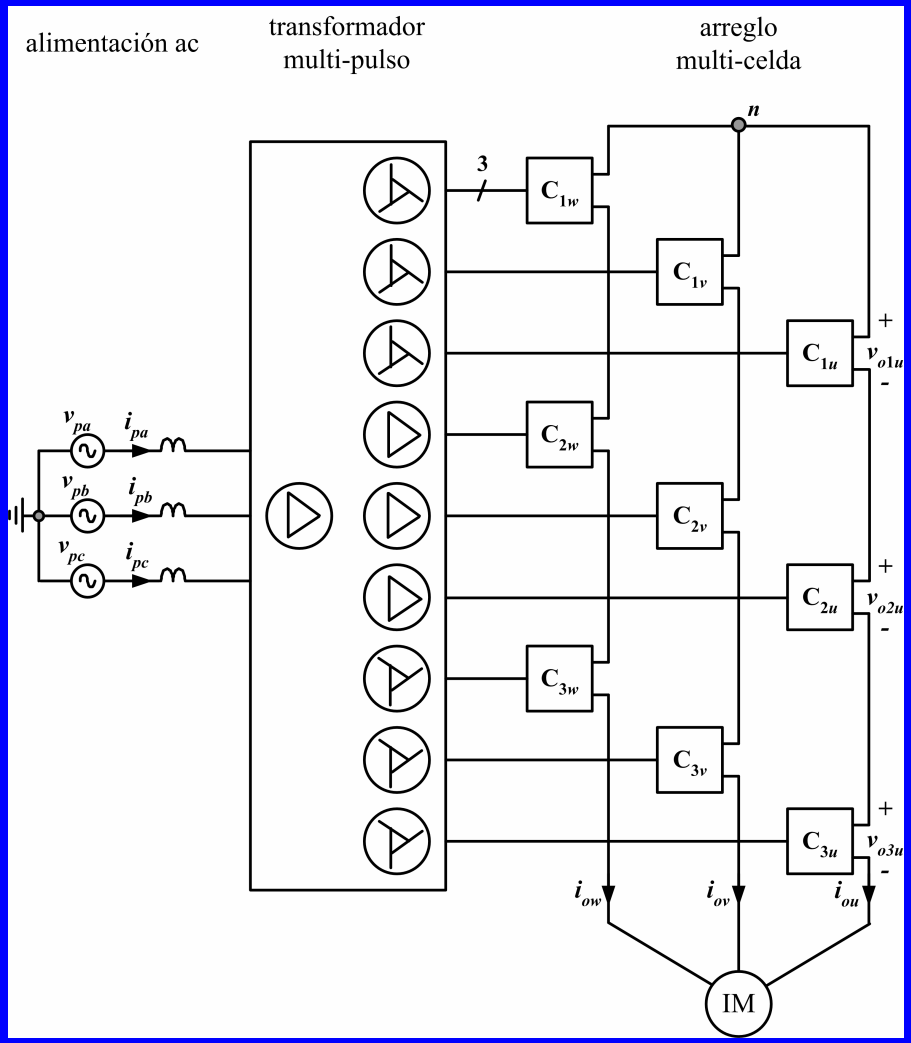
Convertidor Multi-celda

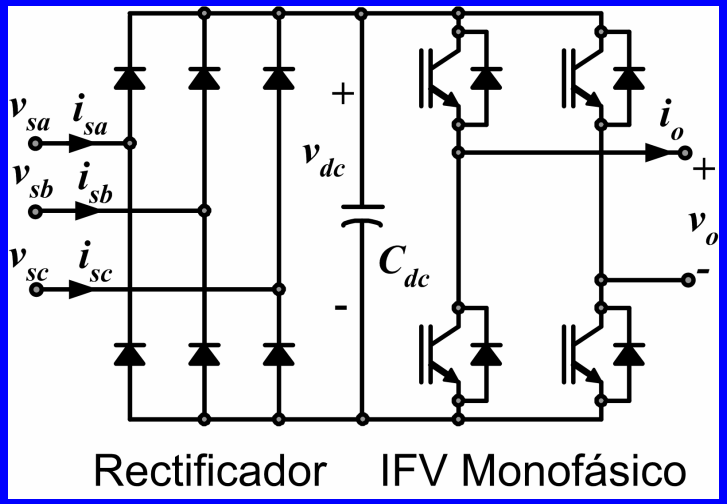
- Características
  - Alta calidad de la energía
    - Corriente de entrada
      - Cumple normas de contenido armónico
      - Elevado factor de potencia
    - Voltaje de carga
      - Disminuye torques pulsantes
      - Baja interferencia electromagnética
  - Modularidad
    - Alta disponibilidad
  - Aislación galvánica

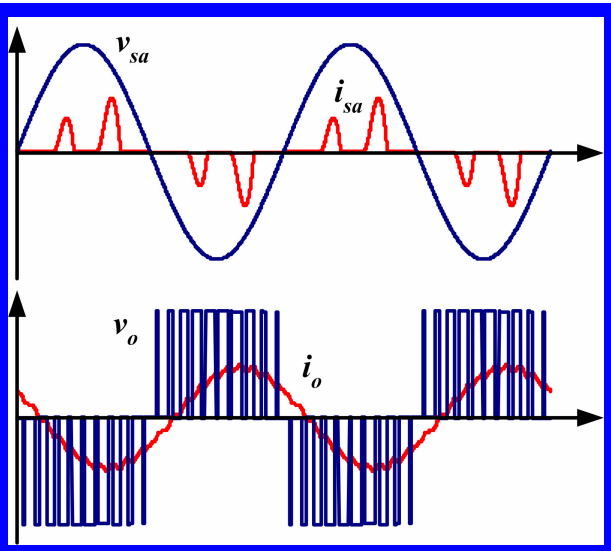
Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Convertidor Multicelda

Topología de Potencia



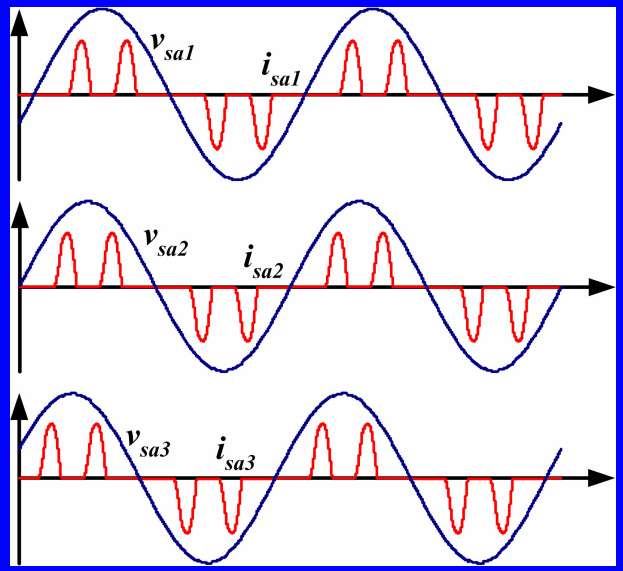


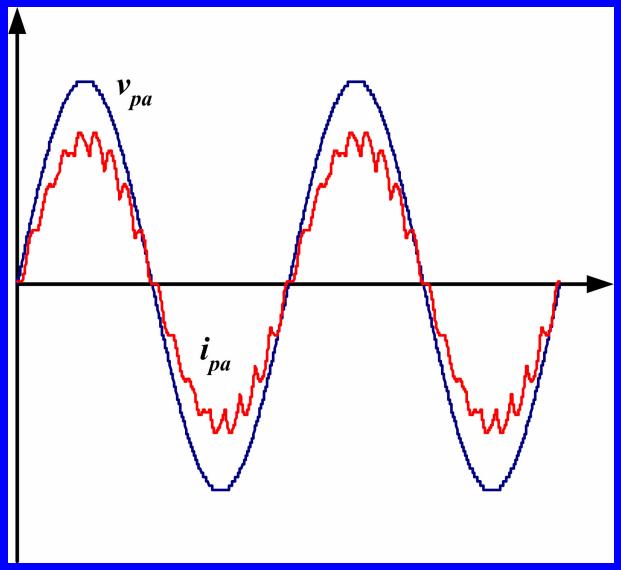


Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Convertidor Multicelda

Corriente de entrada multipulso



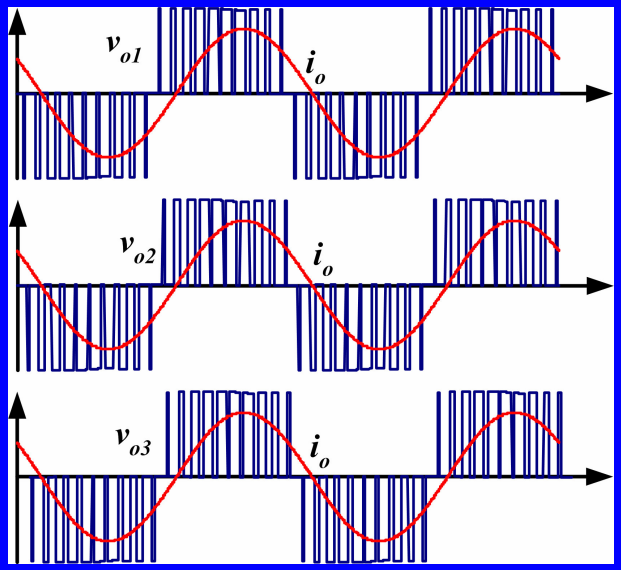


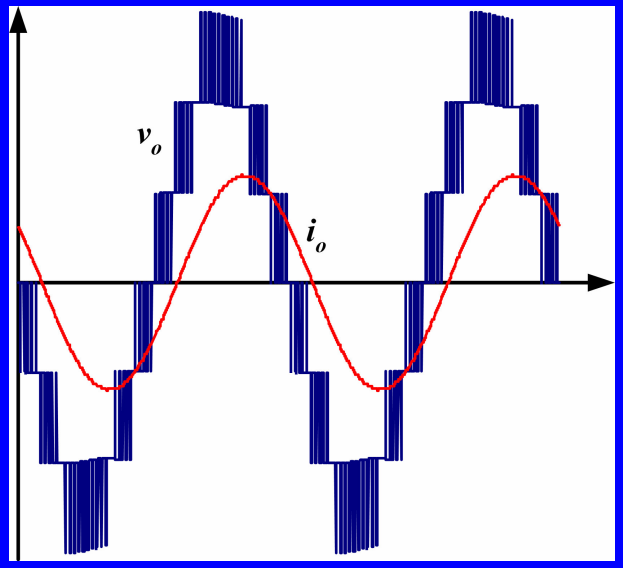
Grupos de secundarios(K)	Desfase relativo (ϕ)	Corriente de entrada	Armónicos no eliminados
2	$\pi/6$	12 pulsos	$12h \pm 1$
3	$\pi/9$	18 pulsos	$18h \pm 1$
4	$\pi/12$	24 pulsos	$24h \pm 1$
5	$\pi/15$	30 pulsos	$30h \pm 1$
6	$\pi/18$	36 pulsos	$36h \pm 1$

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Convertidor Multicelda

Voltaje de salida multinivel





Grupos de celdas	Desfase triangulares	Voltaje de salida
2	π	5 niveles
3	$2\pi/3$	7 niveles
4	$\pi/2$	9 niveles
5	$2\pi/5$	11 niveles
6	$\pi/3$	13 niveles

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Convertidor Multicelda

Diseño Condensador DC

Corriente Inversor

$$i_{inv} = \frac{V_o I_o}{2V_{dc}} \cos(\varphi_o) - \frac{V_o I_o}{2V_{dc}} \cos(2\omega_o t + \varphi_o)$$

Corriente Condensador

$$i_c = \frac{V_o I_o}{2V_{dc}} \cos(2\omega_o t + \varphi_o)$$

Voltaje Condensador

$$\tilde{v}_{dc} = \frac{V_o I_o}{2\omega_o V_{dc} C_{dc}}$$

Ecuación Diseño Condensador

$$C_{dc} = \frac{V_o I_o}{2\omega_o V_{dc}^2 \tilde{v}_{dc}(\%)}$$

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

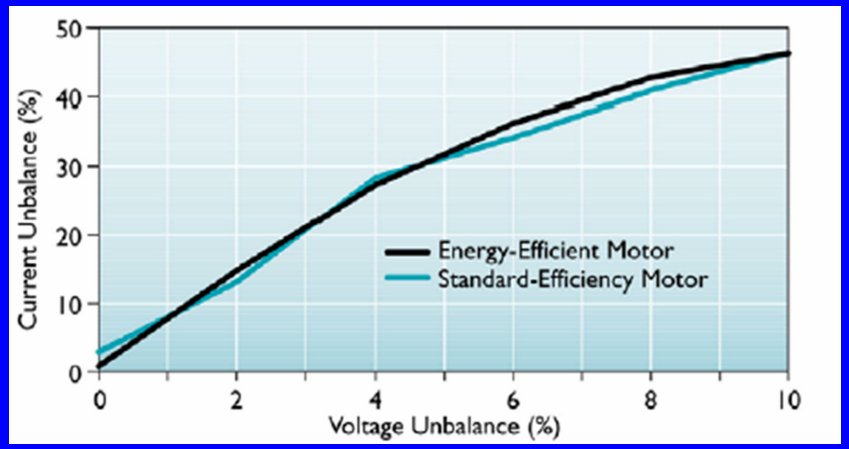
Convertidor Multicelda

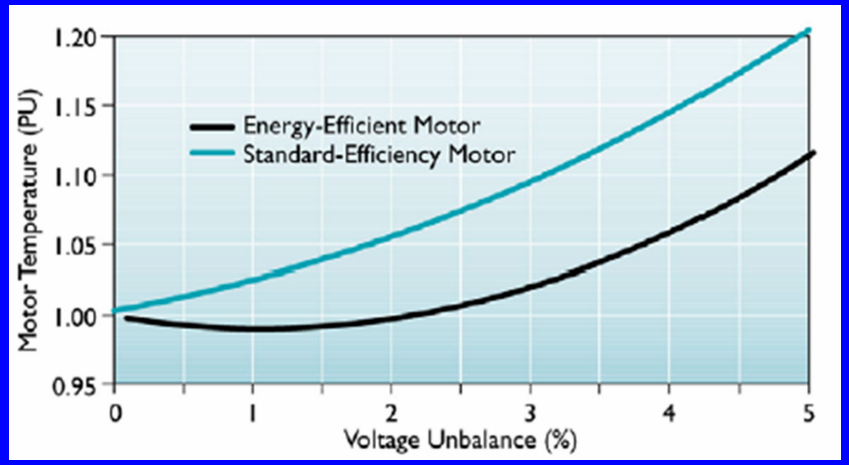
Operación ante desbalance

Estudios de desbalance
ANSI C84.1-1995
98%<3%
66%<1%
EPRI Avg Unbalance=2%

Normas debalance
ANSI C84.1-1995 3%
IEC 61000-4-27 2% (sec.neg)

Efecto en motores
ANSI C84.1-1995
Std MG-1-14.35
Indican derating para desbalance sobre el 1%





Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Convertidor Multicelda

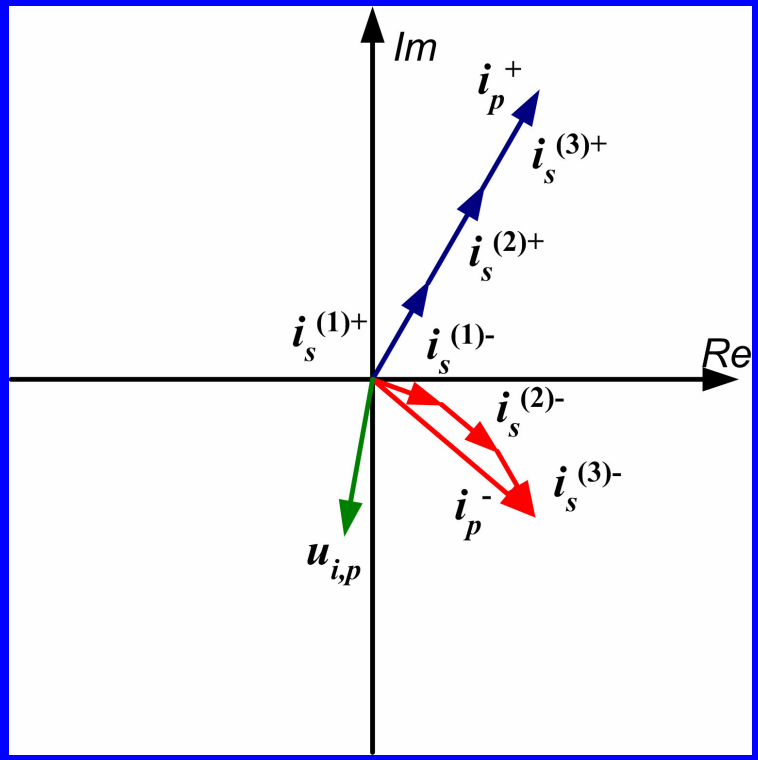
Desbalance en el Trasformador

Desbalance de Voltajes

$$\vec{u}_{v,s} = \vec{u}_{v,p} \angle -2\phi_s$$

Desbalance de Corrientes

$$\vec{u}_{i,p} = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} \vec{u}_{i,s}^{(k)}}{K} \angle 2\phi_s$$



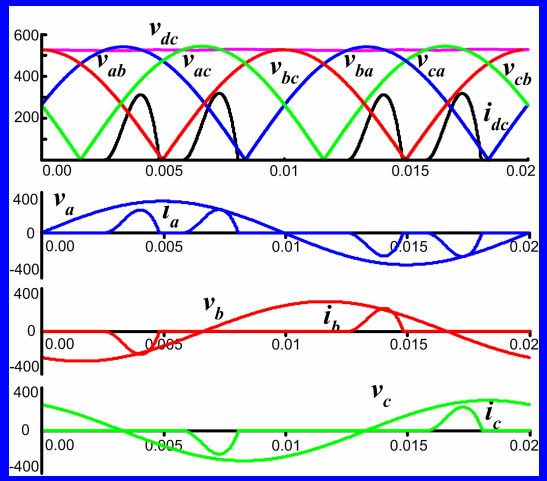
(1) Pérez M., Baier C., Espinoza J. R. and Rodríguez J. R. , “Analysis of a Multi-Cell Converter under Unbalanced AC Source”, Power Electronics Specialist Conference, 2005. PESC '05. 2005 IEEE 36th Annual, 12-16 June 2005 Page(s):1011 - 1017

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

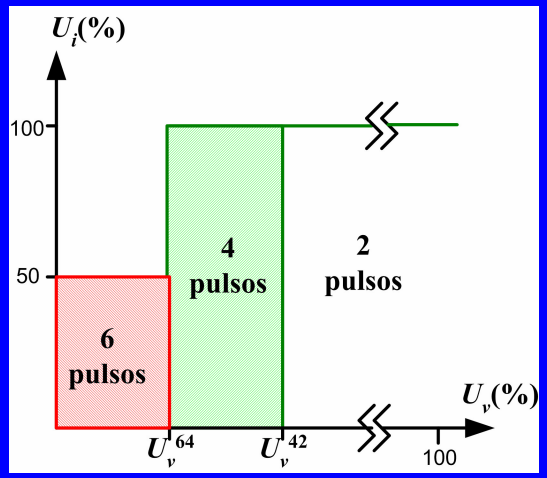
Convertidor Multicelda

Desbalance en el Rectificador

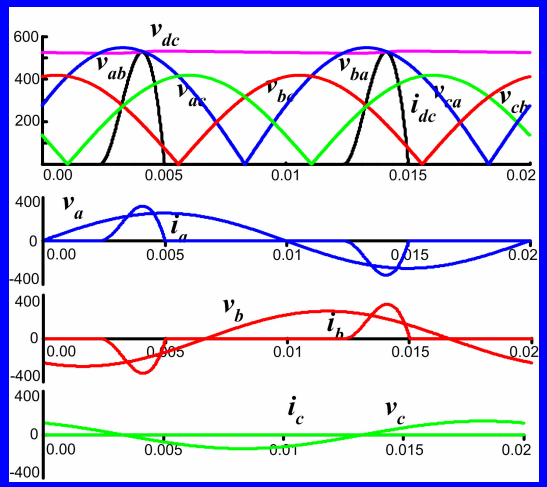
Modo 4 pulsos



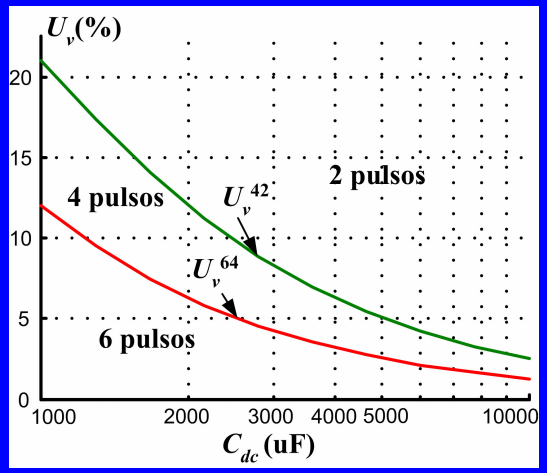
Desbalance De Corriente



Modo 2 pulsos



Desbalance Con Respecto a la Capacidad del Enlace DC



Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Convertidor Multicelda

Efecto desbalance

Enlace DC

$$V_{dc1u} = V_{dc1v} = V_{dc1w} = V_{dc}(U_v, \phi_v + 40°)$$
$$V_{dc2u} = V_{dc2v} = V_{dc2v} = V_{dc}(U_v, \phi_v)$$
$$V_{dc3u} = V_{dc3v} = V_{dc3w} = V_{dc}(U_v, \phi_v - 40°)$$

Voltaje de Salida

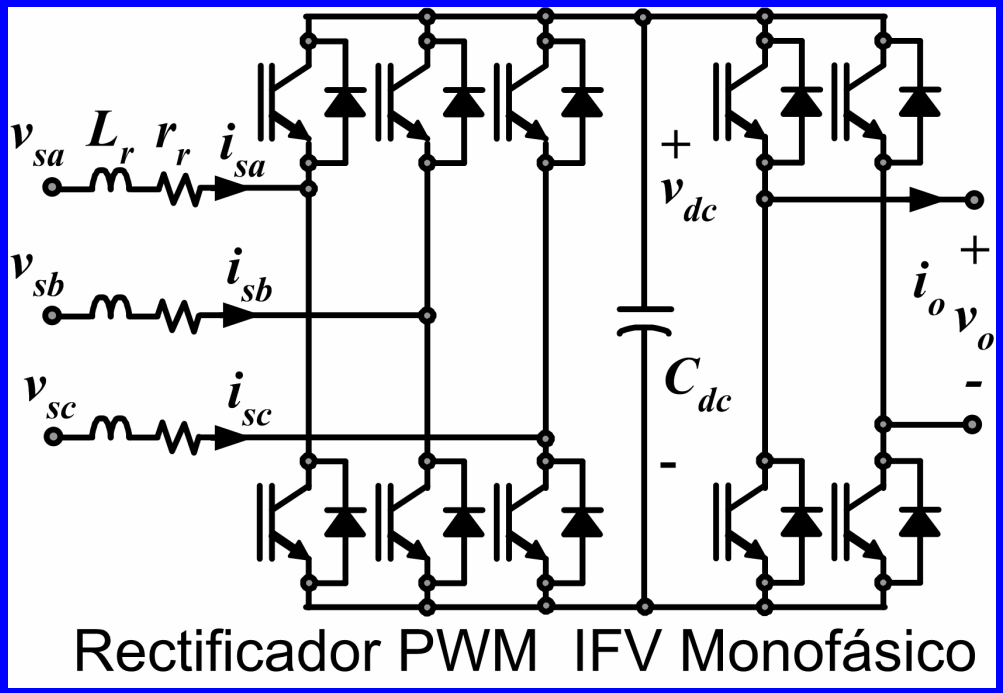
$$V_{ou} = m_{ou}(V_{dc1u} + V_{dc2u} + V_{dc3u})$$
$$V_{ov} = m_{ov}(V_{dc1v} + V_{dc2v} + V_{dc3v})$$
$$V_{ow} = m_{ow}(V_{dc1w} + V_{dc2w} + V_{dc3w})$$

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

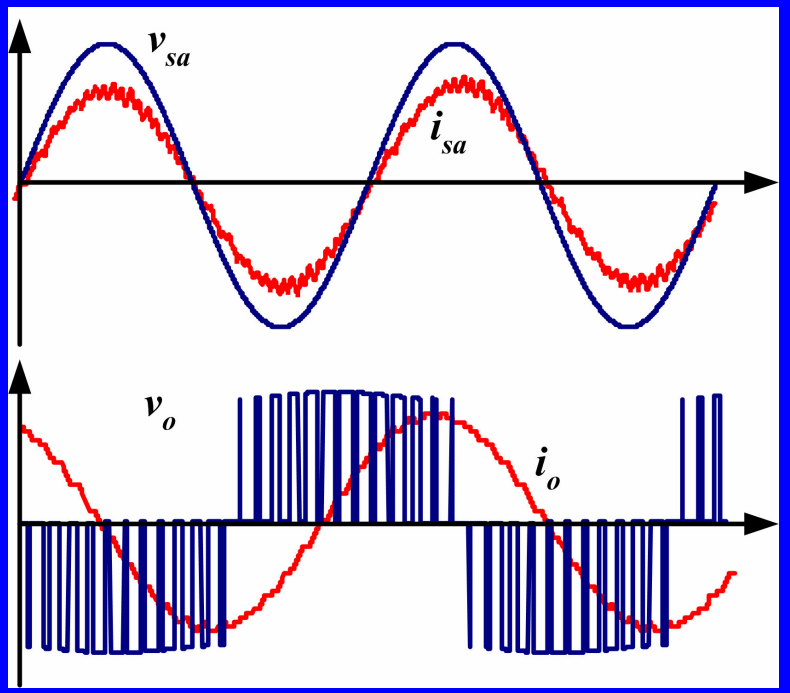
Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Celda regenerativa

Topología de Potencia



Formas de Onda Características

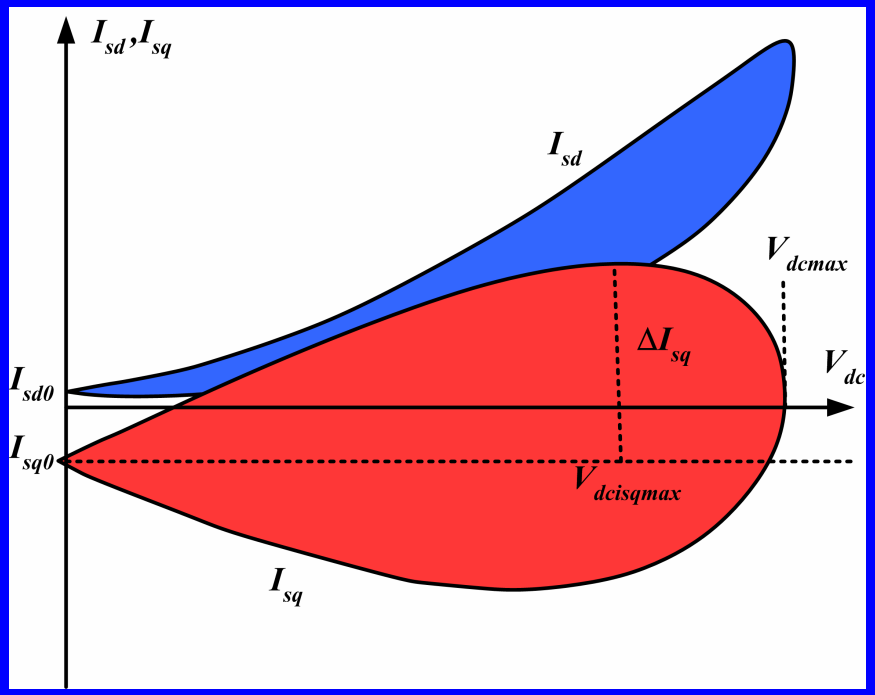


Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

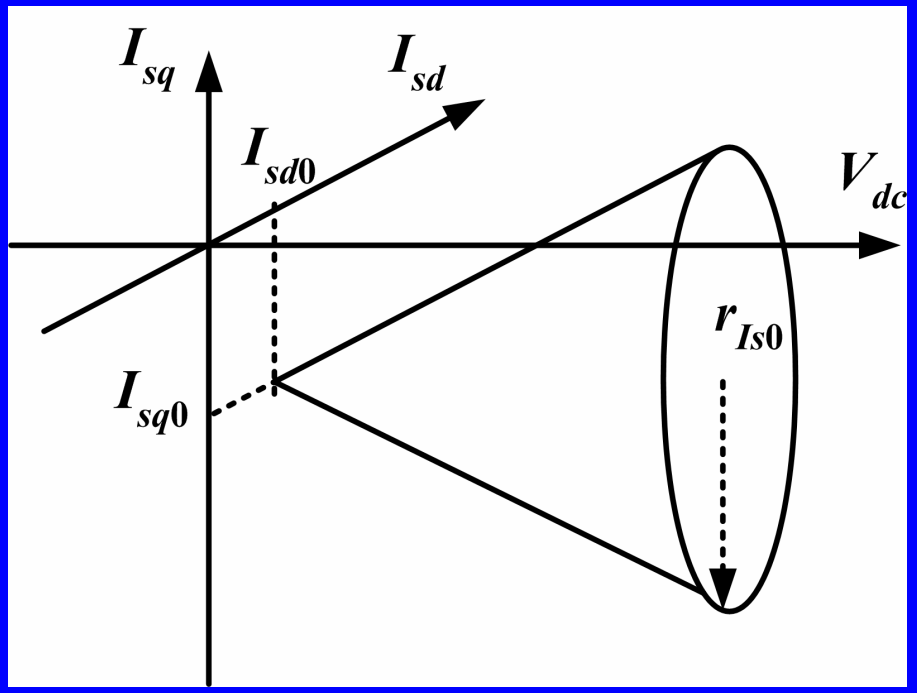
Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Control de la potencia activa y reactiva

Carga Pasiva



Carga Activa



Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Minimización del enlace DC

Potencia Instantánea de Entrada

$$p_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}$$

$$q_s = v_{sd} i_{sq} - v_{sq} i_{sd}$$

Potencia Instantánea de Salida

$$p_o = v_o i_o$$

$$q_o = 0$$

Referencia dq

$$i_{sdref} = \frac{v_o i_o}{v_{sd}}$$

$$i_{sqref} = 0$$

Potencia de Salida

$$v_o i_o = \frac{V_o I_o}{2}\cos(\varphi_o) - \frac{V_o I_o}{2}\cos(2\omega_o t + \varphi_o)$$

(2) Pérez M. A., Espinoza J. R., Rodríguez J. R., Lezana P. “Regenerative Medium Voltaje AC Drive Based on Multicell Arrangenment with Reduced Energy Storage Requirements” IEEE Transaction on Industrial Electronics, No 1, Vol. 52, pp. Febrero 2005

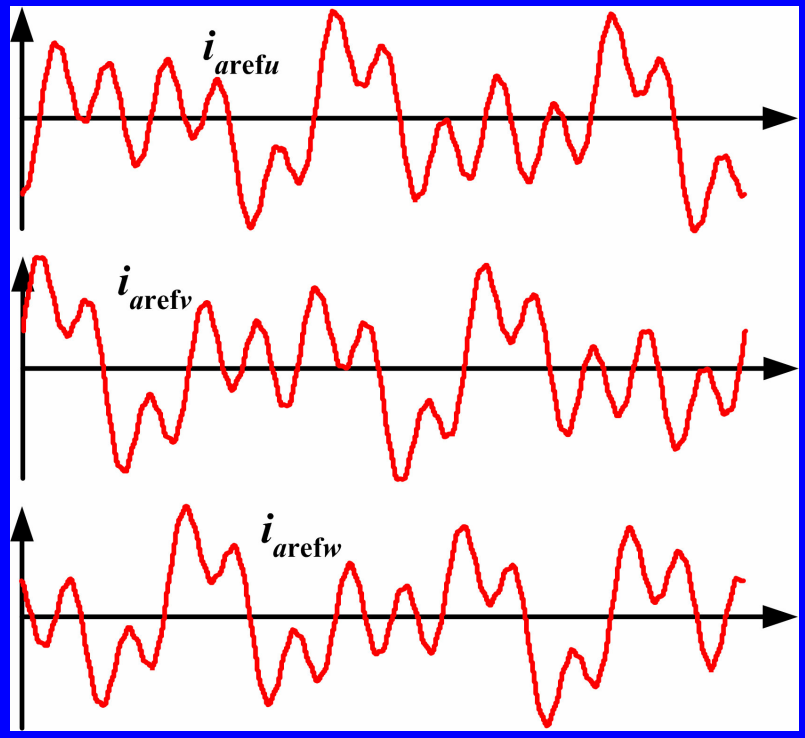
Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Minimización del enlace DC

Referencia Corriente Trifásica

$$i_{aref} = \frac{V_o I_o}{3V_s}\cos(\varphi_o)\sin(\omega_s t) - \frac{V_o I_o}{6V_s}\sin((\omega_s + 2\omega_o)t + \varphi_o) - \frac{V_o I_o}{6V_s}\sin((\omega_s - 2\omega_o)t - \varphi_o)$$



Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

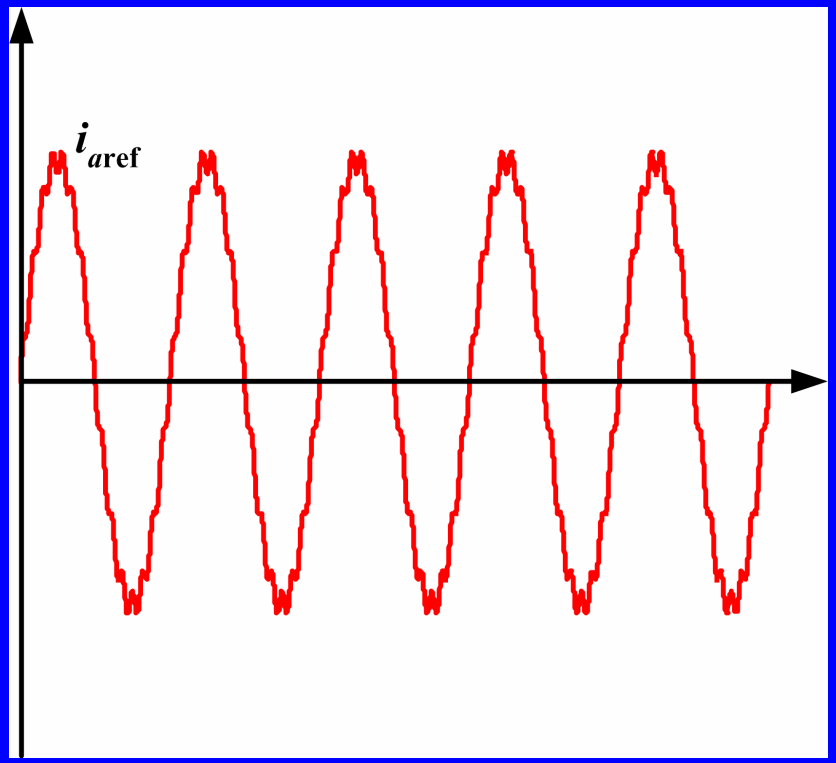
Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Minimización del enlace DC

Referencia Corriente Total

$$i_{aref} = i_{arefu} + i_{arefv} + i_{arefw}$$

$$= \frac{V_o I_o}{V_s} \cos(\varphi_o) \sin(\omega_s t)$$



(3) M. Pérez, J. Espinoza, J. Rodríguez y P. Lezana, “Regenerative medium-voltage AC drive base on a multi-cell arrangement with minimum energy storage requirements”, ISIE 2002, L’Aquila, Italy, July 8-11, 2002.

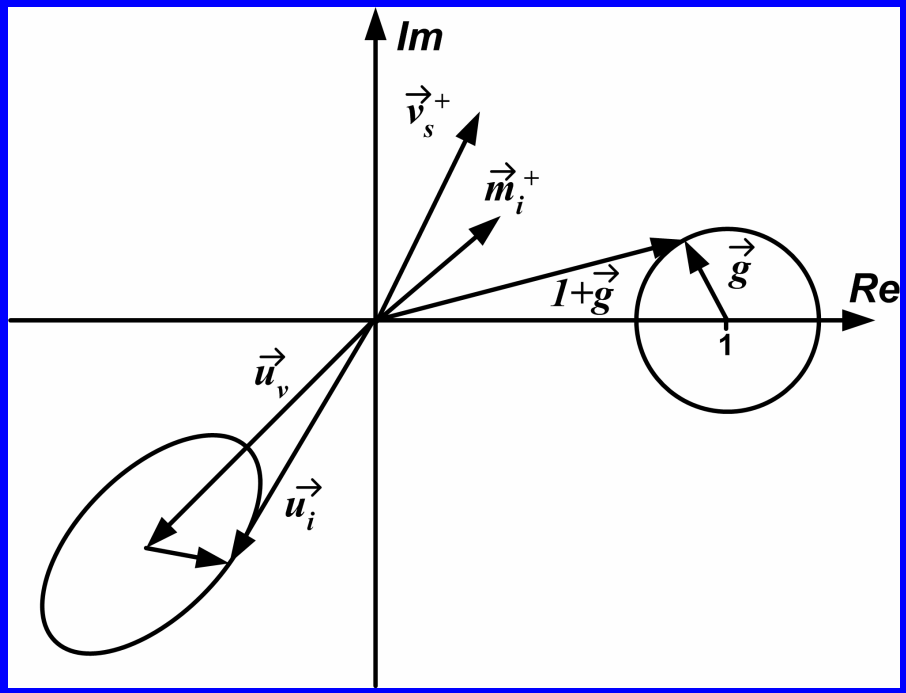
Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Desbalance en los voltajes de alimentación

$$\vec{u}_i = \frac{1}{1+\vec{g}}\vec{u}_v + \frac{\vec{g}}{1+\vec{g}}\vec{u}_m$$

$$\vec{g} = -\frac{G_{ac}V_{dc}\vec{m}_i^{\,+}}{\vec{v}_s^{\,+}}$$



Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Comparación de Confiabilidad y Eficiencia

Tabla 3.1: Pérdidas en accionamiento multicelda no regenerativo

Potencia Salida	2980kW
Potencia perdida Inversor	
Conmutación	16.1kW
Conducción	26.9kW
Potencia perdida Rectificador a Diodos	
Conducción	14.7kW
Potencia perdida en la Celda	57.7kW
Potencia perdida en el Transformador	61.99kW
Potencia Entrada	3099.7kW
Eficiencia Accionamiento	$\eta_{ACC} = 96{,}1$

Tabla 3.2: Pérdidas en accionamiento multicelda regenerativo

Potencia Salida	2980kW
Potencia perdida Inversor	
Conmutación	16.1kW
Conducción	26.9kW
Potencia perdida Rectificador Controlado	
Conmutación	16.1kW
Conducción	31.5kW
Potencia perdida en la Celda	90.6kW
Potencia perdida en el Filtro de entrada	20.88kW
Potencia perdida en el Transformador	61.99kW
Potencia Entrada	3153.5kW
Eficiencia Accionamiento	$\eta_{ACC} = 94{,}4$

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Optimización de las características del Convertidor multi-celda

Comparación de Confiabilidad y Eficiencia

Tabla 3.3: Tasa de fallas de los distintos elementos del accionamiento

Elemento	Tasa de falla por año
Transformador	$\lambda_T = 0{,}0153$
Rectificador trifásico diodos	$\lambda_{RD} = 0{,}038$
Rectificador trifásico controlado	$\lambda_{RC} = 1{,}881$
Enlace DC	$\lambda_C = 0{,}0067$
Inversor monofásico	$\lambda_I = 1{,}254$
Filtro inductivo de entrada	$\lambda_L = 0{,}0067$

IEEE Std 493-1997,

Accionamiento con puente de diodos

$$\lambda_{ACC} = \lambda_T + \lambda_{RD} + \lambda_C + \lambda_I = 1{,}314$$

Accionamiento con rectificador controlado

$$\lambda_{ACC} = \lambda_T + \lambda_{RC} + \lambda_C + \lambda_I + \lambda_L = 3{,}1417$$

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Control lineal basado en pasividad

Sistemas disipativos y sistemas pasivos

Sistemas Disipativos

$$\dot{\mathcal{H}}(\mathbf{x}) \leq w(\mathbf{u}, \mathbf{y})$$

Sistemas Pasivos

$$w(\mathbf{u}, \mathbf{y}) = \mathbf{y}^T \mathbf{u}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u}$$
$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u} \leq \mathbf{h}(\mathbf{x})^T \mathbf{u}$$

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Depto. de Ingeniería Eléctrica

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Control lineal basado en pasividad

Estabilidad de Sistemas Pasivos

$$\left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{h}(\mathbf{x})^T$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq 0$$

- **Detectabilidad**

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_*) = 0$$

- **Matriz de desacoplamiento definida positiva**

$$\left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{G}(\mathbf{x}) > 0$$

- **Dinámica cero estable**

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Control lineal basado en pasividad

Pasivicación mediante acción constante

$$\mathbf{u} = \mathbf{v} + \boldsymbol{\theta}$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \left[\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\boldsymbol{\theta}\right] \leq 0$$

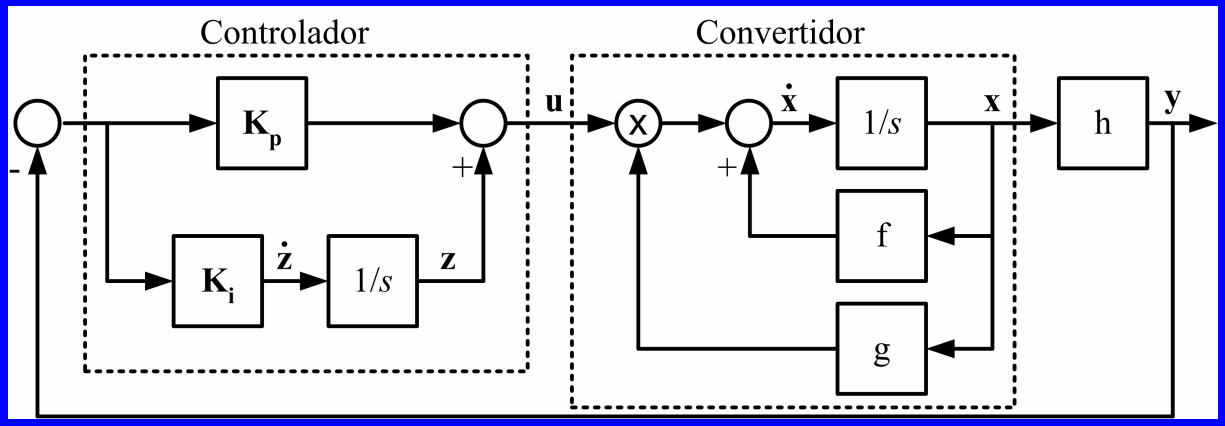
Controlador PI

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_p\mathbf{y} + \mathbf{z}$$

$$\dot{\mathbf{z}} = -\mathbf{K}_i\mathbf{y}$$

Función de energía

$$\dot{\mathcal{W}} \leq -\mathbf{h}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}_p\mathbf{h}^T(\mathbf{x}) \leq 0$$



Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

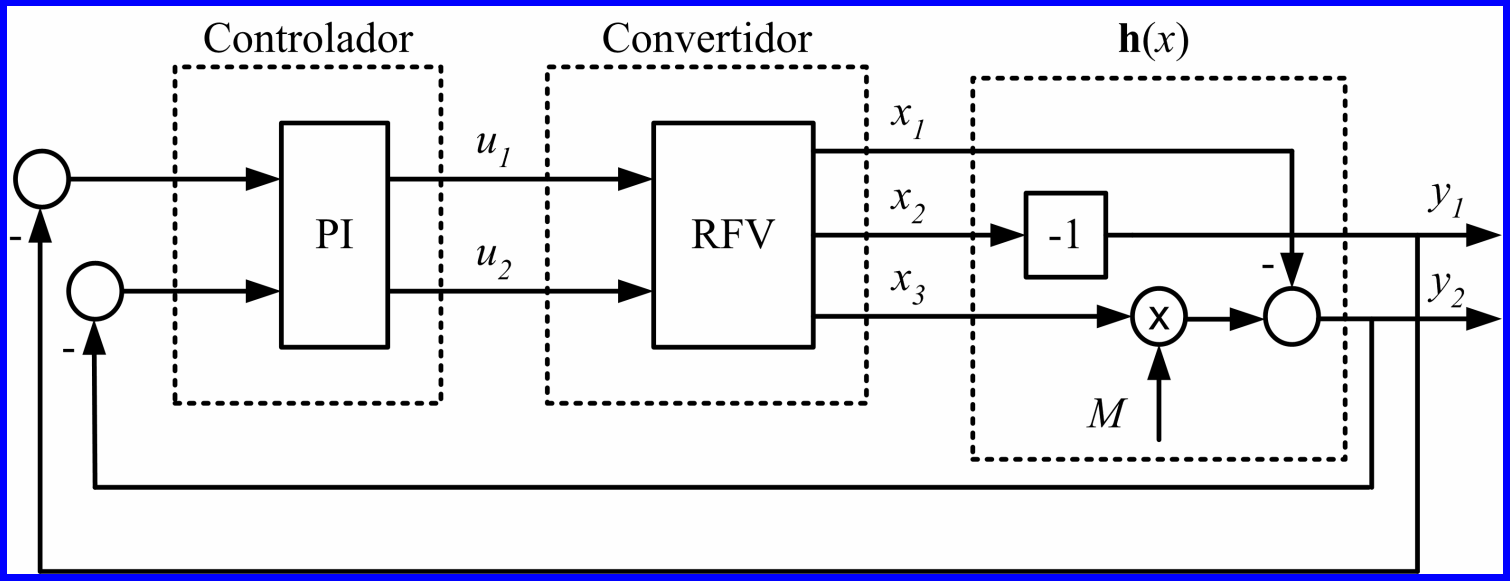
Control lineal basado en pasividad

Controlador Propuesto

$$\left(\frac{\partial \mathcal{W}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{h}(\mathbf{x})^T$$

$$\mathcal{W} = -\frac{ML_r}{G_{ac}} x_1 + \frac{C_{dc}}{G_{ac}} x_3$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} Mx_3 - x_1 \\ -x_2 \end{bmatrix}$$



Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Control lineal basado en pasividad

Estabilidad de sistemas pasivos en lazo cerrado

Función de energía Modificada

$$\mathcal{V} = \alpha\mathcal{H} + \mathcal{W}$$

Condición de Estabilidad

$$\left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \left[\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\boldsymbol{\theta}\right] \leq 0$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{R}\left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}}\right) - \left(\frac{\partial \mathcal{W}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \left(\eta_0(\mathbf{J}_0 - \mathbf{R}) + \sum_{i=1}^{m} \mathbf{J}_i \eta_i\right)\left(\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}}\right) - \eta_0 \left(\frac{\partial \mathcal{W}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{g} \geq 0$$

(4) Pérez M., Ortega R., Espinoza J., “Passivity-based PI Control of Switched Power Converters”, IEEE Transaction on Coltrol System Technology, No 6, Vol 12, pp 881-890, Noviembre 2004

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Control lineal basado en pasividad

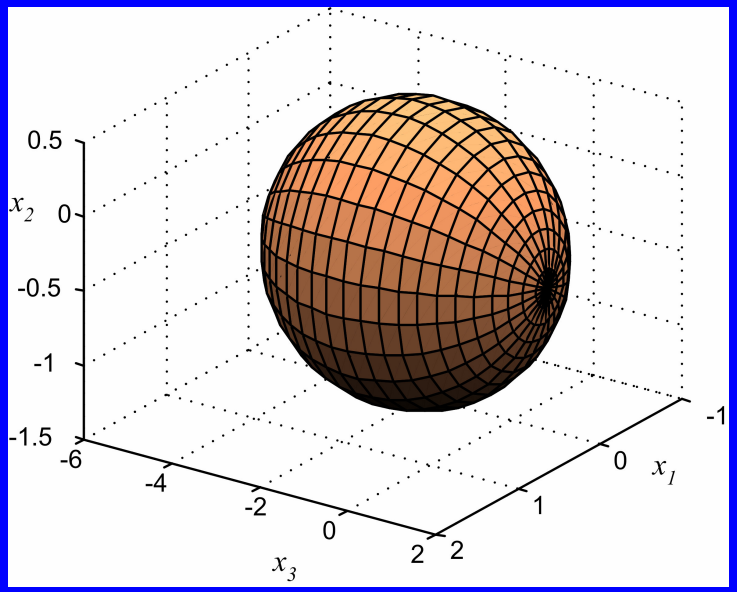
Estabilidad de sistemas pasivos en lazo cerrado

$$\mathbf{x}^T\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}^T(\boldsymbol{\eta})\mathbf{x} + c(\boldsymbol{\eta}) \geq 0$$

$$r_{\mathbf{x}}(\boldsymbol{\eta}) = \frac{1}{2r_r G_{ac}}\sqrt{\boldsymbol{\eta}^T\mathbf{A}_e\boldsymbol{\eta} + \mathbf{b}_e^T\boldsymbol{\eta}}$$

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{T}\boldsymbol{\lambda}$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T\mathbf{A}_o\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{b}_o^T\boldsymbol{\lambda} \geq 0$$

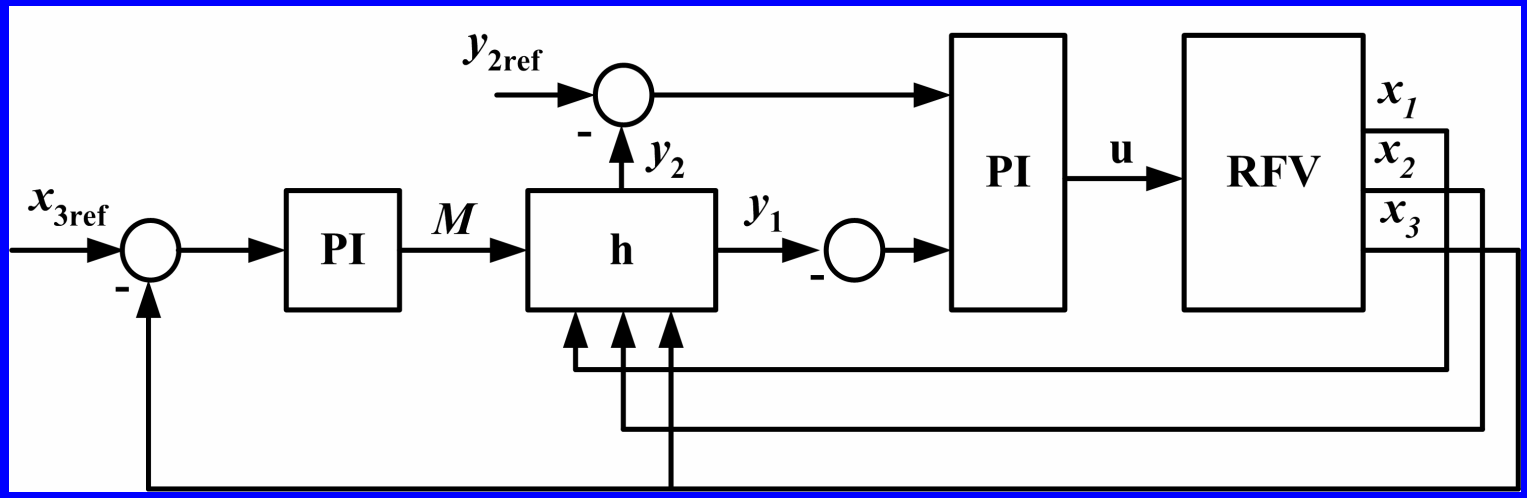


$$r_{\boldsymbol{\lambda}} = 2G_{ac}\sqrt{\frac{R_{dc}r_r(MV_{sd} + I_o)^2}{1 + R_{dc}r_r M^2}}$$

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Control lineal basado en pasividad

Lazo de control externo



(5) Pérez M.A., Ortega R., Espinoza J.R. “Passivity-based Control of Three-Phase Switched Power Converters”, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004, IECON 04. Busan, Corea.

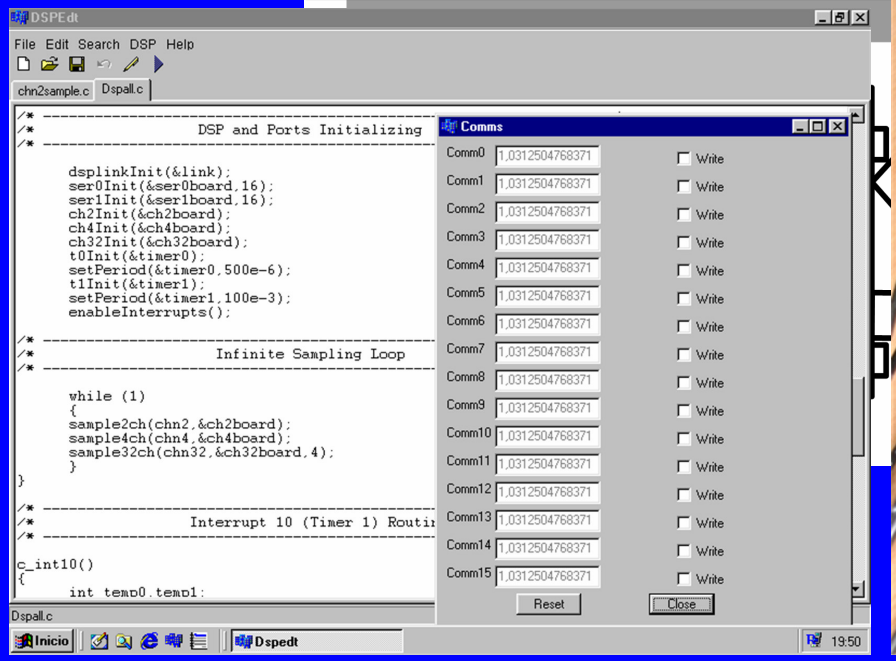
Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Implementación

Sensores

Interruptores de Potencia

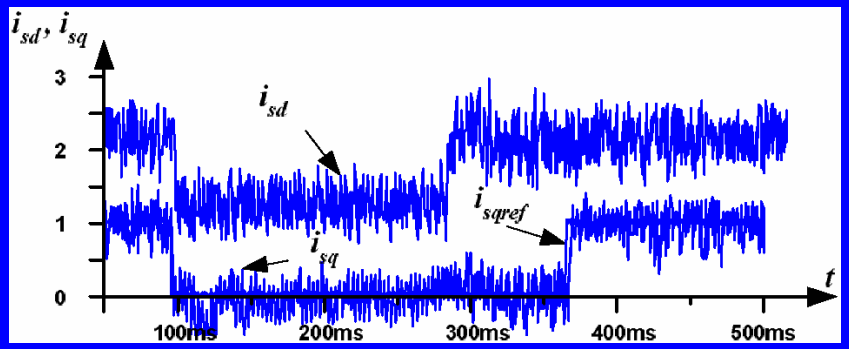
Filtros

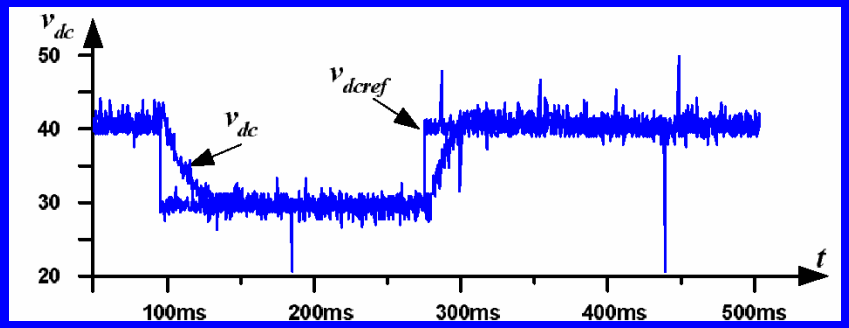


Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

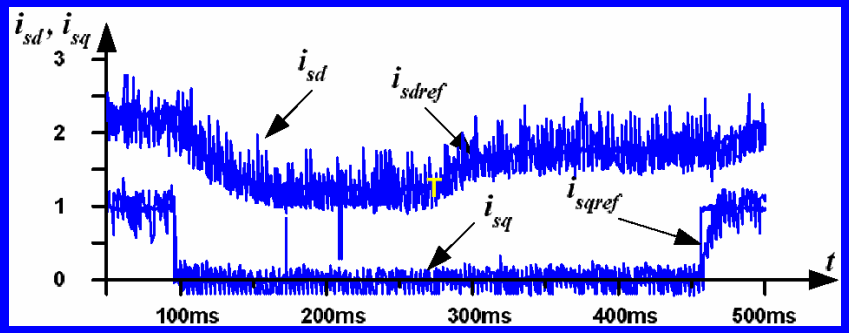
Resultados

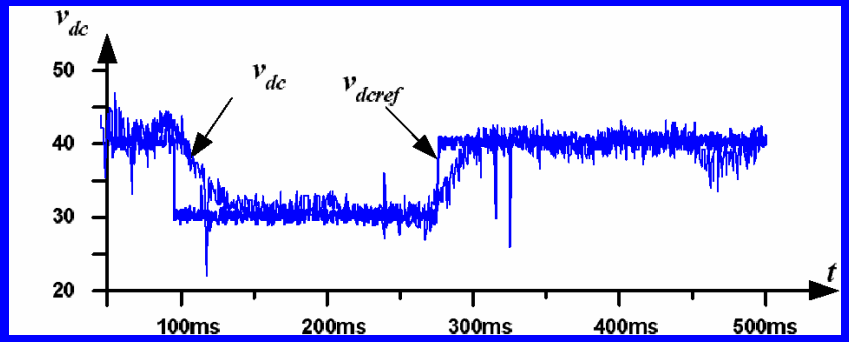
Comparación PBC – Linealizador de estados





Linealizador de estados



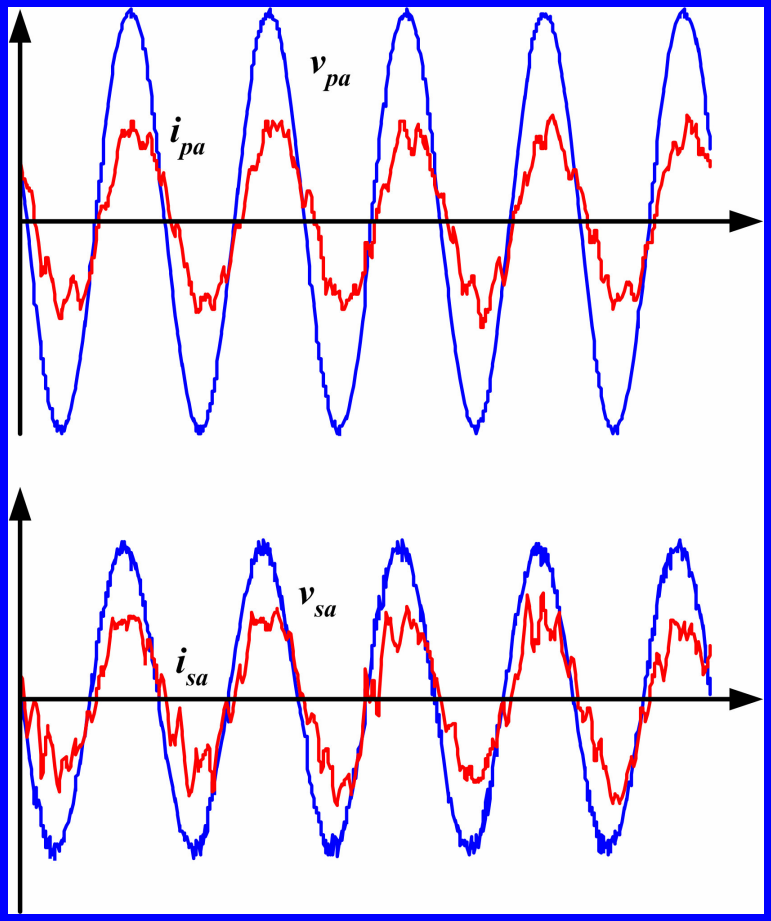


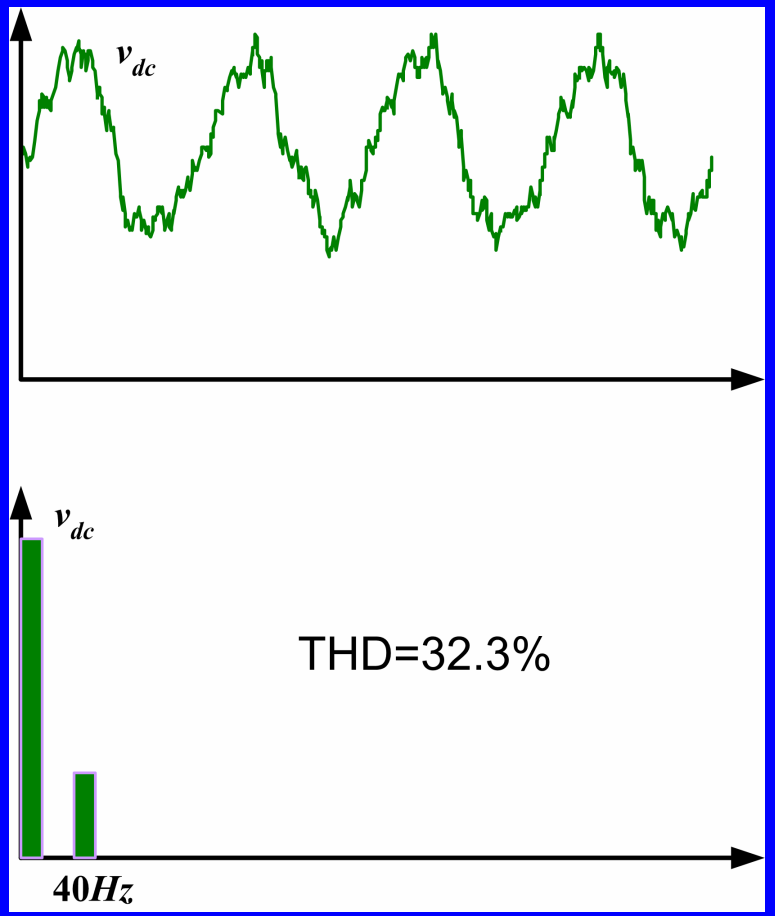
Controlador basado en pasividad

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Resultados

Minimización de potencia en la enlace DC



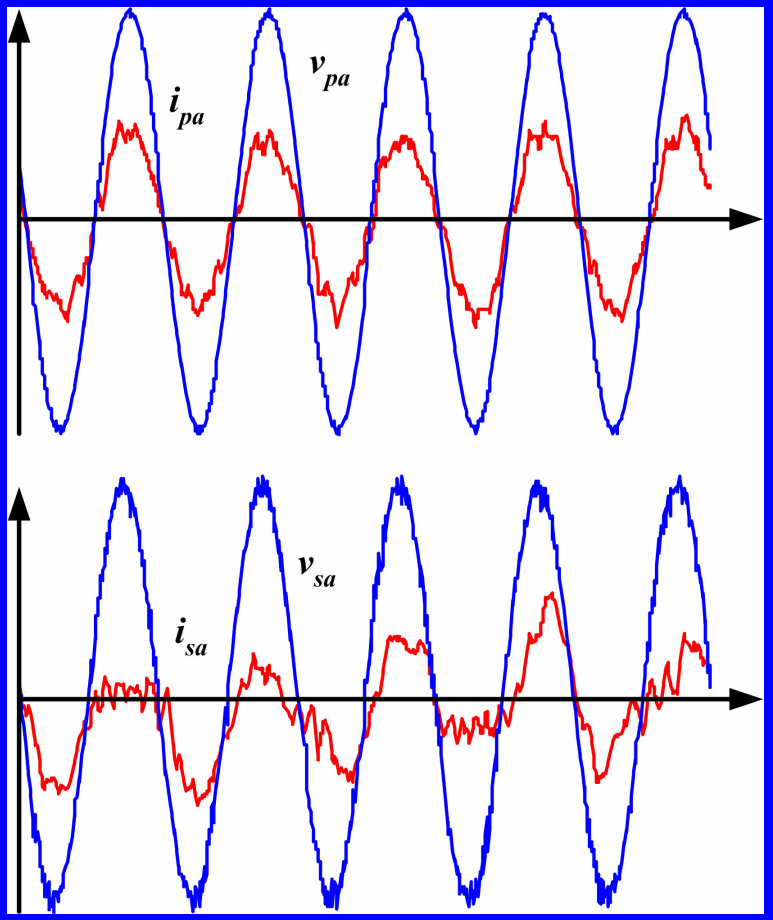


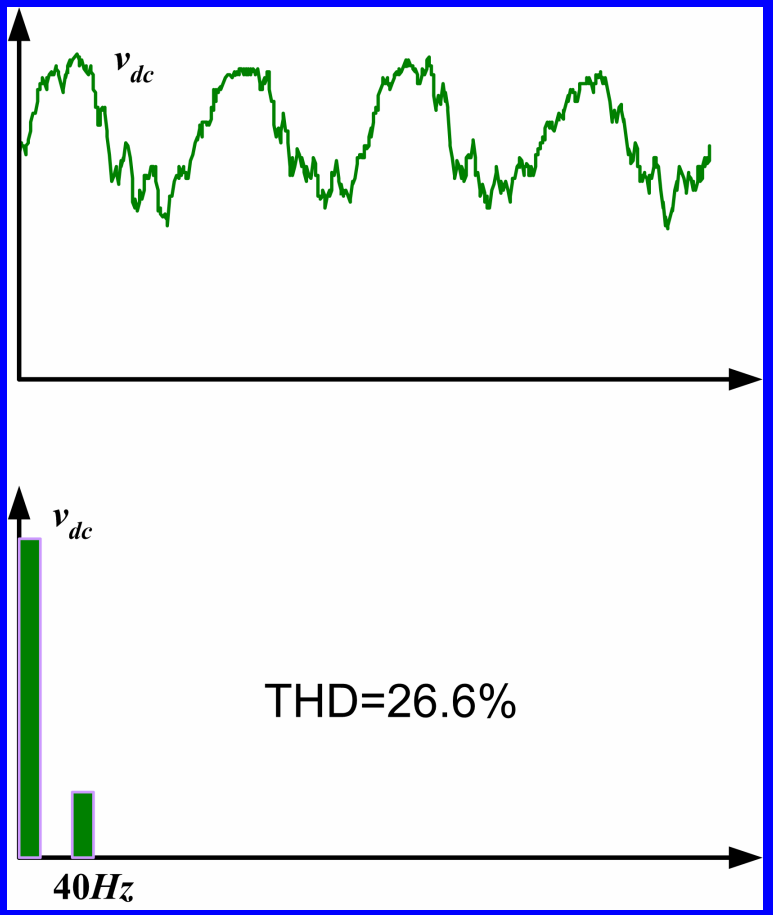
Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Depto. de Ingeniería Eléctrica

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Resultados

Minimización de potencia en el enlace DC



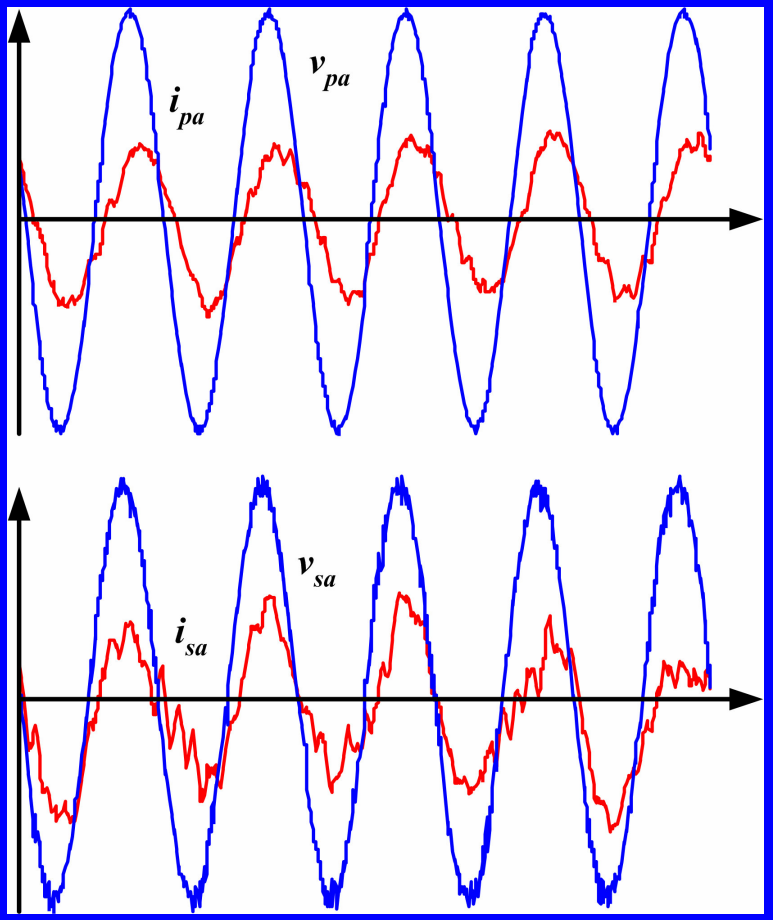


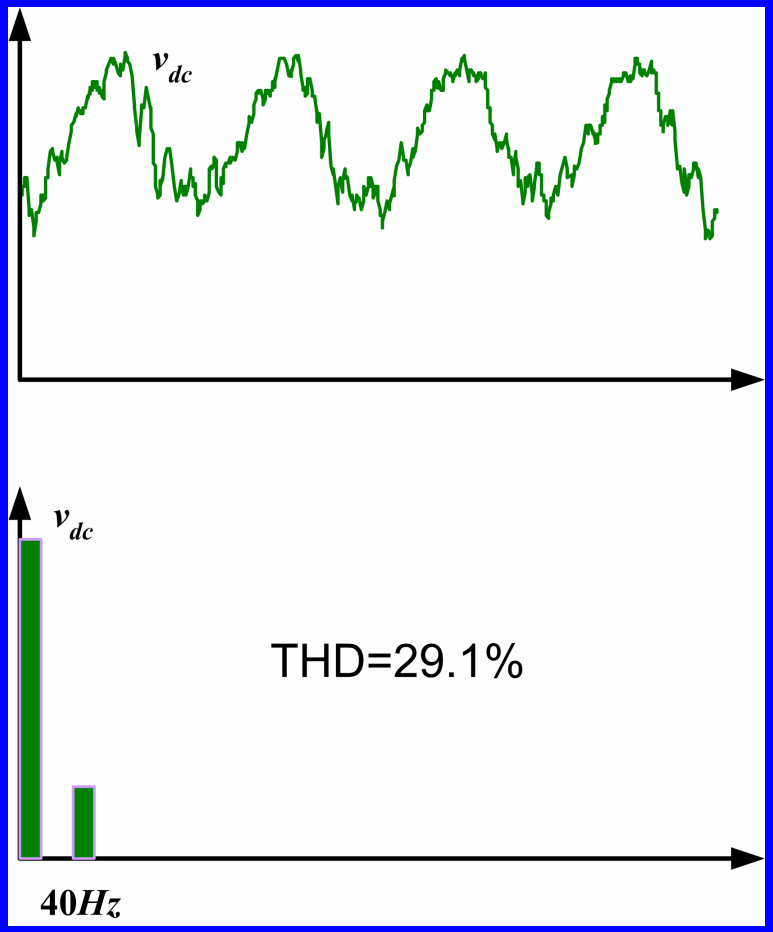
Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Depto. de Ingeniería Eléctrica

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Resultados

Minimización de potencia en el enlace DC

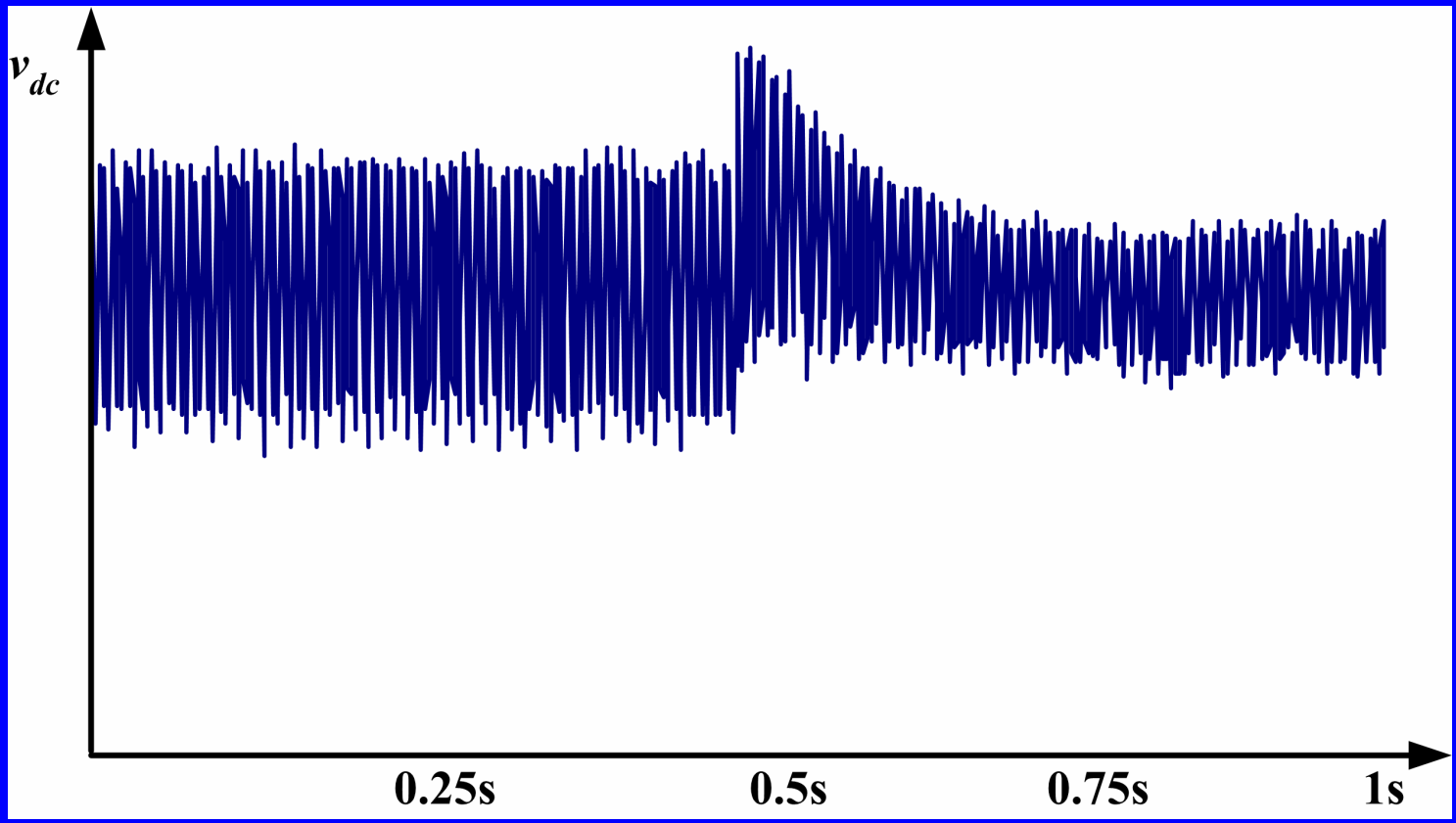




Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Resultados

Minimización de potencia en el enlace DC

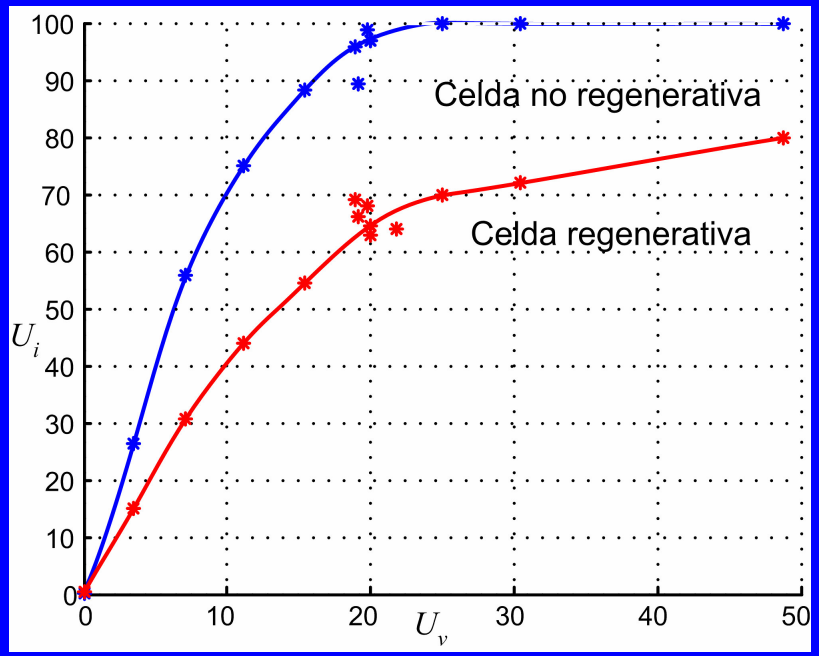


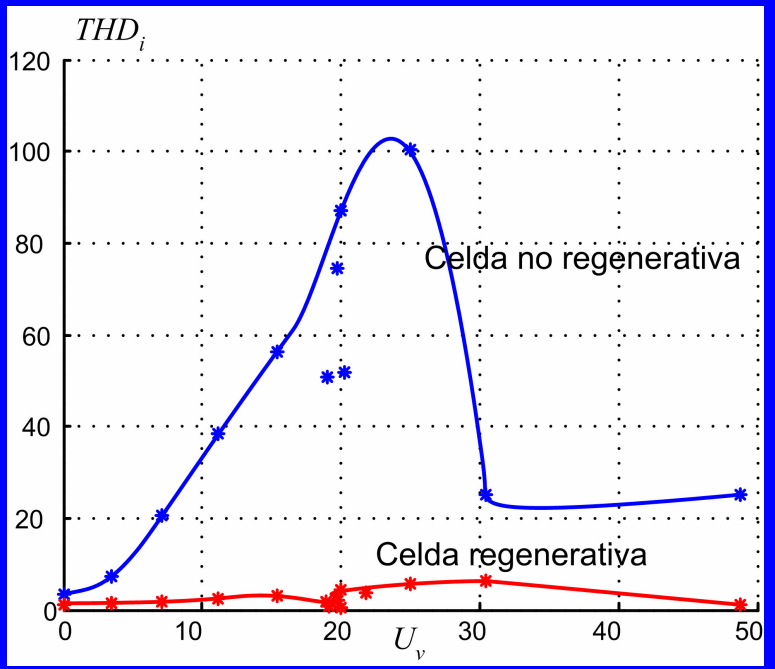
Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Depto. de Ingeniería Eléctrica

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Resultados

Comparación ante desbalances

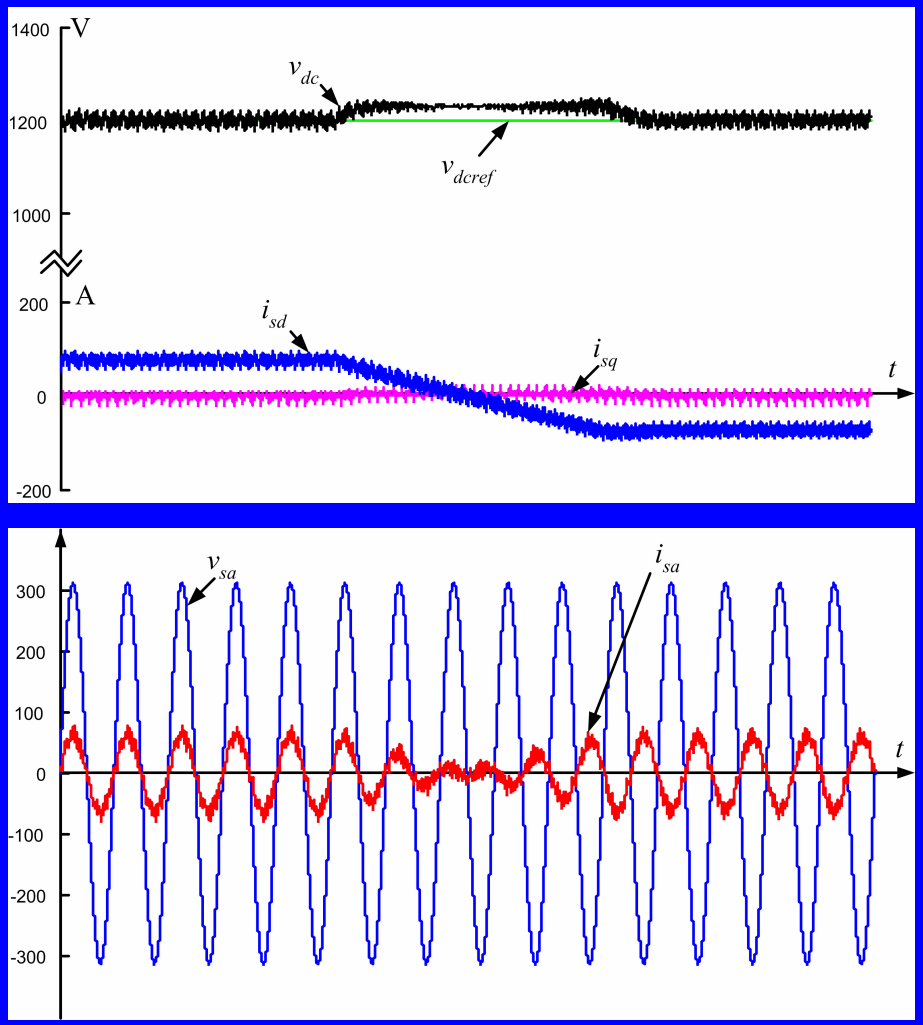




Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Resultados

Operación regenerativa



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Depto. de Ingeniería Eléctrica

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Conclusiones

- Convertidor Multi-celda
  - Calidad de Energía Entrada/Salida
  - Alta disponibilidad
    - No Permite Manejo de Cargas Regenerativas
    - Requiere Alta Capacidad en enlace DC
    - Alta sensibilidad ante desbalances
- Reemplazo Puente de diodos por Rectificador controlado
  - Permite Cargas Regenerativas
  - Permite control de potencia reactiva
  - Minimización de enlace DC (Ride-Through)
  - Disminuye sensibilidad ante desbalances
    - Disminuye la Confiabilidad
    - Disminuye la Eficiencia

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl

Conclusiones

Trabajos futuros

- Sintonización de controladores
- Optimización diseño condensador DC
- Estrategia de control para compensar efectos de desbalance

Marcelo A. Pérez L.
tel.: 41-203644 ~ fax.: 41-246999
marceloperez@udec.cl