

Desacoplo de lazos de control en estructura modular ISOP con filtro de entrada

E. Oña, P. Zumel, A. Lázaro, A. Barrado, A. Santoja, C. Fernández, C.M. Sanz, R. Vázquez ⁽¹⁾

Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)
Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia (GSEP)
Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid

⁽¹⁾SEPSA, Electrónica de Potencia S.A.
C/ Albatros, 7, Pol. Ind. La Estación
28320 Pinto, Madrid

Resumen – Una estructura modular entrada serie – salida paralelo (Input-Series Output-Paralleled ISOP) está formada por varios convertidores de potencia conectados en serie a la entrada y en paralelo a la salida. La conexión serie a la entrada, independientemente de su conexión de salida, es una buena solución en aplicaciones con elevada tensión de alimentación. Se debe asegurar el reparto de las tensiones de entrada y corrientes de salida de cada módulo individual de la estructura ISOP. En [1], se propuso una técnica de control, para el diseño de forma independiente de los reguladores de tensión de salida y tensiones de entrada. En el presente documento se comprueba la validez de la técnica antes mencionada añadiendo un filtro LC a la entrada de la estructura modular ISOP. La estructura modular estará formada por cuatro convertidores reductores DC/DC en puente completo, y la frecuencia de corte del filtro será de 25 Hz.

I. INTRODUCCIÓN

La conexión modular de convertidores de potencia, es decir, la construcción de convertidores en base a la conexión de unidades más pequeñas, es una técnica que puede presentar ventajas, tanto económicas como tecnológicas.

Una estructura modular con entrada serie y salida paralelo (ISOP), consiste en varios convertidores de potencia con sus entradas conectadas en serie y sus salidas en paralelo. Para cada módulo individual, la tensión de entrada se reduce a $\frac{V_E}{k}$, y la corriente de salida se reduce a $\frac{I_o}{k}$, siendo k el número de módulos, V_E y I_o la tensión de entrada y corriente de salida de la estructura modular, respectivamente. La implementación modular, presenta las siguientes ventajas: 1) fácil elección de los dispositivos de potencia gracias a la reducción de las tensiones de estrés; 2) reducción de la potencia consumida por cada módulo individual, siendo $\frac{P_o}{k}$, facilitando el diseño.

El control de estas estructuras no es trivial y ha despertado cierto interés en la comunidad científico-tecnológica [1-5]. Para el caso de estudio del presente artículo, se toma una estructura modular ISOP, mostrada en la figura 1, y formada por convertidores reductores CC/CC en puente completo. El control se centrará en conseguir el reparto de la tensión de entrada, lo más equitativo posible para que cada módulo individual proporcione la misma potencia. Además, una vez conseguido el reparto de la tensión de entrada, el reparto de la corriente de salida se consigue automáticamente. Adicionalmente se estudia el efecto en el control que tiene el filtro de entrada, que en algunas aplicaciones puede ser determinante.

En este artículo se propone modelar la configuración ISOP teniendo en cuenta el filtro de entrada (sección II) para convertidores con aislamiento de la familia del reductor. Se propone aplicar la técnica de control con desacoplo de lazos expuesta en [1] (sección III). En este caso se tiene en cuenta la influencia del filtro de entrada. En la sección IV se propone el cálculo de los reguladores. Finalmente, en la sección V se comprueban en simulación los efectos de las alternativas de diseño propuesta.

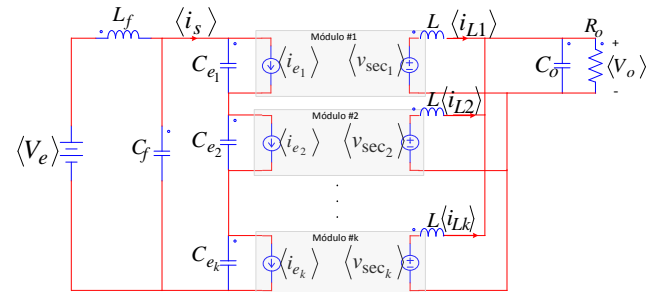


Figura 1. Convertidor modular entrada-serie salida-paralelo con filtro de entrada.

II. MODELO EN PEQUEÑA SEÑAL

El modelo en pequeña señal de la estructura modular con filtro de entrada se muestra en la figura 2:

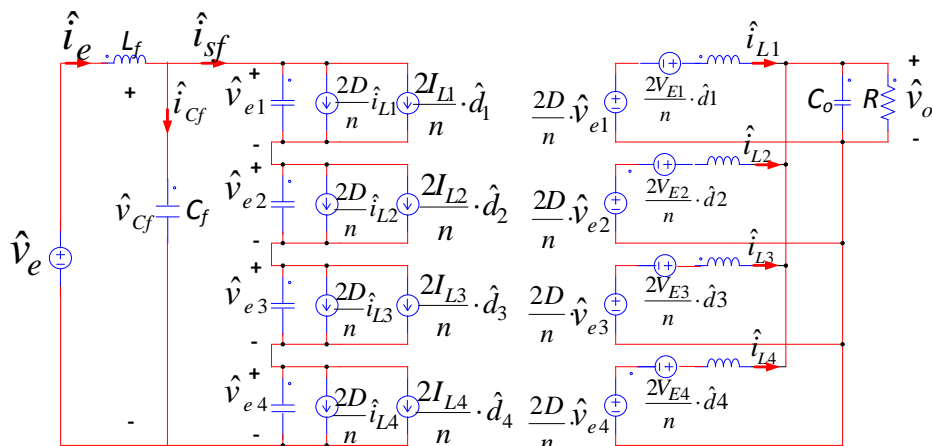


Figura 2. Modelo en pequeña señal para estructura ISOP con filtro de entrada

Las ecuaciones de pequeña señal, se obtienen a partir del modelo promediado de la figura 1. Considerando un módulo individual, y sabiendo que $\langle V_{secj} \rangle$ es el valor promedio de la tensión del secundario del transformador y $\langle i_{ej} \rangle$ es el valor promedio de la corriente de entrada, obtenemos para cada convertidor las siguientes ecuaciones en pequeña señal:

$$\hat{v}_{secj} = 2 \cdot \frac{V_E}{n} \cdot \hat{d}_j + 2 \cdot \frac{D}{n} \cdot \hat{v}_{ej} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (1.1)$$

$$\hat{i}_{ej} = 2 \cdot \frac{I_L}{n} \cdot \hat{d}_j + 2 \cdot \frac{D}{n} \cdot \hat{i}_{Lj} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (1.2)$$

Donde n es la relación de transformación $\frac{N1}{N2}$ entre el primario y el secundario; \hat{d}_j son los ciclos de trabajo, y D el valor nominal del ciclo de trabajo (en este caso igual para todos los módulos).

A. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA TENSIÓN DE SALIDA-A-CONTROL

La función de transferencia viene definida como:

$$G_{vd}(s) = \left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_g(s)=0} \quad (2)$$

Aplicando el principio de superposición a la salida tenemos que:

$$\hat{v}_o = \hat{v}_{o1} + \hat{v}_{o2} + \dots + \hat{v}_{ok} = \sum_{j=1}^{j=k} \hat{v}_{oj} \quad (3)$$

Siendo k el número de módulos de la estructura, y \hat{v}_{ok} la tensión de salida de la estructura manteniendo la tensión de secundario del convertidor número k y anulando la del resto.

De esta manera, tenemos en la figura 3 el circuito equivalente para la tensión \hat{v}_{ok} :

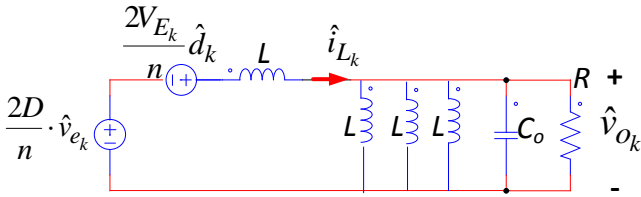


Figura 3. Circuito equivalente para aplicar el principio de superposición.

Para el primer módulo, si tenemos que $Z_A = L \parallel L \parallel L \parallel Co \parallel R$, la tensión de salida \hat{v}_{o1} será:

$$\hat{v}_{o1} = \frac{Z_A}{Z_A + s \cdot L} \cdot \left(\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \hat{v}_{e1} + \frac{2 \cdot V_{E1}}{n} \cdot \hat{d}_1 \right) \quad (4)$$

Si se denomina $G(s) = \frac{Z_A}{Z_A + s \cdot L}$, tenemos para la tensión de salida total:

$$\hat{v}_o = G(s) \cdot \left(\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \hat{v}_{e1} + \frac{2 \cdot V_{E1}}{n} \cdot \hat{d}_1 \right) \cdot \hat{v}_{o1} + G(s) \cdot \left(\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \hat{v}_{e2} + \frac{2 \cdot V_{E2}}{n} \cdot \hat{d}_2 \right) \cdot \hat{v}_{o2} + \dots + G(s) \cdot \left(\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \hat{v}_{ek} + \frac{2 \cdot V_{Ek}}{n} \cdot \hat{d}_k \right) \cdot \hat{v}_{ok} \quad (5)$$

Donde:

$$G(s) = \frac{s \cdot R_{esr} \cdot C_o + 1}{k + s \left((k-1)R_{esr} + R_{esr} \cdot C_o + \frac{L}{R} \right) + s^2 \cdot L \cdot C_o \cdot \left(\frac{R + R_{esr}}{R} \right)}$$

Sabiendo que: R_{esr} es la resistencia serie del condensador de salida; C_o el condensador de salida; R la resistencia de carga; k es el número de módulos; y L la inductancia de salida (suponiendo todas iguales).

Además, si tenemos que $V_{E1} = V_{E2} = \dots = V_{Ek} = \frac{V_E}{k}$, entonces:

$$\hat{v}_o = G(s) \cdot \frac{2V_E}{nk} \cdot (\hat{d}_1 + \hat{d}_2 + \dots + \hat{d}_k) + G(s) \cdot \frac{2D}{n} \cdot (\hat{v}_{e1} + \hat{v}_{e2} + \dots + \hat{v}_{ek}) \quad (6)$$

La ecuación anterior se simplifica si consideramos que $\hat{v}_{e1} + \hat{v}_{e2} + \dots + \hat{v}_{ek} = 0$, lo que es cierto si no existe filtro de entrada. Así obtenemos:

$$GVod(s) = \frac{\hat{v}_o}{\sum \hat{d}_j} = G(s) \cdot \frac{2V_E}{nk} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

A.1. CON FILTRO DE ENTRADA

En el caso con filtro, la suma de las tensiones de entrada individuales de los módulos es distinta de cero, siendo:

$$\hat{v}_{e1} + \hat{v}_{e2} + \dots + \hat{v}_{ek} = \sum_{j=1}^{j=k} \hat{v}_{ej} = \hat{v}_{cf} \quad (8)$$

A partir de la anterior figura 2, se plantea el balance de corrientes a la salida del filtro de entrada, obteniendo:

$$\hat{i}_{sf} = \hat{i}_{c1} + \frac{2I_{L1}}{n} \hat{d}_1 + \frac{2D}{n} \hat{i}_{L1} \quad (9.1)$$

$$\hat{i}_{sf} = \hat{i}_{c2} + \frac{2I_{L2}}{n} \hat{d}_2 + \frac{2D}{n} \hat{i}_{L2} \quad (9.2)$$

$$\hat{i}_{sf} = \hat{i}_{ck} + \frac{2I_{Lk}}{n} \hat{d}_k + \frac{2D}{n} \hat{i}_{Lk} \quad (9.3)$$

Sumando las ecuaciones (9.1), (9.2) y (9.3):

$$k \cdot \hat{i}_{sf} = sC_e \cdot \sum \hat{v}_{ej} + \frac{2I_o}{nk} \cdot \sum \hat{d}_j + \frac{2D}{n} \cdot \sum \hat{i}_{Lj} \quad (10)$$

Donde I_o : valor medio de la corriente de salida total.

Además, si se considera que la fuente de alimentación es ideal, la perturbación \hat{v}_e se puede despreciar, quedando:

$$\hat{i}_{sf} = -\frac{\hat{v}_{cf}}{Z_{cf}} \quad (11)$$

De esta manera se obtiene:

$$-\frac{k \cdot \hat{v}_{cf}}{Z_{cf}} = sC_e \cdot \sum \hat{v}_{ej} + \frac{2I_o}{nk} \cdot \sum \hat{d}_j + \frac{2D}{n} \cdot \sum \hat{i}_{Lj} \quad (12)$$

Siendo Z_{cf} la impedancia en paralelo de C_f y L_f .

Por otra parte, se hace balance de caída de tensión en la malla de salida, obteniendo:

$$\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \hat{v}_{e1} + \frac{2 \cdot V_{E1}}{n} \cdot \hat{d}_1 = (sL + R_{sl}) \cdot \hat{i}_{L1} + \hat{v}_o \quad (13.1)$$

$$\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \hat{v}_{e2} + \frac{2 \cdot V_{E2}}{n} \cdot \hat{d}_2 = (sL + R_{sl}) \cdot \hat{i}_{L2} + \hat{v}_o \quad (13.2)$$

$$\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \hat{v}_{ek} + \frac{2 \cdot V_{Ek}}{n} \cdot \hat{d}_k = (sL + R_{sl}) \cdot \hat{i}_{Lk} + \hat{v}_o \quad (13.k)$$

Sumando las anteriores ecuaciones se tiene:

$$\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \sum \hat{v}_{ej} + \frac{2 \cdot V_E}{nk} \cdot \sum \hat{d}_j = (sL + R_{sl}) \cdot \sum \hat{i}_{Lj} + k \cdot \hat{v}_o \quad (14)$$

En la figura 4 se observa que $\hat{v}_o = \hat{i}_o \cdot Z_o$, siendo $Z_o = R \parallel (R_{esr} + C_o)$. Además tenemos que:

$$\sum_{j=1}^{j=k} \hat{i}_{Lj} = \hat{i}_o \quad (15)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, la ecuación (14) será:

$$\frac{2 \cdot D}{n} \cdot \sum \hat{v}_{ej} + \frac{2 \cdot V_E}{nk} \cdot \sum \hat{d}_j = \hat{i}_o (sL + R_{sl} + k \cdot Z_o) \quad (16)$$

Despejando \hat{i}_o en (16):

$$\frac{2 \cdot D}{n} \cdot F(s) \cdot \sum \hat{v}_{ej} + \frac{2 \cdot V_E}{nk} \cdot F(s) \cdot \sum \hat{d}_j = \hat{i}_o \quad (17)$$

$$\text{Dónde: } F(s) = \frac{1 + sC_o(R_{esr} + R)}{s^2 L C_o (R_{esr} + R) + s\alpha + \beta}$$

$$\alpha = L + R_{sl} \cdot C_o \cdot (R_{esr} + R) + k \cdot R \cdot R_{esr} \cdot C_o$$

$$\beta = kR + R_{sl}$$

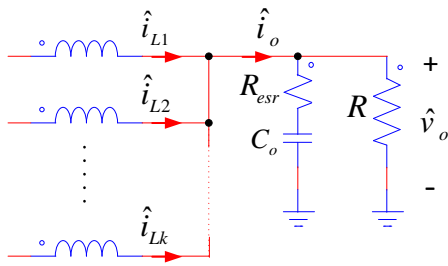


Figura 4. Malla de salida

Sustituyendo (17) en (12), se obtiene la relación entre la tensión en el filtro de entrada respecto de los ciclos de trabajo:

$$GVcfd(s) = \frac{\hat{v}_{cf}}{\sum \hat{d}_j} = b \cdot sys(s) + c \cdot sys(s) \cdot F(s) \quad (18)$$

$$\text{Siendo: } a = \frac{4D^2}{n^2}; \quad b = \frac{2I_o}{nk}; \quad c = \frac{4V_E \cdot D}{kn^2}$$

$$sys(s) = \frac{-a_1 s^3 - a_2 s^2 - a_3 s}{b_1 s^4 + b_2 s^3 + b_3 s^2 + b_4 s + b_5}$$

$$\begin{aligned} a1 &= L_f \cdot L \cdot C_o \cdot (R + R_{esr}) \\ a2 &= L_f \cdot \alpha \\ a3 &= L_f \cdot \beta \\ b1 &= k \cdot L_f \cdot C_f \cdot L \cdot R \cdot R_{esr} + L_f \cdot C_e \cdot L \cdot R \cdot R_{esr} \\ b2 &= k \cdot C_f \cdot L_f \cdot \alpha + C_e \cdot L_f \cdot \alpha \\ b3 &= k \cdot L \cdot R \cdot C_o + L_f \cdot C_f \cdot k \cdot \beta + C_e \cdot L_f \cdot \beta + a \\ &\quad \cdot L_f \cdot C_o \cdot R \\ b4 &= k \cdot \alpha + a \cdot L_f \\ b5 &= k \cdot \beta \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la influencia del filtro de entrada, la relación entre la tensión de salida y los ciclos de trabajo será:

$$GVod_f(s) = \frac{\hat{v}_o}{\sum \hat{d}_j} = G(s) \left[\frac{2D}{n} \cdot GVcfd(s) + \frac{2 \cdot V_E}{n \cdot k} \right] \quad (19)$$

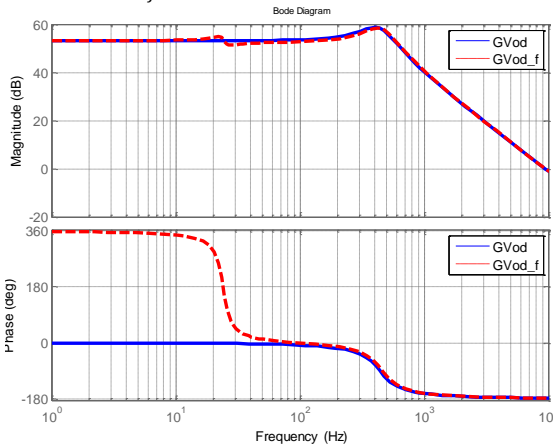


Figura 5. Respuesta en frecuencia de \hat{v}_o respecto \hat{d}_1 para caso sin filtro (azul) y con filtro de entrada (rojo).

En la figura 5, se compara la respuesta en frecuencia de la tensión de salida y con perturbación en el ciclo de trabajo del módulo #1, suponiendo el resto de perturbaciones despreciables. Se representa los resultados analíticos para el caso con y sin filtro de entrada. La comparación de las funciones de transferencia se hace mediante simulación del modelo promediado en OrCad. Los gráficos obtenidos en la simulación coinciden con los gráficos analíticos.

Hay que reseñar la gran influencia que tiene la presencia del filtro de entrada en la dinámica de la tensión de salida. En este caso, la presencia del filtro limita notablemente el ancho de banda alcanzable, puesto que a la frecuencia de resonancia del filtro de entrada se produce una pérdida de fase que no se puede recuperar con ningún regulador.

B. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA TENSIONES ENTRADA INDIVIDUALES – A – CONTROL

Restando (9.1) menos (9.2) se obtiene:

$$0 = sC_e(\hat{v}_{e1} - \hat{v}_{e2}) + \frac{2I_o}{nk}(\hat{d}_1 - \hat{d}_2) + \frac{2D}{n}(\hat{i}_{L1} - \hat{i}_{L2}) \quad (20)$$

Restando (13.1) menos (13.2) se obtiene:

$$\frac{2D}{n}(\hat{v}_{e1} - \hat{v}_{e2}) + \frac{2V_E}{nk}(\hat{d}_1 - \hat{d}_2) = (sL + R_{sl})(\hat{i}_{L1} - \hat{i}_{L2}) \quad (21)$$

Sustituyendo (21) en (20), se obtiene:

$$(\hat{v}_{e1} - \hat{v}_{e2}) = A(s)(\hat{d}_1 - \hat{d}_2) \quad (22)$$

Dónde:

$$A(s) = \frac{-(bR_{sl} + c) - s \cdot b \cdot L}{a + sC_e R_{sl} + s^2 \cdot L \cdot C_e}$$

De igual manera, se puede obtener:

$$(\hat{v}_{ej} - \hat{v}_{e(j+1)}) = A(s)(\hat{d}_j - \hat{d}_{(j+1)}) \quad (j = 1, 2, \dots, k-1) \quad (23)$$

De la ecuación (23):

$$\hat{v}_{ej} = \hat{v}_{e1} - A(s)(\hat{d}_1 - \hat{d}_j) \quad (24)$$

Resolviendo (24) para $(j = 1, 2, \dots, k)$ y sumando las ecuaciones:

$$\sum \hat{v}_{ej} = k\hat{v}_{e1} - kA(s)\hat{d}_1 + A(s)\sum \hat{d}_j \quad (25)$$

Para el caso sin filtro de entrada $\sum_{j=1}^{j=k} \hat{v}_{ej} = 0$, quedando:

$$\hat{v}_{ej} = A(s)\hat{d}_j - \frac{A(s)}{k}\sum_{j=1}^k \hat{d}_j \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (26)$$

B.1. CASO CON FILTRO

Para el caso con filtro de entrada, se sustituye (25) en (8), obteniendo:

$$\hat{v}_{cf} = k\hat{v}_{e1} - kA(s)\hat{d}_1 + A(s)\sum \hat{d}_j \quad (27)$$

Reemplazando (18) en (27), tenemos:

$$\hat{v}_{ej} = A(s)\hat{d}_j + \left(\frac{GVcfd}{k} - \frac{A(s)}{k} \right) \sum_{j=1}^k \hat{d}_j \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (28)$$

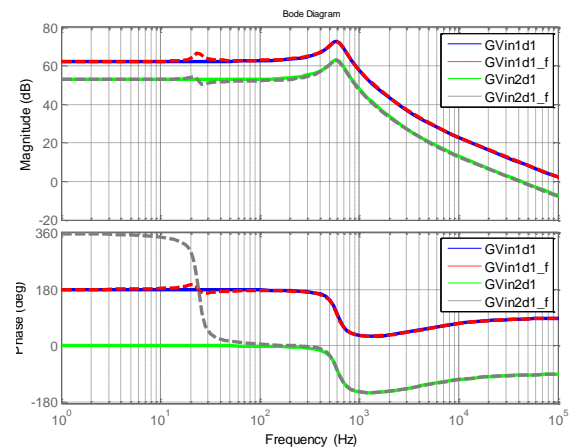


Figura 6. Respuesta en frecuencia para tensión de entrada: 1) módulo #1 respecto \hat{d}_1 , caso sin filtro (azul) y caso con filtro (rojo); 2) módulo #2 respecto \hat{d}_1 , caso sin filtro (verde) y caso con filtro (gris)

En la figura 6, se compara la respuesta en frecuencia de la tensión de entrada del módulo #1 y con perturbación en el ciclo de trabajo del módulo #1, suponiendo el resto de perturbaciones despreciables.

Al igual que en el caso anterior, se compara la respuesta analítica con la simulación del modelo promediado en OrCAD para validar los cálculos. Obsérvese que la influencia del filtro de entrada en esta función de transferencia es mucho menor que en el caso anterior.

III. DESACOPLO DE LOS LAZOS DE CONTROL

Recopilando las ecuaciones (7) y (26), se obtiene la siguiente expresión en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{e1,d} \\ \hat{v}_{e2,d} \\ \vdots \\ \hat{v}_{e(k-1),d} \\ \hat{v}_{o,d} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \\ \vdots \\ \hat{d}_k \end{bmatrix} \quad (29)$$

Donde $\hat{v}_{ej,d}$ son las tensiones de entrada a los módulos incluyendo las perturbaciones de todos los ciclos de trabajo \hat{d}_j para $j = 1, 2, \dots, k$, y H es la matriz:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{A(s)(k-1)}{k} & -\frac{A(s)}{k} & \dots & -\frac{A(s)}{k} & -\frac{A(s)}{k} \\ -\frac{A(s)}{k} & \frac{A(s)(k-1)}{k} & \dots & -\frac{A(s)}{k} & -\frac{A(s)}{k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -\frac{A(s)}{k} & -\frac{A(s)}{k} & \dots & \frac{A(s)(k-1)}{k} & -\frac{A(s)}{k} \\ GVod(s) & GVod(s) & \dots & GVod(s) & GVod(s) \end{bmatrix}$$

La ecuación anterior describe un sistema multivariable en el que las variables controladas dependen de todas las variables de control. El objetivo del desacoplo de los lazos es hacer un cambio de variables, y obtener unas nuevas variables de control ficticias de manera que cada variable controlada depende de una y solo una variable de control.

Matemáticamente esto significa obtener una matriz diagonal, en la que las funciones de transferencia para calcular los reguladores dependan de una sola variable de control. Tomando la primera fila de la matriz H , se observa que se puede sacar como factor común $A(s)$ para obtener:

$$\hat{v}_{e1,d} = -A(s) \left[\frac{(k-1)}{k} \hat{d}_1 + \frac{1}{k} \hat{d}_2 + \dots + \frac{1}{k-1} \hat{d}_{k-1} \right] = -A(s) \cdot \hat{x}_1 \quad (30)$$

Extendiendo el mismo proceso para el resto de filas, se llega a la matriz:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{e1,d} \\ \hat{v}_{e2,d} \\ \vdots \\ \hat{v}_{e(k-1),d} \\ \hat{v}_{o,d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A(s) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -A(s) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -A(s) & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & k \cdot GVod(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \vdots \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} \quad (31)$$

Donde se aprecia que las tensiones a controlar, dependen de una única nueva variable ficticia de control \hat{x}_j , y por lo tanto, se pueden calcular los reguladores de forma independiente.

A. CASO CON FILTRO

De las ecuaciones (19) y (28), tenemos:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{e1_f,d} \\ \hat{v}_{e2_f,d} \\ \vdots \\ \hat{v}_{e(k-1)_f,d} \\ \hat{v}_{o_f,d} \end{bmatrix} = HF \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \\ \vdots \\ \hat{d}_k \end{bmatrix} \quad (32)$$

Donde $\hat{v}_{ej_f,d}$ son las tensiones de entrada individuales de la estructura modular con filtro de entrada, incluyendo las

perturbaciones de todos los ciclos de trabajo \hat{d}_j para $j = 1, 2, \dots, k$, y HF es la matriz:

$$HF = \begin{bmatrix} \frac{A(s)(k-1)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & \dots & -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} \\ -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & \frac{A(s)(k-1)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & \dots & -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & \dots & \frac{A(s)(k-1)}{k} + \frac{GVcfd}{k} & -\frac{A(s)}{k} + \frac{GVcfd}{k} \\ GVod_f(s) & GVod_f(s) & \dots & GVod_f(s) & GVod_f(s) \end{bmatrix}$$

Tomando como base el caso sin filtro, se busca una combinación lineal para el caso con filtro que facilite el control del sistema. Si se expresa de otra manera la matriz HF , tenemos:

$$HF = \begin{bmatrix} \frac{A(s)(k-1)}{k} & -\frac{A(s)}{k} & \dots & -\frac{A(s)}{k} & -\frac{A(s)}{k} \\ -\frac{A(s)}{k} & \frac{A(s)(k-1)}{k} & \dots & -\frac{A(s)}{k} & -\frac{A(s)}{k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -\frac{A(s)}{k} & -\frac{A(s)}{k} & \dots & \frac{A(s)(k-1)}{k} & -\frac{A(s)}{k} \\ GVod_f(s) & GVod_f(s) & \dots & GVod_f(s) & GVod_f(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \\ \vdots \\ \hat{d}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{GVcfd(s)}{k} & \frac{GVcfd(s)}{k} & \dots & \frac{GVcfd(s)}{k} & \frac{GVcfd(s)}{k} \\ \frac{GVcfd(s)}{k} & \frac{GVcfd(s)}{k} & \dots & \frac{GVcfd(s)}{k} & \frac{GVcfd(s)}{k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{GVcfd(s)}{k} & \frac{GVcfd(s)}{k} & \dots & \frac{GVcfd(s)}{k} & \frac{GVcfd(s)}{k} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \\ \vdots \\ \hat{d}_k \end{bmatrix}$$

De esta manera tenemos que la tensión de entrada individual a los módulos es:

$$\hat{v}_{e1_f,d} = -A(s) \left[\frac{(k-1)}{k} \hat{d}_1 + \frac{1}{k} \hat{d}_2 + \dots + \frac{1}{k} \hat{d}_k \right] + GVcfd \cdot \sum_{j=1}^k \hat{d}_j \quad (33)$$

Si se define $\hat{x}_1 = \left[\frac{(k-1)}{k} \hat{d}_1 + \frac{1}{k} \hat{d}_2 + \dots + \frac{1}{k} \hat{d}_k \right]$, y haciendo lo mismo para el resto de tensiones de entrada, se llega a la siguiente relación entre ciclos de trabajo y variable de control auxiliar \hat{x}_j :

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \vdots \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(k-1)}{k} & \frac{1}{k} & \dots & \frac{1}{k} & \frac{1}{k} \\ \frac{1}{k} & -\frac{(k-1)}{k} & \dots & \frac{1}{k} & \frac{1}{k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{k} & \frac{1}{k} & \dots & -\frac{(k-1)}{k} & \frac{1}{k} \\ \frac{1}{k} & \frac{1}{k} & \dots & \frac{1}{k} & -\frac{(k-1)}{k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \\ \vdots \\ \hat{d}_k \end{bmatrix} \quad (34)$$

De la ecuación (33) despejamos \hat{d}_j :

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \\ \vdots \\ \hat{d}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & -1 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \vdots \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} \quad (35)$$

Finalmente, se obtiene una nueva expresión para las tensiones de entrada individual y salida modular mediante dos variables auxiliares:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{e1f-d} \\ \hat{v}_{e2f-d} \\ \vdots \\ \hat{v}_{e(k-1)f-d} \\ \hat{v}_{of-d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A(s) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -A(s) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -A(s) & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & k \cdot GVod_f(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \vdots \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{GVcfd(s)}{k} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{GVcfd(s)}{k} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{GVcfd(s)}{k} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{x}_k \\ \hat{x}_k \\ \vdots \\ \hat{x}_k \end{bmatrix} \quad (36)$$

La ecuación (36) da lugar al diagrama de bloques de la figura 7, donde $Rvin(s)$ y $Rvo(s)$ son los reguladores de tensión de entrada y salida respectivamente; $Kvin(s)$ y $Kvo(s)$ los sensores de la tensión de entrada y salida respectivamente.

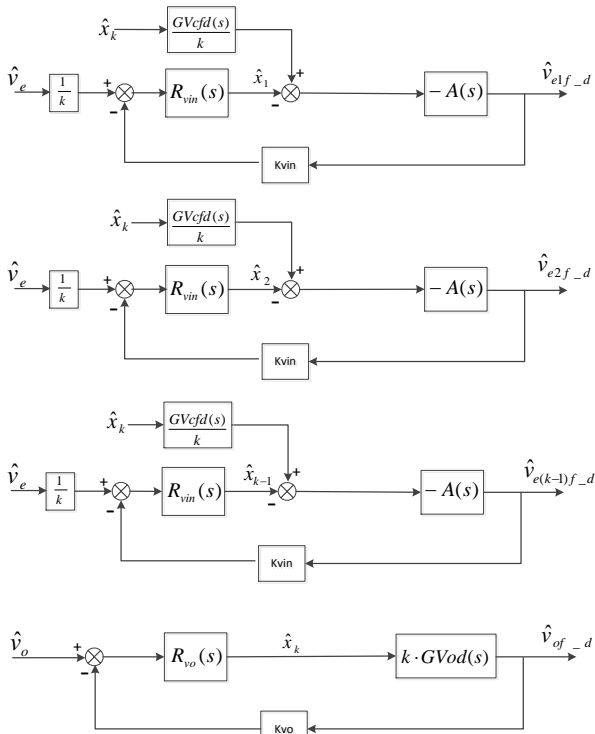


Figura 7. Diagrama de bloques simplificado para diseño de los reguladores.

Se observa que, en el caso con filtro, para calcular los reguladores de tensión de entrada existe una dependencia adicional de la variable \hat{x}_k multiplicada por el término $\frac{GVcfd(s)}{k}$. Dicha dependencia varía con la frecuencia, siendo despreciable a bajas frecuencias ya que en este caso la influencia del filtro de entrada es mínima. En algunos casos la influencia del filtro de entrada en la dinámica del sistema hace que los reguladores se tengan que diseñar por debajo de la frecuencia natural del filtro. Considerando esta restricción en el sistema analizado desde un punto de vista práctico para el cálculo de los reguladores los lazos están desacoplados, aunque estrictamente no lo están.

IV. DISEÑO DE LOS REGULADORES

Para sistemas con convertidores conectados en serie a la entrada, los requerimientos generales para el control son: reparto de la tensión de entrada, reparto de la corriente de

salida para el caso de conexión paralelo a la salida y regulación de la tensión de salida

Para el caso de sistemas con conexión ISOP, la estrategia de control mínima consiste en los siguientes lazos: un lazo principal de tensión de salida y (k-1) lazos de control para la tensión de entrada, que se aplican desde el primer módulo hasta el (k-1) módulo.

El diseño de los lazos de control, se hace de forma independiente y según el diagrama de la anterior figura 7. Para las especificaciones del diseño, se toma una estructura ISOP formada por cuatro convertidores DC/DC en puente completo. Los parámetros para la estructura completa son: tensión de entrada $V_E = 2600 V$, tensión de salida $V_o = 750 V$, potencia de salida $P_o = 240 kW$, condensador de salida $C_o = 1.32 mF$, resistencia serie condensador salida $R_{esr} = 50 m\Omega$, filtro LC de entrada: $L_f = 39.5 mH$ y $C_f = 1 mF$. Para los convertidores individuales: condensador de entrada $C_e = 220 \mu F$, resistencia serie condensador entrada $R_{Ce} = 1 n\Omega$, bobina de salida $L = 420 \mu F$, resistencia serie de la bobina $R_{sl} = 500 m\Omega$, relación de transformación $n = \frac{N1}{N2} = 0.676$.

Se diseñan los reguladores para tres casos: 1) sin filtro de entrada; 2) con filtro de entrada y rama *damping*; 3) con filtro de entrada sin rama *damping*.

A.1. SIN FILTRO DE ENTRADA

Cuando no se tiene filtro de entrada, los reguladores se pueden calcular de forma independiente, ya que según la ecuación (31) los lazos de control están desacoplados.

Para controlar la tensión de salida, se elige un regulador tipo III a una frecuencia de corte de 3 kHz y margen de fase de 50°. Para el control de las tensiones de entrada individuales, se utiliza nuevamente un regulador tipo III, con frecuencia de corte de 3 kHz y margen de fase de 50°.

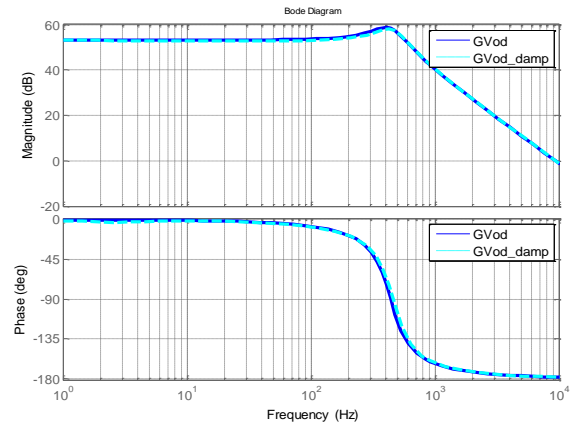


Figura 8. Planta sin filtro vs con filtro más rama *damping*

A.2. CON FILTRO Y RAMA DAMPING

En este caso, se incluye el filtro de entrada con una rama de amortiguamiento en paralelo con el condensador C_f , para reducir la influencia del filtro en el circuito. Se implementa la rama *damping* con $R_d = 852.3 m\Omega$ y $C_d = 81 mF$. De esta manera, se consigue que la función de transferencia de la planta con filtro sea muy similar a la planta en el caso sin filtro (figura 8), por lo que se utilizan los mismos reguladores calculados en el apartado A.1.

A.3. CON FILTRO Y SIN RAMA DAMPING

En este caso, se utiliza en primer lugar los mismos reguladores calculados en apartados anteriores. Interesa comprobar la respuesta del circuito con la influencia del filtro de entrada y verificar si es válido el desacoplo de los lazos para este caso.

V. COMPROBACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN

Haciendo una simulación del modelo promediado de la estructura modular mediante el software PSIM, se obtienen las gráficas mostradas a continuación. En los convertidores individuales se introducen diferencias en los valores de los componentes para obtener una visión más realista. Además, se han incluido efectos de carga en las simulaciones, siendo: hueco de tensión de entrada de 10 ms en el instante 1.5 segundos, e incremento de corriente de salida en el instante 2.5 segundos.

Para el caso sin filtro de entrada, la respuesta es rápida y constante en régimen permanente, ver figura 9. Se comprueba el desacoplo de los lazos ya que los ciclos de trabajo se establecen a diferentes niveles para satisfacer la consigna.

En el caso con filtro y *damping*, ver figura 10, la respuesta es muy parecida a la obtenida en el caso anterior. Sin embargo, la respuesta es más lenta y amortiguada. El desacoplo de los lazos se mantiene.

Finalmente, en el caso con filtro y sin *damping* se ha utilizado en primer lugar los reguladores de los apartados anteriores. La respuesta ha sido desfavorable, dado que el regulador de tensión de salida no está calculado teniendo en cuenta la influencia del filtro de entrada, ver figura 11.

Para solventar la inestabilidad, se ha fijado la frecuencia de corte del regulador de tensión de salida y de tensión de entrada por debajo de la frecuencia de corte del filtro. Así, los nuevos reguladores se calculan a una frecuencia de 5 Hz y con un margen de fase de 100°. Con dichos reguladores, el sistema funciona correctamente y el desacoplo se mantiene, ver figura 12. Esto se justifica analizando las Figuras 5 y 6, en las que se puede ver que a partir de la frecuencia de resonancia del filtro de entrada, las funciones de transferencia tensión de salida-ciclo de trabajo y tensión de entrada modulo i- ciclo de trabajo modulo j se ven muy influenciadas por el filtro de entrada. Por tanto, diseñando a una frecuencia lo suficientemente baja como para evitar la influencia del filtro de entrada, la estrategia de control propuesta sigue siendo válida.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ha modelado la conexión ISOP de convertidores full-bridge con filtro de entrada. Se ha aplicado la estrategia de desacoplo de lazos de control propuesta en [1]. La primera conclusión del modelado con filtro de entrada es que la estrategia de desacoplo de lazos de control debe ser evaluada cuando hay filtro de entrada.

Por un lado se ha comprobado la validez del desacoplo de lazos de control tanto para la ausencia de filtro de entrada, como para un filtro de entrada amortiguado.

El filtro de entrada sin amortiguar afecta, sobre todo, a la función de transferencia de la tensión de salida. De hecho, el regulador de tensión de salida se debe rediseñar para tener en cuenta la pérdida de fase que un filtro de entrada sin amortiguado produce.

Sin embargo, desde el punto de vista del control de las tensiones de entrada, la influencia del filtro es menor. En este caso se ha comprobado que, además de seguir siendo válida la estrategia de desacoplar los lazos de control, el regulador de tensión de entrada puede ser el mismo que sin considerar filtro de entrada.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto MODUFLAME DPI-2010:21110-C02-02 y a la colaboración dentro de la cátedra SEPSA.

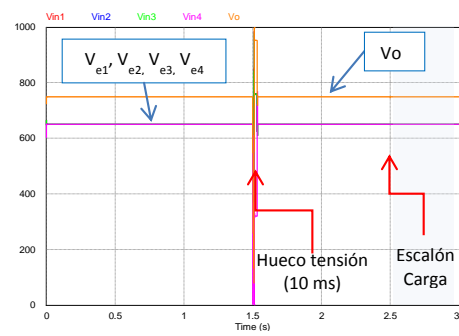


Figura 9. Simulación para caso sin filtro

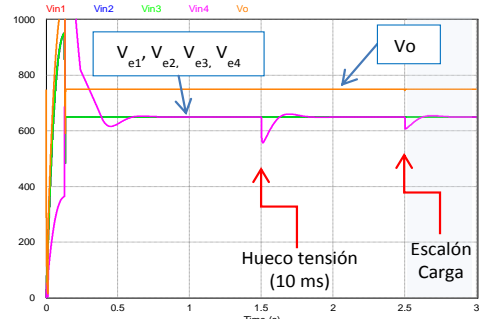


Figura 10. Simulación caso con filtro y rama damping.

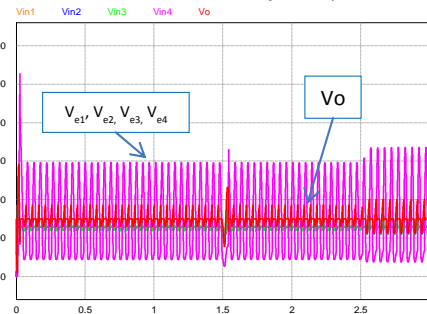


Figura 11. Simulación caso solo con filtro y regulador a 3 kHz.

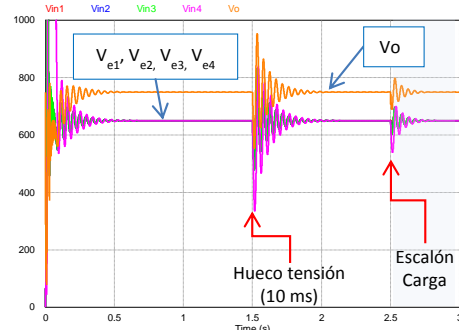


Figura 12. Simulación para caso solo con filtro y regulador de tensión de salida a 5 Hz y mismo regulador de tensión de entrada (a 3 kHz).

VIII. REFERENCIAS.

- [1] X. Ruan, L. Cheng, T. Zhang, "Control Strategy for Input-Series Output-Parallel Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, April 2009, pp. 1174-1185
- [2] Y. Huang, "General Control Considerations for Input-Series Output-Parallel Converters". *IEEE Trans. Ind. Electron.*, April 2009, VOL. 56, N°4
- [3] W. Cheng, X. Ruan, H. Yan, and C.K. Tse, "DC/DC Conversion system consisting of multiple converters modules: stability, control and experimental verification," *IEEE Trans. Power. Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 1463-1474, Jun. 2009.
- [4] D. Sha, Z. Guo, and X. Liao, "Cross feedback output current sharing control for input-series-output-parallel modular dc-dc converters," *IEEE Trans. Power. Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2762-2771, Nov. 2010.
- [5] R. Giri, R. Ayyanar, N. Mohan, "Common duty ratio control of input series connected modular DC-DC converters with active input voltage and load current sharing," In Proc. IEEE APEC, 2003, pp.322-326.