

Control de la energía en el bus de continua

El sistema de control de un filtro activo de potencia en derivación (SAPF) es el que se encarga de determinar, en tiempo real, las corrientes de referencia que el SAPF debe inyectar en la red. Mediante estas referencias, se debe conseguir el acondicionamiento de las corrientes solicitadas por la carga, y el mantenimiento de unas condiciones operativas adecuadas en el SAPF. Habitualmente, el sistema de control del SAPF consta de dos lazos de regulación con funciones claramente diferenciadas.

El lazo principal de control determina qué componentes de la corriente de carga deben ser compensadas, y en él, es común la aplicación de alguna teoría de potencia instantánea [6.1], o el uso de algún sistema un sistema filtrado adaptativo, generalmente basado en la existencia de un sistema referencia síncrono [6.2]. Aplicar una teoría de potencia instantánea consiste en calcular las diferentes componentes de la potencia instantánea solicitada por la carga, y entonces, aislar aquellas componentes que deberán ser aportadas por el SAPF. Las referencias de corriente de compensación se obtienen entonces mediante la correspondiente transformación, de potencia a corriente, sobre las componentes de potencia anteriormente aisladas [6.3][6.4]. La aplicación de un sistema de referencia síncrono consiste en expresar las corrientes de carga sobre un sistema de ejes rotativos ($d-q$) en el que el eje directo gira sincronizado con el vector de tensión fundamental de la red. En este sistema de referencia rotativo, la componente fundamental y puramente activa de la corriente solicitada por la carga aparece como un valor constante sobre el eje directo. Las referencias de corriente de compensación se obtienen entonces aislando todas aquellas componentes de la corriente que no den lugar a un valor constante sobre el eje directo del sistema de referencia síncrono [6.5][6.6].

Además del lazo de control principal, existe un lazo de control secundario que se encarga de mantener la tensión absoluta del bus de continua en torno a un valor establecido como referencia. Este segundo lazo modifica las referencias de corriente

de compensación originales, variando el valor medio de la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF, y consiguiendo regular la tensión absoluta del bus de continua.

Las causas que tienden a modificar el valor medio de la tensión del bus de continua, son principalmente las pérdidas de potencia internas del propio filtro (conducción y conmutación), los errores, transitorios o no, en el seguimiento de las referencias de corriente por parte del inversor, y la falta de exactitud en el cálculo de dichas referencias de corriente de compensación por parte del sistema de control.

La variable de entrada del lazo de control secundario suele ser el error en la tensión absoluta del bus, y la variable de salida es un juego de referencias de corriente, puramente activas, que determinan el valor de potencia activa que tiene que ser absorbida o entregada por el SAPF para compensar el error en la variable de entrada. Este lazo de control secundario presenta generalmente un comportamiento no lineal, ya que la relación existente entre la variación de la tensión absoluta del bus de continua, y la potencia activa desarrollada por el SAPF, no es lineal.

Generalmente, la acción coordinada de ambos lazos de control, el principal y el secundario, hace difícil la obtención de una expresión analítica que refleje la evolución instantánea de la tensión absoluta del bus de continua cuando aparece una variación en la potencia activa absorbida por la carga. Ante un evento de este tipo, el lazo principal de control tendrá que detectar las nuevas componentes de la corriente de carga que deben ser compensadas por el SAPF. Esta detección lleva asociado un cierto retraso de cálculo, determinado por la propia dinámica del lazo principal de control. El retraso en la detección de las referencias de corriente de compensación implica que, transitoriamente, el SAPF estará desarrollando un valor incorrecto de potencia activa, lo cual dará lugar a una variación en la tensión absoluta del bus de continua. Ante esta situación, el lazo secundario de control entra en acción para eliminar esta variación en la tensión del bus. Teniendo en cuenta que este lazo secundario de control presenta un comportamiento no lineal, resulta sumamente complicado obtener una expresión analítica de la evolución que seguirá la tensión absoluta del bus. Esto da lugar a que, generalmente, el dimensionamiento de los condensadores del bus de continua se realice teniendo únicamente en cuenta condiciones de régimen permanente, es decir, el dimensionado de los condensadores atiende a las oscilaciones de la potencia activa instantánea que debe ser desarrollada por el SAPF en régimen permanente [6.7][6.8].

En este Capítulo, se aplica un nuevo enfoque en el diseño del controlador del SAPF, y se presenta un controlador que determina las referencias de corriente del SAPF en base al estado energético de su bus de continua. Este nuevo enfoque permite disponer de las funciones de transferencia lineales que relacionan el estado energético del bus de continua con la potencia activa instantánea demandada por la carga. El análisis de estas funciones de transferencia, permite dimensionar los condensadores del bus de continua de acuerdo a la respuesta dinámica del sistema, y también, permite diseñar los lazos de control adecuados, que aseguran un correcto estado energético del bus de continua cuando aparecen bruscas variaciones en la potencia activa consumida por la carga.

6.1. Evolución de la tensión absoluta del bus de continua

La tensión absoluta del bus de continua se puede obtener a partir de la integración de la corriente que circula por los condensadores del mismo. De forma general, y teniendo en cuenta los sentidos de medida adoptados en el Apartado 4.4 para la obtención del modelo promediado del SAPF, esta tensión vale:

$$v_{dc} = v_{C1} - v_{C2} = \frac{1}{C} \int_0^t (i_{C1} - i_{C2}) dt + (v_{C1}(0) - v_{C2}(0)). \quad (6.1)$$

Substituyendo las expresiones de corriente mostradas en (4.16), se obtiene que:

$$v_{dc} = \frac{1}{C} \int_0^t \left\{ \frac{1}{v_{dc}} \left[\Delta v_C i_{F0} - 2p_{F3\phi} - 2L_F \sum_{i=a,b,c,d} (i_{Fi} \dot{i}_{Fi}) \right] \right\} dt + (v_{C1}(0) - v_{C2}(0)), \quad (6.2)$$

o lo que es lo mismo:

$$v_{dc} \dot{v}_{dc} = \frac{1}{C} \left[\Delta v_C i_{F0} - 2p_{F3\phi} - 2L_F \sum_{i=a,b,c,d} (i_{Fi} \dot{i}_{Fi}) \right]. \quad (6.3)$$

A partir de (6.3), es complicado obtener, de forma explícita, la expresión analítica que rige la evolución de la tensión absoluta del bus de continua. En (6.3), resulta sencillo entender que la tensión absoluta del bus depende de la potencia instantánea desarrollada por el SAPF, $p_{F3\phi}$, y de la potencia instantánea asociada a las inductancias del mismo, $L_F \sum (i_{Fi} \dot{i}_{Fi})$, ya que ambos términos están relacionados con la energía almacenada en dicho bus. Sin embargo, no es trivial comprender cómo la corriente inyectada en el punto medio del bus de continua, i_{F0} , puede modificar la tensión absoluta del mismo. Esta última peculiaridad afecta particularmente a los inversores TLSC y FLSC.

Para obtener una expresión analítica que evidencie la dependencia entre i_{F0} y v_{dc} , se supondrá una situación particular que simplifique el sistema a analizar. De esta forma, se supondrá que la cuarta rama de un inversor FLSC no se encuentra operativa ($i_{Fd}=0$), y para el resto de ramas (a,b,c), se impondrá una consigna de corriente constante de valor I_F . En ese caso, se estará inyectando una corriente $i_{F0} = 3I_F$ en el punto intermedio del bus de continua. Así mismo, se supondrá que la tensión de red está constituida por un conjunto de sinusoides equilibradas, $v_{San^+} + v_{Sbn^+} + v_{Scn^+} = 0$. Aplicando estas condiciones particulares en (4.16), se tiene que:

$$i_{C1} = C \frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{v_{C2}}{v_{dc}} 3I_F, \quad (6.4a)$$

$$i_{C2} = C \frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{v_{C1}}{v_{dc}} 3I_F. \quad (6.4b)$$

Operando con las ecuaciones anteriores se obtiene que:

$$(6.4a) + (6.4b) \quad \frac{d\Delta v_C}{dt} = M \frac{v_{C2} - v_{C1}}{v_{dc}} = -M, \quad (6.5a)$$

$$(6.4a) - (6.4b) \quad \frac{dv_{dc}}{dt} = M \frac{v_{C1} + v_{C2}}{v_{dc}} = M \frac{\Delta v_C}{v_{dc}}, \quad (6.5b)$$

donde $M = \frac{3I_F}{C}$.

De (6.5a) se obtiene que:

$$\Delta v_C = -Mt + C_1, \quad (6.6)$$

y substituyendo en (6.5b) se llega a que:

$$v_{dc} dv_{dc} = (-M^2 t + MC_1) dt. \quad (6.7)$$

Integrando esta ecuación se obtiene que:

$$v_{dc} = \sqrt{-M^2 t^2 + 2MC_1 t + C_2}, \quad (6.8)$$

donde C_1 y C_2 son constantes que dependen de las condiciones iniciales.

Si se supone que inicialmente las tensiones de los condensadores son $v_{C1}(0) = -v_{C2}(0) = V_{C0}$, se tendrá que, a partir de (6.6) y (6.8), el valor de estas constantes de integración es:

$$\Delta v_C(0) = v_{C1}(0) + v_{C2}(0) = 0 \Rightarrow C_1 = 0, \quad (6.9a)$$

$$v_{dc}(0) = v_{C1}(0) - v_{C2}(0) = 2V_{C0} \Rightarrow C_2 = 4V_{C0}^2. \quad (6.9b)$$

Por lo que la expresiones finales de (6.6) y (6.8) serán:

$$\Delta v_C = v_{C1} + v_{C2} = -Mt, \quad (6.10a)$$

$$v_{dc} = v_{C1} - v_{C2} = \sqrt{-M^2 t^2 + 4V_{C0}^2}. \quad (6.10b)$$

La expresión (6.10a) refleja, como cabía esperar, que la inyección de una corriente constante en el punto intermedio del bus de continua da lugar a una evolución lineal de la tensión diferencial de dicho bus. Por otro lado, la expresión (6.10b) muestra como la inyección de esta corriente constante en el punto intermedio del bus de continua origina una evolución pseudo-cuadrática en la tensión absoluta del bus.

La Figura 6.1 muestra el resultado de simulación de un SAPF basado en un inversor FLSC que inyecta 1A con las ramas a , b y c , y 0A con la cuarta rama. En este filtro, se supone que $C_1=C_2=1000\mu\text{F}$. En esta simulación, la evolución seguida por las variables de tensión del bus de continua responde fielmente a lo indicado en (6.10).

La extrapolación de las conclusiones obtenidas en el estudio de este caso particular permite afirmar que, en una situación genérica, la inyección de corriente en el punto intermedio del bus de continua originará, no sólo desequilibrio en las tensiones de los

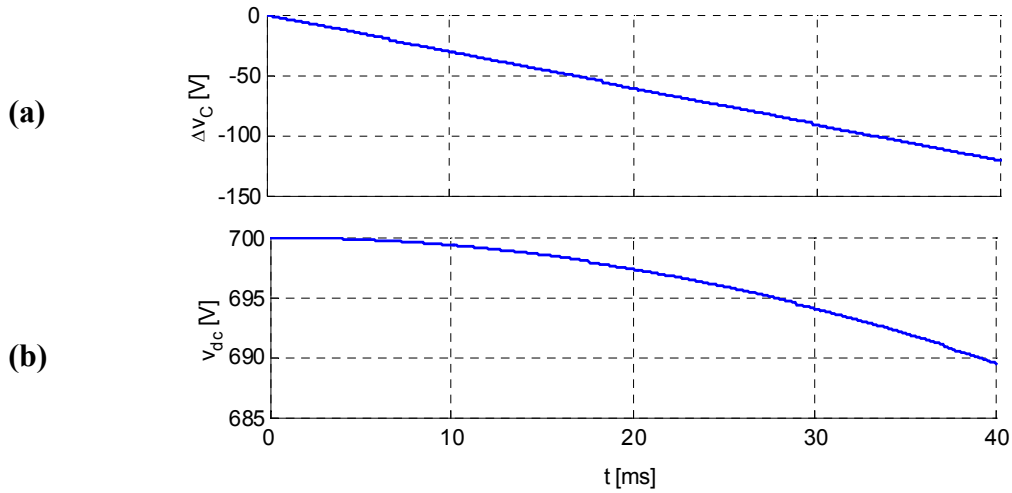


Figura 6.1. Tensión en el bus DC de un inversor TLSC cuando se inyecta corriente constante en el nodo intermedio de dicho bus.
(a) Tensión diferencial. (b) Tensión absoluta.

condensadores, sino también la variación de la tensión absoluta de dicho bus. Una vez más, queda patente que los efectos asociados con la inyección de corriente en el nodo intermedio de continua del inversor TLSC dificultan el control del inversor y obligan al sobredimensionado de los condensadores de su bus. Estos efectos nocivos reafirman aún más la utilidad de la cuarta rama del inversor FLSC.

6.2. Evolución de la energía almacenada en el bus de continua

Suponiendo que el bus de continua de un inversor se encuentra constituido por dos condensadores, la energía almacenada en dicho bus vale:

$$w_{dc} = \frac{1}{2} C (v_{C1}^2 + v_{C2}^2), \quad (6.11)$$

donde se ha considerado que $C_1 = C_2 = C$. En los inversores en puente completo (TLFB, FLFB), o en el inversor FLSC, se puede aceptar que, salvo en cortos periodos transitorios, la tensión diferencial del bus es nula, esto es:

$$\Delta v_{dc} = v_{C1} + v_{C2} = 0 \Rightarrow v_{C1} = -v_{C2}, \quad (6.12)$$

y consiguientemente, la energía almacenada en el bus de continua viene dada por:

$$w_{dc} = \frac{1}{4} C (v_{C1} - v_{C2})^2 = \frac{1}{4} C v_{dc}^2. \quad (6.13)$$

Por tanto, la expresión utilizada para estimar la variación de energía en el bus de continua, respecto a un valor inicial adoptado como referencia, será:

$$\Delta w_{dc} = \frac{1}{4} C (v_{dc}^2 - v_{dc(ref)}^2), \quad (6.14)$$

donde $v_{dc(ref)}$ es el valor de la tensión de referencia del bus.

Por otro lado, la energía almacenada en el bus de continua también se puede calcular a partir de la integración de la potencia instantánea asociada a los condensadores de dicho bus, esto es:

$$w_{dc} = \int_0^t (v_{C1}i_{C1} + v_{C2}i_{C2}) dt + w_{dc}(0), \quad (6.15)$$

donde $w_{dc}(0)$ representa la energía inicial almacenada en el bus en el instante inicial de integración. Por tanto, la variación de energía en dicho bus se puede expresar como:

$$\Delta w_{dc} = w_{dc} - w_{dc}(0) = \int_0^t (v_{C1}i_{C1} + v_{C2}i_{C2}) dt. \quad (6.16)$$

Si en (6.16) se sustituyen i_{C1} e i_{C2} por las expresiones mostradas en (4.16), se tiene que:

$$\Delta w_{dc} = - \int_0^t \left[p_{F3\phi} + L_F \sum_{i=a,b,c,d} (i_{Fi} \dot{i}_{Fi}) \right] dt = - \int_0^t (p_{F3\phi} + p_{LF}) dt. \quad (6.17)$$

En esta última expresión, se puede apreciar como la variación de la energía almacenada en el bus de continua, Δw_{dc} , no depende de la corriente inyectada en el punto intermedio del mismo, sino que únicamente depende de la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF, $p_{F3\phi}$, y de la potencia instantánea asociada a las inductancias de acople de las ramas, p_{LF} .

En el desarrollo de las expresiones anteriores, se ha considerado que el SAPF está constituido por dispositivos ideales, sin pérdidas. Sin embargo, en una implementación real aparecerán una serie de consumos de potencia adicionales, debidos principalmente a las pérdidas de conducción y conmutación de los elementos que constituyen el SAPF. Para tener en cuenta estas pérdidas de potencia adicionales, p_{loss} , la ecuación (6.17) debe ser modificada, y así obtener que:

$$\Delta w_{dc} = - \int_0^t (p_{F3\phi} + p_{LF} + p_{loss}) dt. \quad (6.18)$$

La expresión (6.18) resulta sumamente simple, y evidencia la relación lineal que existe entre la variación de energía en el bus de continua y los términos de potencia asociados al SAPF. Por tanto, desde un punto de vista energético, el SAPF puede representar mediante el diagrama de bloques de la Figura 6.2. En esta figura, con el objetivo de simplificar, se ha definido una nueva variable de potencia, tal que $p_{int} = p_{loss} + p_{LF}$.

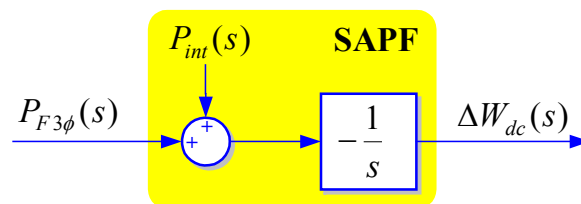


Figura 6.2. Modelo energético del SAPF.

A partir del diagrama de bloques de la Figura 6.2, parece lógico intuir que el control de la tensión absoluta del bus de continua del SAPF se podrá realizar, de una manera indirecta, a partir de la regulación de la variación de la energía almacenada en dicho bus. En este sentido, y asumiendo un reparto equitativo de las tensiones en los condensadores del bus de continua, la variación de energía en el mismo podrá ser calculada mediante (6.14). El resultado de este cálculo constituirá la variable de entrada a un controlador, que modificará el valor de la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF para así compensar adecuadamente las posibles variaciones en el valor medio de la energía almacenada en el bus de continua. El diseño de este controlador se expone en el Apartado 6.4, pero antes, será necesario conocer las solicitaciones de potencia ejercidas sobre el SAPF cuando se acondicionan las corrientes solicitadas por una carga genérica.

6.3. Solicitaciones de potencia sobre el SAPF

En condiciones totalmente generales, las tensiones que alimentan a una determinada carga pueden expresarse mediante (6.19a) y, bajo la misma hipótesis de generalidad, las corrientes absorbidas por dicha carga pueden representarse mediante (6.19b).

$$\begin{aligned} \vec{V}_L &= \begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{L\beta} \\ v_{L\gamma} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} (\vec{V}_L^{+n} + \vec{V}_L^{-n} + \vec{V}_L^{0n}) \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ V^{+n} \begin{bmatrix} \sin(\omega_n t + \phi^{+n}) \\ -\cos(\omega_n t + \phi^{+n}) \\ 0 \end{bmatrix} + V^{-n} \begin{bmatrix} \sin(\omega_n t + \phi^{-n}) \\ \cos(\omega_n t + \phi^{-n}) \\ 0 \end{bmatrix} + \sqrt{2} V^{0n} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin(\omega_n t + \phi^{0n}) \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (6.19a)$$

$$\begin{aligned} \vec{I}_L &= \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{L\beta} \\ i_{L\gamma} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} (\vec{I}_L^{+n} + \vec{I}_L^{-n} + \vec{I}_L^{0n}) \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ I^{+n} \begin{bmatrix} \sin(\omega_n t + \delta^{+n}) \\ -\cos(\omega_n t + \delta^{+n}) \\ 0 \end{bmatrix} + I^{-n} \begin{bmatrix} \sin(\omega_n t + \delta^{-n}) \\ \cos(\omega_n t + \delta^{-n}) \\ 0 \end{bmatrix} + \sqrt{2} I^{0n} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin(\omega_n t + \delta^{0n}) \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (6.19b)$$

En estas expresiones, los coeficientes V^{+n} , V^{-n} y V^{0n} representan respectivamente los valores de pico de los armónicos de tensión de secuencia positiva, negativa y homopolar. De la misma manera, los coeficientes I^{+n} , I^{-n} e I^{0n} representan lo propio para los armónicos de corriente. Con estas tensiones y corrientes, el valor medio de la potencia activa instantánea consumida por la carga vale:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{L3\phi} &= \frac{3}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [V^{+n} I^{+n} \cos(\phi^{+n} - \delta^{+n}) + V^{-n} I^{-n} \cos(\phi^{-n} - \delta^{-n}) \\ &\quad + V^{0n} I^{0n} \cos(\phi^{0n} - \delta^{0n})]. \end{aligned} \quad (6.20)$$

Para el acondicionamiento de las corrientes de (6.19b), debe resultar obvio que, aunque se utilice un SAPF con capacidad de almacenamiento de energía, la potencia activa de (6.20) será suministrada por la fuente del sistema de potencia, ya el SAPF no es capaz de entregar o almacenar energía de manera permanente. Además, las pérdidas de potencia internas del SAPF representarán un determinado consumo de potencia activa, \bar{p}_{int} . Por tanto, el valor medio de la potencia activa instantánea que debe ser suministrada desde el lado de fuente es:

$$\bar{p}_{S3\phi} = \bar{p}_{L3\phi} + \bar{p}_{int}. \quad (6.21)$$

En el Capítulo 2 quedó claro que, en función de la estrategia de compensación que se adopte en el SAPF, las corrientes del lado de fuente pueden tomar diferentes apariencias para suministrar la potencia activa de (6.21). Cuando se supone que la resistencia del conductor de neutro es nula, y según lo que se expuso en el Apartado 2.5.1, la estrategia promediada de cancelación de la corriente no activa (*S4*) es la que consigue el mínimo valor colectivo de corriente en el lado de fuente, lo que supone la máxima eficiencia en el sistema de transmisión. Con esta estrategia de compensación, las corrientes en los conductores del lado de fuente serán monótonamente proporcionales a las tensiones de fase. Como se argumentó en el Apartado 2.2, cuando las tensiones de red se encuentren distorsionadas y desequilibradas, puede que las corrientes resultantes de esta estrategia de compensación no sean las más adecuadas para la correcta operación del sistema de potencia y de los equipos en él conectados [6.9].

Para garantizar el correcto funcionamiento de los diferentes elementos del sistema de potencia, y conseguir el exhaustivo cumplimiento de las normativas reguladoras de polución armónica en la red [6.10], la mejor estrategia de compensación que se puede adoptar es la que origina, en el lado de fuente, corrientes sinusoidales, equilibradas, de frecuencia fundamental y secuencia positiva, véase la estrategia *S6* en el Apartado 2.5. Además, estas corrientes acondicionadas se encontrarán en fase con la componente de frecuencia fundamental y secuencia positiva de la tensión de red.

Con el objetivo de facilitar la exposición de las corrientes que debe inyectar el SAPF, expresaremos las corrientes solicitadas por la carga sobre un sistema de referencia síncrono formado por los ejes ortogonales $d^{+l}-q^{+l}-z^{+l}$, en el que el eje directo (d^{+l}) gira solidario con el vector de tensión de frecuencia fundamental y secuencia positiva que afecta a dicha carga (\vec{V}_L^{+l}). La transformación empleada en este caso es:

$$\vec{I}_L^{+l} = \begin{bmatrix} T_{dqz} \\ \theta = \theta_v^{+l} \end{bmatrix} \vec{I}_L^{+l} \quad ; \quad \begin{bmatrix} T_{dqz} \\ \theta = \theta_v^{+l} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{L\alpha\beta}^{+l}} \begin{bmatrix} v_{La}^{+l} & v_{L\beta}^{+l} & 0 \\ -v_{L\beta}^{+l} & v_{La}^{+l} & 0 \\ 0 & 0 & v_{La\beta}^{+l} \end{bmatrix}, \quad (6.22)$$

donde $v_{La\beta}^{+l} = \sqrt{(v_{La}^{+l})^2 + (v_{L\beta}^{+l})^2}$ es el módulo del vector \vec{V}_L^{+l} , calculado a partir de sus componentes en el sistema de referencia $\alpha-\beta-\gamma$. De esta forma, las corrientes de (6.19) se convierten en las mostradas en (6.23). En este nuevo sistema de referencia, las corrientes de frecuencia fundamental y secuencia positiva ($\vec{I}_L^{+l} = \vec{I}_{Ld^{+l}}^{+l} + \vec{I}_{Lq^{+l}}^{+l}$) aparecen como valores constantes en los ejes $d^{+l}-q^{+l}$ ($i_{Ld^{+l}}^{+l}, i_{Lq^{+l}}^{+l}$).

$$\tilde{I}_L^{(d^{+1}q^{+1}z^{+1})} = \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}} \\ i_{Lq^{+1}} \\ i_{Lz^{+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{dqz} \\ \theta = \theta_{\tilde{v}^{+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{L\beta} \\ i_{L\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}}^{+1} \\ i_{Lq^{+1}}^{+1} \\ 0 \end{bmatrix} + \underbrace{\sum_{n=2}^{\infty} \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}}^{+n} \\ i_{Lq^{+1}}^{+n} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\tilde{I}_L^{+(2..n)}} + \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} i_{Ld^{+1}}^{-n} \\ i_{Lq^{+1}}^{-n} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\tilde{I}_L^{-(1..n)}} + \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{Lz^{+1}}^{0n} \end{bmatrix}}_{\tilde{I}_L^{0(1..n)}} \quad (6.23a)$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} \left\{ I^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\delta^{+1} - \phi^{+1}) \\ \sin(\delta^{+1} - \phi^{+1}) \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{n=2}^{\infty} I^{+n} \begin{bmatrix} \cos((n-1)\omega_1 t + \delta^{+n} - \phi^{+1}) \\ \sin((n-1)\omega_1 t + \delta^{+n} - \phi^{+1}) \\ 0 \end{bmatrix} \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} I^{-n} \begin{bmatrix} \cos((n+1)\omega_1 t - \delta^{-n} + \phi^{+1}) \\ -\sin((n+1)\omega_1 t - \delta^{-n} + \phi^{+1}) \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I^{0n} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin(\omega_n t + \delta^{0n}) \end{bmatrix} \right\}. \quad (6.23b)$$

Para conseguir que las corrientes en el lado de fuente coincidan con las sinusoides anteriormente descritas, el SAPF tendrá que suministrar a la carga todas las componentes de corriente de (6.23), a excepción la nombrada como $i_{Ld^{+1}}^{+1}$ (correspondiente a $\tilde{I}_{Ld^{+1}}^{+1}$). Según (6.20), la interacción de las corrientes inyectadas por el SAPF con las diferentes componentes armónicas de la tensión de red, dará lugar a que el SAPF realice una transferencia neta de energía hacia la carga que descargará su bus de continua. Por tanto, según indica la Figura 6.3, el SAPF también deberá absorber, en forma de corrientes sinusoidales equilibradas de frecuencia fundamental ($\tilde{I}_{Sd^{+1}}^{+1*}$), la potencia activa necesaria para compensar la pérdida de energía anteriormente descrita, y la debida a sus pérdidas internas.

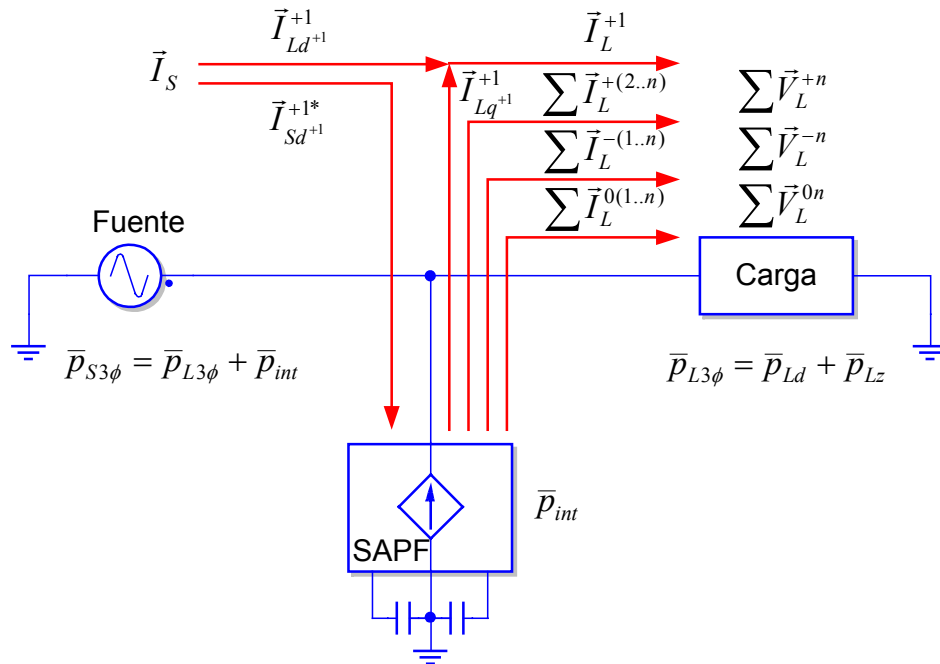


Figura 6.3. Corrientes suministradas por el SAPF bajo la estrategia de corriente sinusoidal en el lado de fuente (S6).

Según todo lo expuesto, las corrientes sinusoidales de frecuencia fundamental que deberían circular en el lado de fuente se calcularían mediante la expresión (2.174), la cual surgió cuando se presentaba la estrategia S6 en el Apartado 2.5, y que es ahora repetida aquí por conveniencia:

$$\vec{I}_{S(d^{+1}q^{+1}z^{+1})} = \begin{bmatrix} i_{Sd^{+1}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{p}_{S3\phi}}{|\vec{V}_L^{+1}|^2} \vec{V}_L^{+1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\bar{p}_{S3\phi}}{V^{+1}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6.24a)$$

Esta corriente se puede expresar sobre otros sistemas de referencia mediante:

$$\vec{I}_{S(\alpha\beta\gamma)} = \begin{bmatrix} i_{S\alpha}^{+1} \\ i_{S\beta}^{+1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{dqz} \\ \theta = \theta_V^{+1} \end{bmatrix}^{-1} \vec{I}_{S(d^{+1}q^{+1}z^{+1})} = \frac{\bar{p}_{S3\phi}}{|\vec{V}_L^{+1}|^2} \vec{V}_L^{+1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\bar{p}_{S3\phi}}{V^{+1}} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t + \phi^{+1}) \\ -\cos(\omega_1 t + \phi^{+1}) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6.24b)$$

$$\vec{I}_{S(abc)} = \begin{bmatrix} i_{Sa}^{+1} \\ i_{Sb}^{+1} \\ i_{Sc}^{+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{a\beta\gamma} \end{bmatrix}^{-1} \vec{I}_{S(\alpha\beta\gamma)} = \frac{\bar{p}_{S3\phi}}{|\vec{V}_L^{+1}|^2} \vec{V}_L^{+1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\bar{p}_{S3\phi}}{V^{+1}} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t + \phi^{+1}) \\ \sin(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3} + \phi^{+1}) \\ \sin(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3} + \phi^{+1}) \end{bmatrix}. \quad (6.24c)$$

En todas las expresiones anteriores, la componente de frecuencia fundamental y secuencia positiva de la tensión de red se obtiene mediante el DSRF-PLL descrito en el Capítulo 3.

Una vez conocidas las expresiones de las tensiones y corrientes en el lado de carga y de fuente, es posible determinar la potencia activa instantánea en cada uno de estos lados, y mediante su diferencia, se puede conocer la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF.

Las expresiones de la potencia activa instantánea consumida por una carga que trabaja en condiciones genéricas de tensión y corriente fueron presentadas en el Capítulo 2, concretamente, las ecuaciones (2.77) y (2.78) definían las componentes de potencia debidas a las corrientes de secuencia positiva y negativa, mientras que las ecuaciones (2.108) y (2.109) determinaban lo propio para las corrientes de secuencia homopolar. Sin necesidad de repetir aquí esas ecuaciones, en este desarrollo se entenderá que la potencia activa instantánea consumida por la carga se puede expresar como:

$$p_{L3\phi} = \bar{p}_{L3\phi} + \tilde{p}_{L3\phi} = \underbrace{\vec{V}_L \vec{I}_{Ld^{+1}}^{+1}}_{P_{L3\phi(+1)}} + \underbrace{\vec{V}_L \left(\vec{I}_{Lq^{+1}}^{+1} + \sum \vec{I}_L^{+(2..n)} + \sum \vec{I}_L^{-(1..n)} + \sum \vec{I}_L^{0(1..n)} \right)}_{P_{L3\phi(+,-,0)}}, \quad (6.25)$$

donde $p_{L3\phi(+1)} = \bar{p}_{L3\phi(+1)} + \tilde{p}_{L3\phi(+1)}$ está relacionada con el vector de corriente directa de frecuencia fundamental ($\vec{I}_{Ld^{+1}}^{+1}$), y $p_{L3\phi(+,-,0)} = \bar{p}_{L3\phi(+,-,0)} + \tilde{p}_{L3\phi(+,-,0)}$ lo está con el resto de las componentes de la corriente solicitada por la carga.

A partir de las corrientes mostradas en (6.24), y considerando que las tensiones en el lado de fuente y de carga son iguales y genéricas, $\vec{V}_S = \vec{V}_L$, la potencia activa

instantánea suministrada desde el lado de fuente vale:

$$p_{S3\phi} = \bar{p}_{S3\phi} + \tilde{p}_{S3\phi} = \vec{V}_L \vec{I}_S = \bar{p}_{S3\phi} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V^{+n}}{V^{+1}} \cos((n-1)\omega_1 t + \phi^{+n} - \phi^{+1}) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V^{-n}}{V^{+1}} \cos((n+1)\omega_1 t + \phi^{-n} + \phi^{+1}) \right]. \quad (6.26)$$

Esta potencia activa instantánea también se puede expresar como:

$$p_{S3\phi} = \bar{p}_{S3\phi} + \tilde{p}_{S3\phi} = \underbrace{\vec{V}_L \vec{I}_{Ld^{+1}}}_{P_{L3\phi(+1)}} + \underbrace{\vec{V}_L \vec{I}_{Sd^{+1}}^*}_{P_{S3\phi(+1)}^*}, \quad (6.27)$$

donde $p_{L3\phi(+1)}$ es la misma componente de potencia activa instantánea que se definió en (6.25), y $p_{S3\phi(+1)}^* = \bar{p}_{S3\phi(+1)}^* + \tilde{p}_{S3\phi(+1)}^*$ está relacionada con la corriente directa de frecuencia fundamental ($I_{Sd^{+1}}^{+1*}$) que debe solicitar el SAPF para mantener constante el valor medio de la energía almacenada en el bus de continua. Según esto, las corrientes del lado de fuente valen:

$$\vec{I}_S = \vec{I}_{Ld^{+1}} + \vec{I}_{Sd^{+1}}^* = \frac{\bar{P}_{L3\phi(+1)}}{|\vec{V}_L^{+1}|} \vec{V}_L^{+1} + \frac{\bar{P}_{L3\phi(+,-,0)} + \bar{P}_{int}}{|\vec{V}_L^{+1}|} \vec{V}_L^{+1}. \quad (6.28)$$

Una vez conocida la potencia activa instantánea en el lado de fuente y de carga, la diferencia entre (6.25) y (6.27) permite determinar la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF, esto es:

$$p_{F3\phi} = p_{L3\phi} - p_{S3\phi} = \tilde{p}_{L3\phi} - \tilde{p}_{S3\phi} - \bar{p}_{int} \quad (6.29)$$

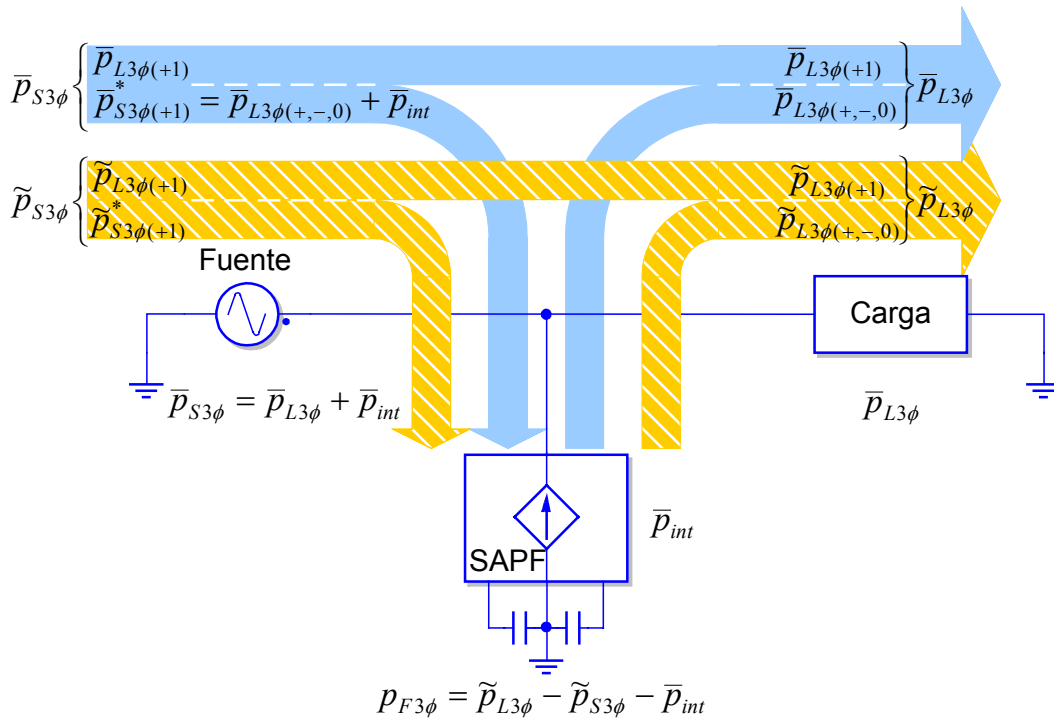


Figura 6.4. Potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF bajo la estrategia de corriente sinusoidal en el lado de fuente.

La Figura 6.4 representa esquemáticamente el flujo de la potencia activa instantánea en el sistema cuando, ante la presencia de tensiones y corrientes genéricas, el SAPF utiliza la estrategia de compensación que obtiene corrientes sinusoidales en el lado de fuente.

Cuando la potencia activa instantánea de (6.29) se aplica a la entrada del modelo energético del SAPF que se mostraba en la Figura 6.2, se obtiene que:

$$\Delta w_{dc} = - \int_0^t (\tilde{p}_{L3\phi} - \tilde{p}_{S3\phi}) dt. \quad (6.30)$$

La ecuación (6.30) indica que, de acuerdo a la estrategia de compensación aquí utilizada, el valor medio de energía almacenada en el bus de continua permanecerá constante a lo largo del tiempo, ya que la variación de energía en dicho bus resulta de la integración de términos de potencia con valor medio nulo.

La frecuencia mínima en las oscilaciones de la potencia activa instantánea que debe ser desarrollada por el SAPF es un factor crucial en el diseño del controlador energético del sistema. En este sentido, las oscilaciones de frecuencia fundamental en la potencia activa instantánea aparecerían como consecuencia de la interacción entre componentes de tensión y corriente de la misma secuencia y orden armónico consecutivo. Teniendo en cuenta lo improbable de esta situación bajo condiciones usuales de operación de sistema eléctrico, se considerará que la menor frecuencia de las oscilaciones en la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF será de dos veces la frecuencia fundamental de la red. Generalmente, estas oscilaciones de baja frecuencia aparecen como consecuencia de la interacción de tensiones y corrientes de secuencia opuesta y frecuencia fundamental, y de la interacción de tensiones y corrientes homopolares de frecuencia fundamental.

Para determinar la potencia imaginaria instantánea desarrollada por el SAPF se podría seguir un desarrollo análogo al empleado para la obtención de (6.29). Sin embargo, teniendo en cuenta que dicha potencia imaginaria no provocará variaciones en la energía almacenada en el bus de continua, dicho desarrollo no se expondrá con detalle, y simplemente se mostrará su resultado final que es:

$$q_F = \bar{q}_L + \tilde{q}_L - \tilde{q}_S \quad (6.31)$$

6.4. Control convencional del SAPF basado en la potencia de la carga

En una aplicación de acondicionamiento de corriente donde se disponga de un SAPF con capacidad de almacenamiento de energía, generalmente se perseguirá que el valor medio de la potencia activa instantánea consumida por la carga sea suministrado por la fuente. Un enfoque clásico de control consiste en calcular la potencia activa instantánea de la carga y extraer, mediante un filtro pasa altas, las componentes oscilantes de la misma que deberán ser suministradas por el SAPF, determinándose así las corrientes que deberán ser inyectadas por éste [6.11].

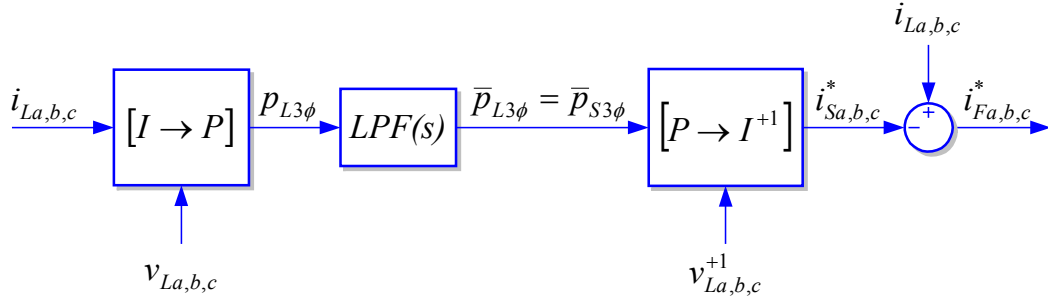


Figura 6.5. Control convencional del SAPF basado en el cálculo de la potencia activa instantánea de la carga.

Otra alternativa común, que presenta mejores prestaciones de filtrado en régimen permanente, consiste en extraer, mediante un filtro pasa bajas, el valor medio de la potencia activa instantánea consumida por la carga, y a partir de ésta, determinar las corrientes que deberían circular en el lado de fuente. La diferencia entre las corrientes instantáneas de carga y las que deberían circular por la fuente, permitirá obtener las corrientes que deberán ser inyectadas por el SAPF [6.12].

En la Figura 6.5 se muestra el diagrama de bloques de un posible sistema de control convencional. En esta figura, la potencia activa instantánea consumida por la carga se calcula mediante la transformación $[I \rightarrow P]$, mientras que la transformación $[P \rightarrow I^{+1}]$ sirve para calcular, mediante (6.24c), las corrientes de referencia del lado de fuente. Lógicamente, mediante el sistema de control de la Figura 6.5, las corrientes resultantes en el lado de fuente serán sinusoides equilibradas de frecuencia fundamental, las cuales, además, se encontrarán en fase con la componente fundamental de la tensión de red.

En la Figura 6.5, la frecuencia de corte de este filtro pasa bajas, LPF , determinará la dinámica del sistema, y se elige en función de la mínima frecuencia de oscilación de la potencia activa instantánea consumida por la carga. En el Apartado 6.3, se concluyó que la potencia activa instantánea usualmente presenta una frecuencia mínima de oscilación igual a dos veces la frecuencia fundamental de la red. Por este motivo, la función de transferencia de este filtro pasa bajas es:

$$LPF(s) = \frac{\omega_f^2}{(s + \omega_f)^2} \quad ; \quad \omega_f = \frac{2\omega_S}{10} \quad ; \quad \omega_S = \text{pulsación fundamental de red.} \quad (6.32)$$

En este filtro, se ha elegido un factor de amortiguamiento unitario con el objetivo de minimizar las oscilaciones transitorias a la salida del mismo.

Teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} i_{Sa,b,c}^* \cdot v_{La,b,c} &= \bar{p}_{S3\phi}^* + \tilde{p}_{S3\phi}^* = \bar{p}_{L3\phi}^* + \tilde{p}_{S3\phi}^*, \\ i_{La,b,c} \cdot v_{La,b,c} &= \bar{p}_{L3\phi} + \tilde{p}_{L3\phi}, \\ i_{Fa,b,c}^* \cdot v_{La,b,c} &= \tilde{p}_{F3\phi}^*, \end{aligned} \quad (6.33)$$

el diagrama de la Figura 6.5 se puede expresar en términos de potencia como muestra la Figura 6.6.

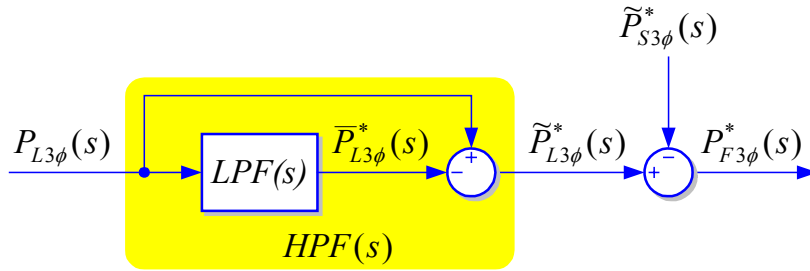


Figura 6.6. Referencia de potencia activa instantánea para el SAPF.

En la Figura 6.6, el conjunto $HPF(s)$ responde a la expresión:

$$HPF(s) = (1 - LPF(s)) = \frac{s(s + 2\omega_f)}{(s + \omega_f)^2}. \quad (6.34)$$

Si el modelo energético del SAPF, mostrado en la Figura 6.2, se añade al diagrama de control de potencias mostrado en la Figura 6.6, se obtiene el diagrama final de la Figura 6.7, el cual relaciona los diferentes términos de potencia con la variación de energía en el bus de continua del convertidor. En este diagrama $G(s) = -s^{-1}$.

El diagrama de la Figura 6.7 responde a la siguiente función de transferencia:

$$\Delta W_{dc}(s) = G(s) [HPF(s) \cdot P_{L3\phi}(s) + P_{int}(s) - \tilde{P}_{S3\phi}^*(s)] \quad (6.35)$$

Como muestra (6.35), utilizando la estrategia básica de control mostrada hasta el momento, las pérdidas de potencia internas del SAPF no se encuentran compensadas, y el valor medio de esta potencia de pérdidas se traducirá en un decremento progresivo de la energía almacenada en el bus de continua. Esta razón es suficiente para justificar la necesidad de una modificación del lazo de control, sin embargo, para establecer correctamente las modificaciones necesarias, pasemos a analizar cuál es la respuesta del sistema bajo el supuesto de que $P_{int}(s) - \tilde{P}_{S3\phi}^*(s) = 0$. En este caso, las funciones de transferencia de lazo abierto a analizar serán:

$$\frac{P_{F3\phi}^*}{P_{L3\phi}}(s) = HPF(s) = \frac{s(s + 2\omega_f)}{(s + \omega_f)^2}, \quad (6.36a)$$

$$\frac{\Delta W_{dc}}{P_{L3\phi}}(s) = G(s)HPF(s) = -\frac{s + 2\omega_f}{(s + \omega_f)^2}. \quad (6.36b)$$

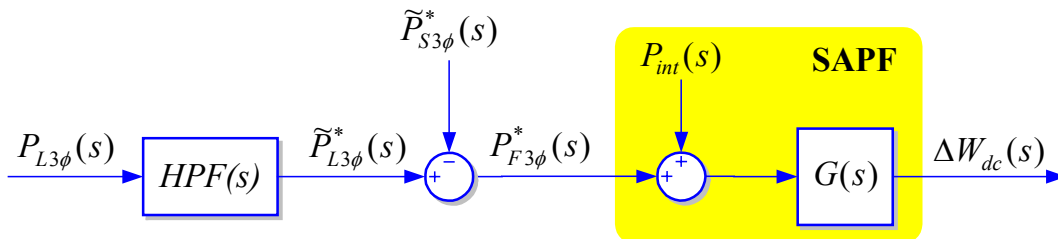


Figura 6.7. Diagrama simplificado de la solicitud energética sobre el SAPF.

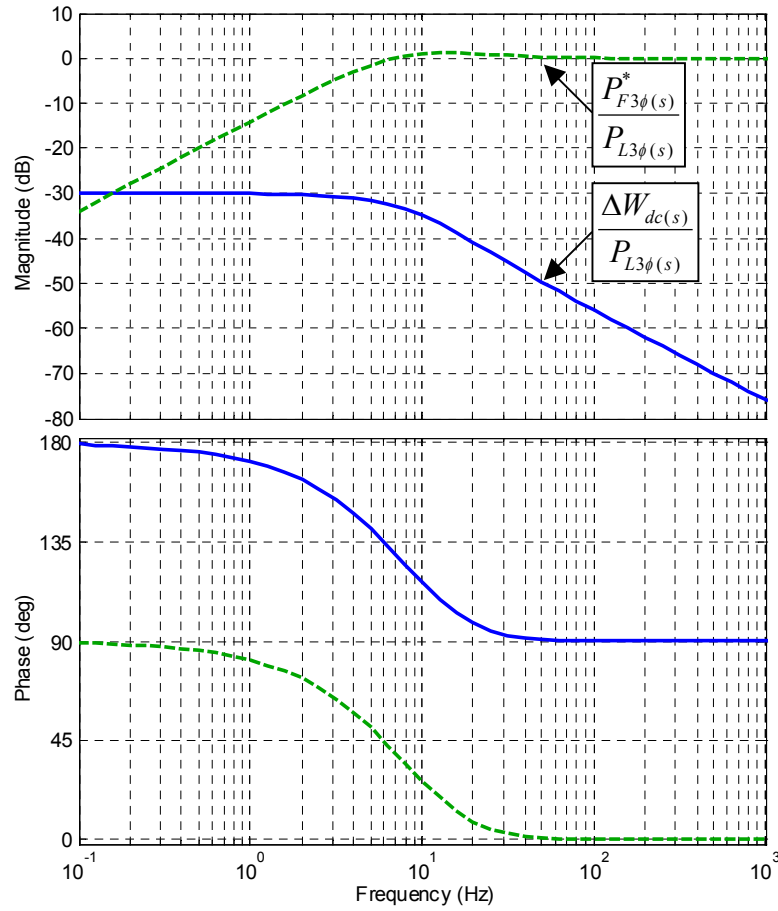


Figura 6.8. Diagramas de Bode de la función de transferencia de lazo abierto de $p_{L3\phi}$ a $[p_{F3\phi}^*, \Delta w_{dc}]$.

La Figura 6.8 muestra el diagrama de Bode de las funciones de transferencia de (6.36). En esta figura, y en lo sucesivo, se considerará que la frecuencia fundamental de red es de 50Hz, por lo que el filtro pasa-bajas mostrado en la Figura 6.5 se sintonizará con una frecuencia de corte $\omega_f = 2\pi 10$ rad/s. En esta figura, se aprecia como las componentes oscilantes de la potencia activa instantánea de la carga con frecuencia superior a 100 Hz, son aportadas como referencias de potencia para el SAPF con una atenuación y desfase prácticamente nulos.

La Figura 6.9 muestra la respuesta temporal de la potencia activa instantánea desarrollada por el filtro, $p_{F3\phi}^*$, y de la variación de la energía almacenada en el bus de continua, Δw_{dc} , ante un escalón unitario de la potencia activa instantánea solicitada por la carga, $p_{L3\phi}$. En esta figura, se aprecia como el valor de régimen permanente de Δw_{dc} ante el mencionado escalón de potencia en carga es:

$$\Delta w_{dc-ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s(G(s) \cdot HPF(s) \cdot u(s)) = -\frac{2}{\omega_f}. \quad (6.37)$$

La eliminación de este error de régimen permanente justifica, aún más, la necesidad de un lazo de control que asegure que el valor medio de la energía almacenada en el

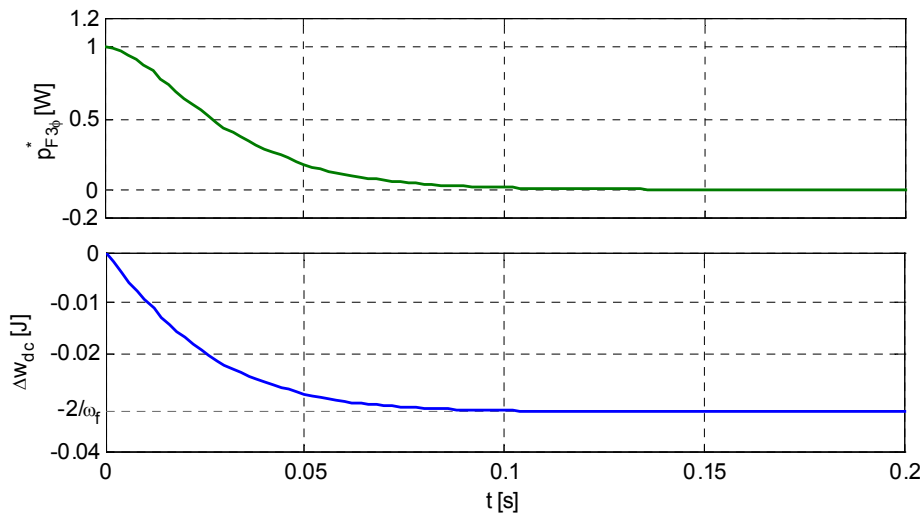


Figura 6.9. Respuesta temporal del sistema en lazo abierto ante un escalón de potencia unitario en la potencia consumida por la carga, $p_{L3\phi}$.

bus de continua permanezca constante ante variaciones en la potencia activa consumida por la carga.

6.5. Control energético del SAPF

Con el objetivo de controlar la variación de energía en el bus de continua, se propone el sistema de la Figura 6.10, donde $C(s)=k$ es un controlador proporcional. Las funciones de transferencia características de este sistema de control son:

$$\frac{P_{F3\phi}^*}{P_{L3\phi}}(s) = HPF(s) \frac{1}{1 - G(s)C(s)} = \frac{s^2(s + 2\omega_f)}{(s + k)(s + \omega_f)^2}, \tag{6.38a}$$

$$\frac{\Delta W_{dc}}{P_{L3\phi}}(s) = HPF(s) \frac{G(s)}{1 - G(s)C(s)} = -\frac{s(s + 2\omega_f)}{(s + k)(s + \omega_f)^2}. \tag{6.38b}$$

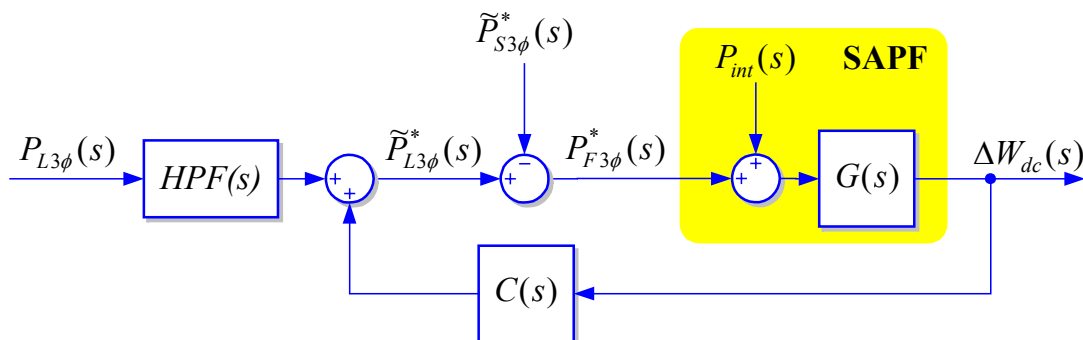


Figura 6.10. Controlador proporcional de la variación de energía en el bus de continua.

Respecto a las funciones de transferencia de lazo abierto que se mostraban en (6.36), las funciones de lazo cerrado de (6.38) presentan un nuevo cero en $s=0$ y un nuevo polo dependiente del valor que se asigne a la ganancia del controlador proporcional. El nuevo cero asegura que, ante un escalón en la potencia activa solicitada por la carga, la variación de energía en el bus de continua en régimen permanente es nula. Teniendo en cuenta que el valor de ω_f se ha fijado en $2\pi 10$ rad/s, la posición del nuevo polo, o lo que es lo mismo, la ganancia del controlador proporcional determina la velocidad de respuesta del sistema.

A la hora de establecer el valor de la ganancia k , es preciso recordar que las componentes oscilantes de la potencia activa instantánea de la carga con frecuencia igual o superior a 100Hz deben ser aportadas íntegramente por el SAPF. Según esto, el valor de esta ganancia debe determinarse a partir de la respuesta frecuencial de la función de transferencia mostrada en (6.38a), la cual corresponde a un sistema pasaltas, cuya banda pasante viene fijada por el valor de k y ω_f . Por tanto, para asegurar que las componentes de frecuencia igual a 100Hz prácticamente no sufran atenuación en (6.38a), el valor adoptado para la ganancia del controlador proporcional es $k = \omega_f = 2\pi 10$ rad/s. En la Figura 6.11 se muestra el diagrama de Bode de las funciones de transferencia de (6.38) para este valor de k .

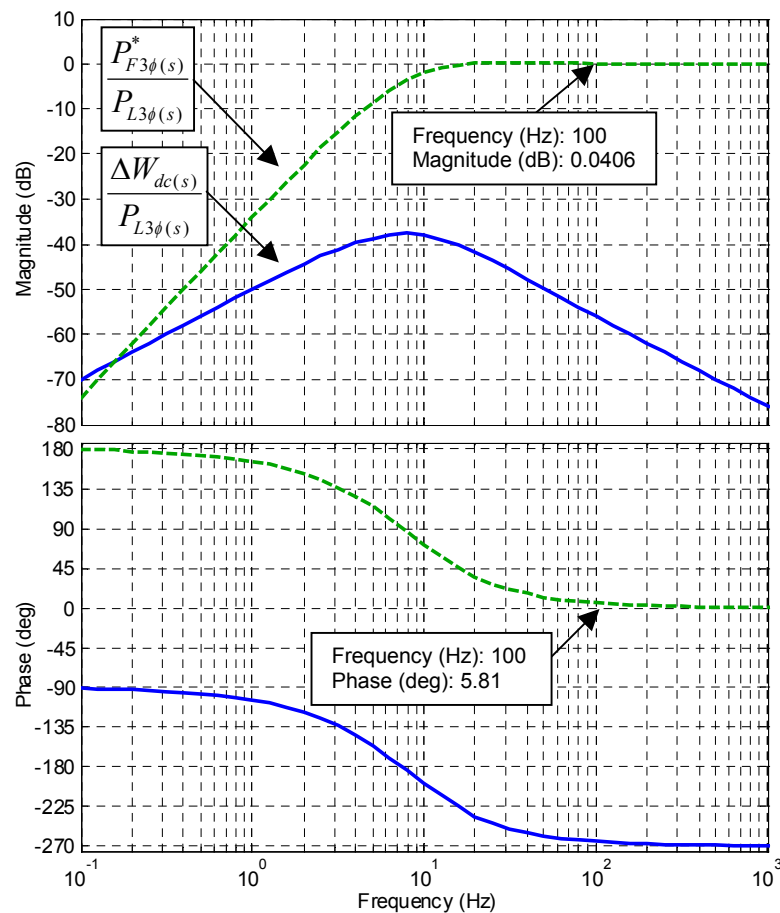


Figura 6.11. Diagramas de Bode de la función de transferencia de lazo cerrado de $P_{L3\phi}$ a $\left[P_{F3\phi}^* \cdot \Delta W_{dc} \right]$.

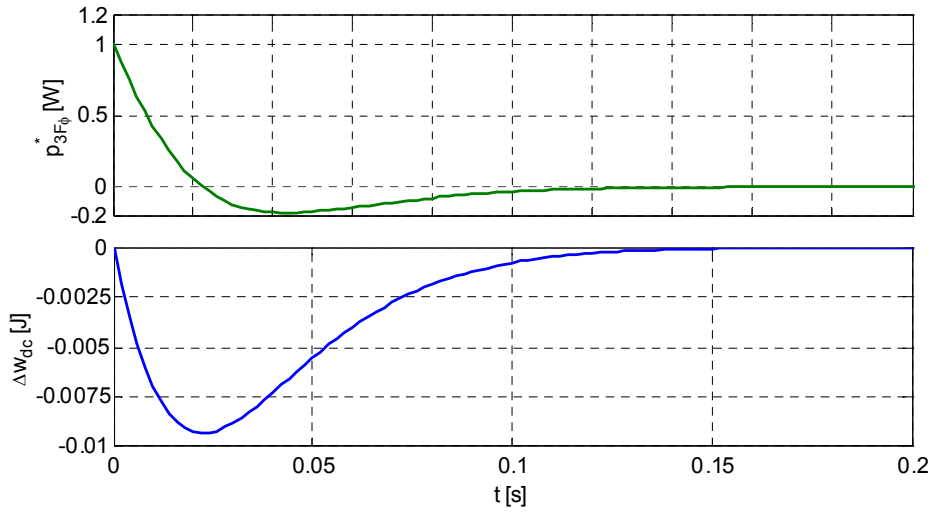


Figura 6.12. Respuesta temporal del sistema en lazo cerrado ante un escalón unitario en la potencia activa consumida por la carga, $p_{L3\phi}$.

En la Figura 6.12 se muestra la respuesta temporal de la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF trabajando en lazo cerrado ($p_{F3\phi}^*$) y de la variación de la energía almacenada en el bus de continua (Δw_{dc}) cuando aparece un escalón unitario en la potencia activa instantánea solicitada por la carga ($p_{L3\phi}$). En esta figura se puede apreciar como el error en la variación de energía del bus de continua prácticamente ha desaparecido al cabo de 150ms. Ante un escalón de potencia en la carga de amplitud ΔP_L , y utilizando el controlador proporcional, la expresión analítica que determina la evolución temporal de Δw_{dc} es:

$$\Delta w_{dc} = -\frac{\Delta P_L}{2} (kt^2 + 2t) e^{-kt}, \quad (6.39)$$

la cual presenta un valor mínimo de:

$$\Delta w_{dc(\min)} = -\frac{\Delta P_L}{k} (1 + \sqrt{2}) e^{-\sqrt{2}} \Big|_{t_{\min} = \frac{\sqrt{2}}{k}}. \quad (6.40)$$

A partir de esta expresión, y utilizando la ecuación (6.14), la cual relacionaba la variación de energía en el bus de continua con la tensión en el mismo y con el valor de los condensadores, es posible determinar el valor adecuado para dichos condensadores; estableciendo como condición de diseño que la tensión del bus no rebase un valor límite cuando aparezca un determinado escalón de potencia activa en la carga.

En la Figura 6.11, se observa como la componente de 100Hz de la potencia activa solicitada por la carga está desfasada 5.81° respecto a la componente de potencia de esa misma frecuencia que suministra el SAPF. Esto implica un defecto de compensación de esta componente de potencia por parte del SAPF. Si en una aplicación particular, el efecto de este error en la compensación de la potencia de la carga se considera aceptable, la expresión (6.37) podrá ser utilizada para el

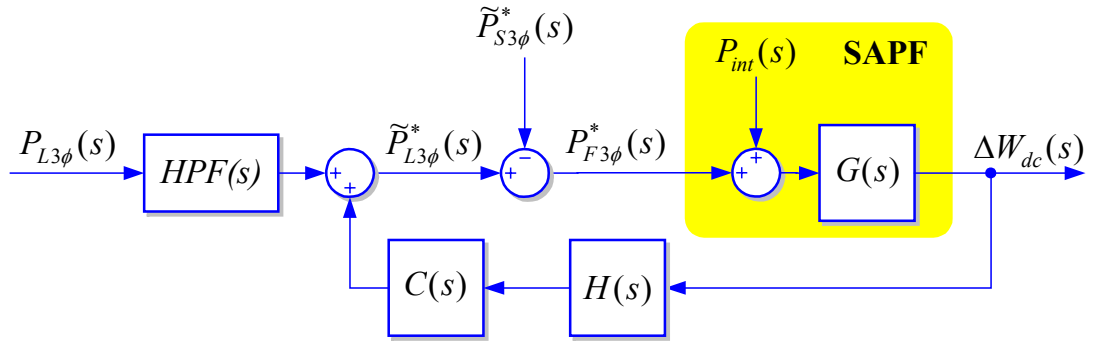


Figura 6.13. Controlador de la variación de energía en el bus de continua incluyendo el compensador de fase a 100Hz.

dimensionamiento de los condensadores del bus de continua. Sin embargo, si este error debiese ser eliminado, el sistema de control de la Figura 6.10 tendría que ser modificado mediante la adición de un nuevo bloque denominado $H(s)$, véase la Figura 6.13. Este bloque $H(s)$ debe eliminar el efecto del bucle de realimentación para frecuencias iguales o superiores a 100Hz.

La función de transferencia de $H(s)$ se muestra en (6.41), la cual corresponde a un filtro de corte de banda en cascada con otro pasa-bajas, siendo ambos filtros de segundo orden, y estando sintonizados a 100Hz.

$$H(s) = \frac{\omega_h^2 (s^2 + \omega_h^2)}{(s^2 + 2\xi_h \omega_h s + \omega_h^2)^2} \quad ; \quad \omega_h = 10 \cdot \omega_f = 2 \cdot \omega_s, \xi_h = 1 \quad (6.41)$$

Las funciones de transferencia características del controlador de la Figura 6.13 son:

$$\frac{P_{F3\phi}^*}{P_{L3\phi}}(s) = \frac{HPF(s)}{1 - G(s)C(s)H(s)} = \frac{s^2(s + 2\omega_f)}{\left(1 + \frac{k\omega_h^2(s^2 + \omega_h^2)}{s(s^2 + 2\xi_h\omega_h s + \omega_h^2)^2}\right)(s + \omega_f)^2}, \quad (6.42a)$$

$$\frac{\Delta W_{dc}}{P_{L3\phi}}(s) = \frac{HPF(s)G(s)}{1 - G(s)C(s)H(s)} = \frac{s(s + 2\omega_f)}{\left(1 + \frac{k\omega_h^2(s^2 + \omega_h^2)}{s(s^2 + 2\xi_h\omega_h s + \omega_h^2)^2}\right)(s + \omega_f)^2}. \quad (6.42b)$$

El diagrama de Bode de estas funciones de transferencia se muestra en la Figura 6.14.

Las funciones de transferencia de (6.42) hubiesen resultado más simples si el bloque $H(s)$ hubiese estado constituido únicamente por un filtro de corte de banda sintonizado a 100Hz, es decir intentando corregir el error de fase únicamente en frecuencias cercanas a estos 100Hz, sin embargo, como muestra la Figura 6.15, la corrección de fase resulta más efectiva con la configuración finalmente adoptada para el bloque $H(s)$, habiéndose elegido como condición de diseño que $\xi_h=1$.

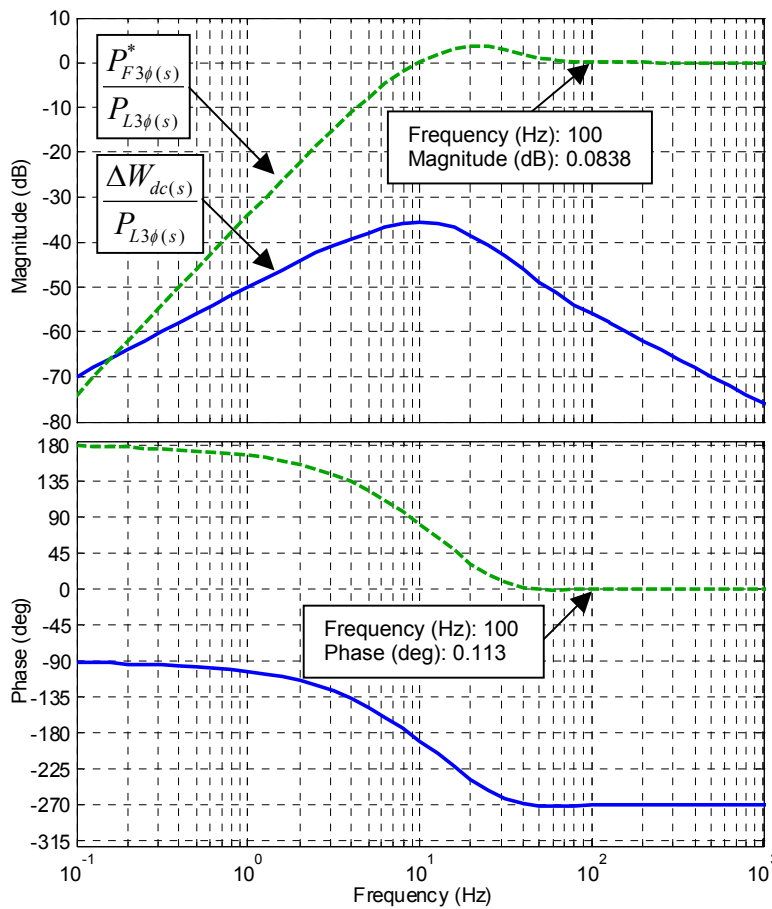


Figura 6.14. Diagramas de Bode de la función de transferencia de lazo cerrado de $p_{L3\phi}$ a $[p_{F3\phi}^*, \Delta W_{dc}]$ incluyendo el compensador de fase a 100Hz.

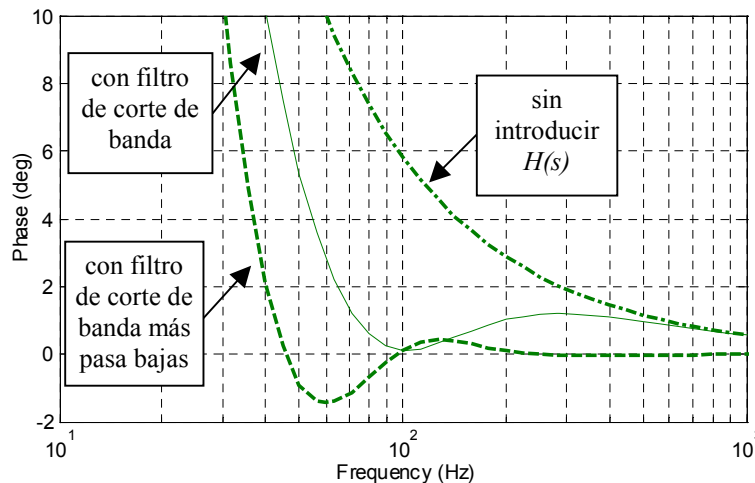


Figura 6.15. Detalle de la corrección de fase mediante $H(s)$.

Considerando que el filtro de corte de banda se encuentra colocado en el lazo de realimentación, y que $k=\omega_f=2\pi 10$ W/J, $\omega_h=2\pi 100$ rad/s y $\xi_f=\xi_h=1$, en la Figura 6.16 se muestra la respuesta temporal de la potencia activa instantánea desarrollada

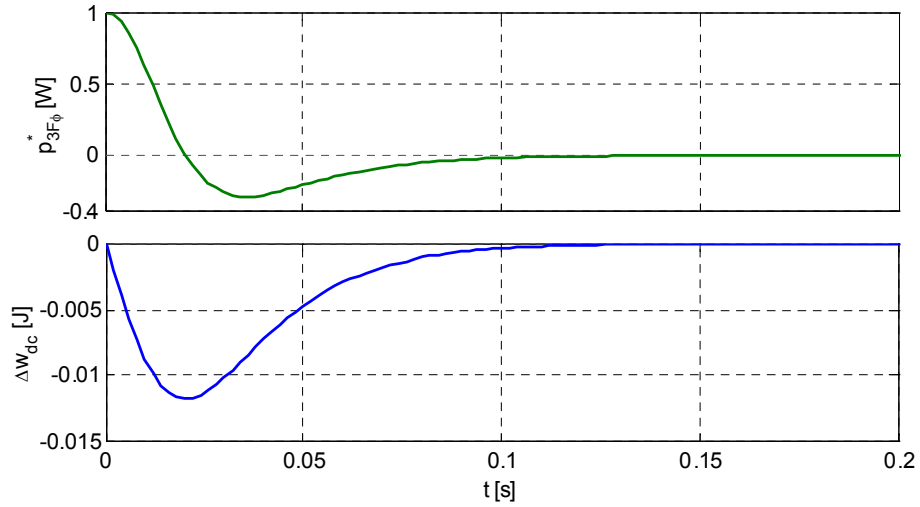


Figura 6.16. Respuesta temporal del sistema incluyendo $H(s)$ ante un escalón de potencia unitario en la potencia consumida por la carga, $p_{L3\phi}$.

por el SAPF ($p_{F3\phi}^*$), y de la variación de energía almacenada en el bus de continua (Δw_{dc}), cuando aparece un escalón unitario en la potencia activa instantánea solicitada por la carga ($p_{L3\phi}$).

El estudio analítico de la función de transferencia de (6.42b) permite obtener la expresión (6.43), referente al valor absoluto máximo de la variación de energía en el bus de continua cuando un determinado escalón de amplitud ΔP_L aparece en la potencia activa instantánea solicitada por la carga.

$$|\Delta w_{dc(max)}| = \frac{|\Delta P_L|}{k \left(1 - 2\xi_h \frac{\omega_f}{\omega_h} \right)} (1 + \sqrt{2}) e^{-\sqrt{2}} \quad (6.43)$$

A partir de (6.43), y utilizando la ecuación (6.14), que relacionaba la variación de energía en el bus de continua con la tensión en el mismo y con el valor de los condensadores, es posible obtener la expresión (6.44), la cual determina el valor adecuado para dichos condensadores, estableciéndose como condición de diseño, que la tensión del bus no rebase un valor límite ($v_{dc(lim)}$) cuando aparezca un determinado escalón en el valor medio de la potencia activa consumida por la carga (ΔP_L).

$$C \geq \frac{4 \cdot |\Delta w_{dc(max)}|}{|v_{dc(ref)}^2 - v_{dc(lim)}^2|} \quad (6.44)$$

En esta expresión, $v_{dc(lim)}$ representa el valor límite de tensión, superior o inferior a $v_{dc(ref)}$, que puede aparecer en el bus. Por consiguiente, la expresión (6.44) deberá ser evaluada dos veces, calculándose, por un lado, el valor del condensador necesario para que la tensión del bus no descienda de un valor límite mínimo cuando se conecta una nueva carga, y por otro, el valor de este condensador para que la tensión del bus no supere un valor límite máximo cuando dicha carga es desconectada.

Lógicamente, el valor seleccionado para el condensador será el mayor resultante de las dos evaluaciones anteriores.

En este punto, es preciso destacar que, en función de la magnitud estimada para las componentes oscilantes de la potencia activa instantánea solicitada por la carga, el valor final del condensador deberá incrementarse respecto al calculado anteriormente. Analizando (6.42b), y según indica la Figura 6.14, cuando el SAPF se encuentre compensando una oscilación en la potencia activa consumida por la carga ($\tilde{p}_{L3\phi}(f)$), cuya frecuencia f sea igual o superior a 100Hz, la amplitud de la oscilación en la variación de energía en el bus de continua ($\Delta\tilde{w}_{dc}(f)$) vendrá determinada por:

$$\Delta\tilde{w}_{dc}(f) = \frac{\tilde{p}_{L3\phi}(f)}{2\pi f}. \quad (6.45)$$

Para una frecuencia f concreta, la amplitud de la oscilación de energía mostrada en (6.45) debería ser añadida al valor máximo obtenido en (6.43). Cuando se estén compensando múltiples componentes oscilantes de la potencia de la carga, y considerando el peor de los casos, la amplitud resultante de la oscilación de energía en el bus de continua podría ser calculada mediante la suma aritmética de las amplitudes individuales originadas por cada componente oscilante de la potencia de carga. Sin embargo, para optimizar el cálculo del valor de la capacidad del bus de continua, sería necesario realizar un estudio detallado de las solicitaciones de potencia específicas de la carga, que permitiese determinar, con exactitud, el valor de pico de la oscilación de potencia resultante en el bus de continua. En cualquier caso, teniendo en cuenta que el valor de $|\Delta w_{dc(max)}|$ es calculado para unas condiciones específicas de diseño, y que la naturaleza de la carga es impredecible, será necesario diseñar un sistema de protección adecuado que asegure que la tensión del bus de continua siempre se encuentre dentro de unos márgenes de seguridad adecuados. Este sistema será descrito en el Apartado 6.6.

6.5.1. Mejora del controlador energético del SAPF

Hasta el momento, en el diseño del sistema de control de la energía del bus de continua, se han despreciado los efectos debidos a las pérdidas internas del convertidor y de las componentes oscilantes de la potencia activa instantánea de la fuente, es decir, se ha supuesto que $P_{int}(s) - \tilde{P}_{S3\phi}^*(s) = 0$.

Si ahora se tienen en cuenta estos términos adicionales de potencia, un análisis del diagrama de control mostrado en la Figura 6.13 conduce a la siguiente función de transferencia:

$$\Delta W_{dc}(s) = \frac{G(s)}{1 - G(s)C(s)H(s)} \left[HPF(s)P_{L3\phi}(s) + (P_{int}(s) - \tilde{P}_{S3\phi}^*(s)) \right]. \quad (6.46)$$

En (6.46), no todos los términos de potencia contribuyen de la misma manera sobre la variación de energía del bus de continua, por lo que el estudio realizado anteriormente, acerca del comportamiento dinámico de la variación de energía en el bus de continua, pierde exactitud cuando se consideran estos nuevos términos de potencia. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las pérdidas internas de potencia del SAPF normalmente no experimentan variaciones súbitas considerables, y que las oscilaciones de la potencia activa instantánea suministrada por la fuente tienen un valor medio nulo, salvo en eventuales situaciones transitorias, por lo que el error cometido en el diseño del bucle de control anterior no será excesivo.

Un correcto diseño del bucle de control del SAPF permitirá añadir nuevas funcionalidades a éste. Un ejemplo de estas funcionalidades puede consistir en hacer que el SAPF, además de acondicionar las corrientes de una determinada línea de distribución, actúe como un rectificador de factor de potencia unitario que alimenta una determinada carga conectada en su bus de continua, por ejemplo, un inversor que acciona a un motor o a un generador. En este tipo de aplicaciones particulares, aparecen nuevos términos de potencia debidos a la carga conectada en el bus de continua, los cuales, bajo el enfoque mantenido hasta el momento, pueden ser tratados como variaciones en las pérdidas de potencia del SAPF.

Para diseñar adecuadamente el bucle de control del SAPF, es interesante conseguir una función de transferencia única que relacione, de la misma manera, todos los términos de potencia con la variación de energía en el bus de continua del convertidor. Para conseguir esta función de transferencia única, es necesario añadir un segundo lazo de control al sistema de control de la Figura 6.13, véase la Figura 6.17. En esta figura, se ha definido una nueva variable, $P_{F(eff)}^*(s)$, que simboliza la potencia *efectiva* desarrollada por el SAPF, es decir, aquella que da lugar a una variación de energía en el bus de continua del mismo. También en esta figura, $D(s)$ es un derivador ($D(s)=s$), y la función $LPF(s)$ corresponde a la del filtro pasa-bajas mostrado en (6.32), manteniéndose $\omega_f = 2\pi 10$ rad/s y $\xi_f = 1$.

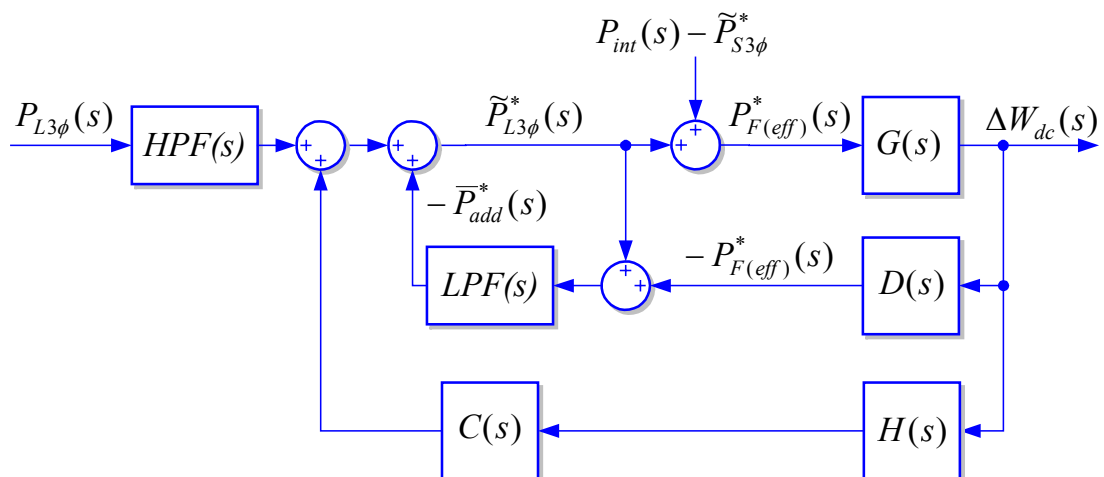


Figura 6.17. Controlador de la variación de energía en el bus de continua incluyendo un doble lazo de control.

En este nuevo lazo de control, a partir de la diferencia entre la potencia activa oscilante solicitada por la carga ($\tilde{p}_{L3\phi}^*$) y la potencia efectiva instantánea que afecta al bus de continua ($p_{F(eff)}^*$), y utilizando un filtro pasa-bajas, se obtiene el valor medio de los términos adicionales de potencia que han aparecido en el sistema (\bar{p}_{add}^*). Por tanto, la variable \bar{p}_{add}^* corresponde al valor medio de $p_{int} - \tilde{p}_{S3\phi}^*$. Este valor medio calculado se aportará, con signo negativo, como una referencia de potencia extra que debe ser solicitada por el SAPF para de mantener el nivel medio de energía en el bus de continua.

Teniendo en cuenta que el valor medio de $\tilde{p}_{S3\phi}^*$ es normalmente nulo, si las pérdidas de potencia interna del filtro fuesen también nulas, es decir, si $p_{int} = 0$, la salida del filtro pasa-bajas también sería nula, y el segundo lazo de realimentación no actuaría. Sin embargo, en el momento en que p_{int} adopte un valor finito, la salida del filtro pasa-bajas coincidirá con el valor medio de dicha potencia interna, cambiado de signo. Este valor negativo de salida se aportará al SAPF como referencia de potencia para compensar sus pérdidas internas. El mismo razonamiento se puede aplicar para el caso de que $\tilde{p}_{S3\phi}^*$ adopte eventualmente un valor medio finito.

Un análisis del diagrama de control mostrado en la Figura 6.17 permite obtener la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\Delta W_{dc}}{P_{L3\phi} + P_{int} - \tilde{P}_S^*}(s) = HPF(s) \frac{G(s)}{1 - G(s)C(s)H(s)}. \quad (6.47)$$

La expresión expandida de esta función de transferencia coincide con la mostrada en (6.42b), y denota que, ahora, la variación en el bus de continua queda totalmente controlada, siguiendo una evolución idéntica ante variaciones en cualquiera de las potencias que afectan al estado energético del SAPF. Lógicamente, la respuesta en frecuencia y temporal de esta función de transferencia coincidirá con la que se mostró en las Figuras 6.14 y 6.16.

Si se utiliza la estructura real de la etapa de detección del valor medio de la potencia activa instantánea solicitada por la carga, mostrada en la Figura 6.6, el diagrama de control de la Figura 6.17 puede ser transformado en el mostrado en la Figura 6.18.

Analizando el diagrama de control de la Figura 6.18 se llega a:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{L3\phi}^*(s) &= P_{L3\phi}(s)LPF(s) - \Delta W_{dc}(s)H(s)C(s) \\ &\quad - [\tilde{P}_{L3\phi}^*(s) + \Delta W_{dc}(s)D(s)]LPF(s); \end{aligned} \quad (6.48a)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{L3\phi}^*(s) &= P_{L3\phi}(s)LPF(s) - \Delta W_{dc}(s)[H(s)C(s) + D(s)LPF(s)] \\ &\quad - \tilde{P}_{L3\phi}^*(s)LPF(s); \end{aligned} \quad (6.48b)$$

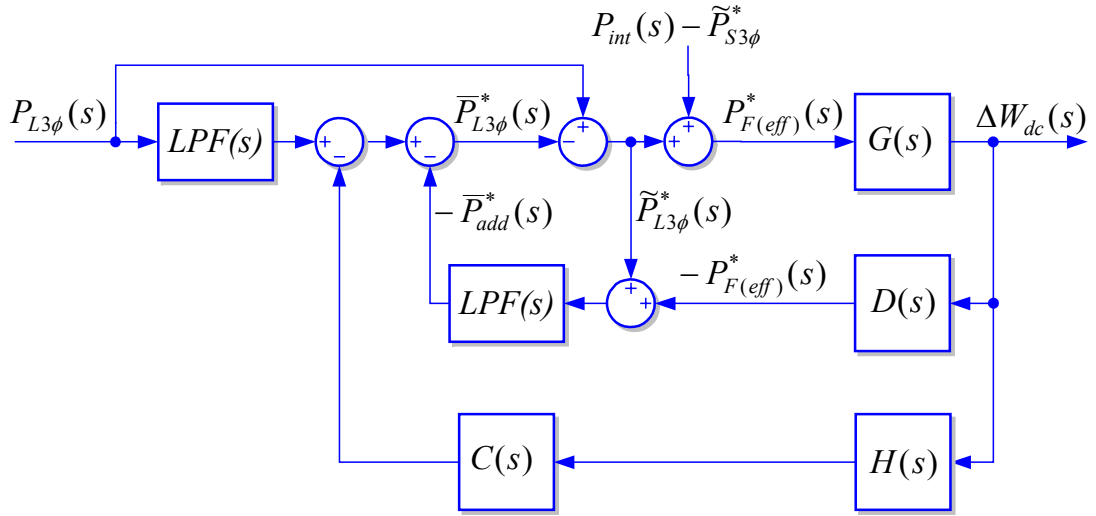


Figura 6.18. Estructura real del controlador de la variación de energía en el bus de continua incluyendo un doble lazo de control.

$$\begin{aligned} \bar{P}_{L3\phi}^*(s) &= P_{L3\phi}(s)LPF(s) - \Delta W_{dc}(s)[H(s)C(s) + D(s)LPF(s)] \\ &\quad - [P_{L3\phi}(s) - \bar{P}_{L3\phi}^*(s)]LPF(s); \end{aligned} \quad (6.48c)$$

$$\bar{P}_{L3\phi}^*(s)[1 - LPF(s)] = -\Delta W_{dc}(s)[H(s)C(s) + D(s)LPF(s)]; \quad (6.48d)$$

$$\bar{P}_{L3\phi}^*(s) = -\frac{H(s)C(s) + D(s)LPF(s)}{1 - LPF(s)} \Delta W_{dc}(s). \quad (6.48e)$$

Teniendo en cuenta que la función $LPF(s)$ responde a la del filtro pasa bajas mostrado en (6.32), y definiendo las siguientes funciones:

$$F_1(s) = \frac{1}{1 - LPF(s)} = 1 + \frac{\omega_f^2}{s(s + 2\omega_f)}, \quad (6.49a)$$

$$F_2(s) = D(s) \frac{LPF(s)}{1 - LPF(s)} = \frac{\omega_f^2}{s + 2\omega_f}, \quad (6.49b)$$

se llega a la expresión final mostrada en (6.50), la cual determina el valor medio de la potencia activa instantánea consumida por el conjunto constituido por la carga más el propio SAPF ($\bar{p}_{L3\phi}^*$), cuando el bucle de control está forzando que el valor medio de la energía almacenada en el bus de continua sea constante. Lógicamente, este valor medio de potencia activa instantánea coincidirá con aquel que debería ser suministrado desde el lado de fuente ($\bar{p}_{S3\phi}^*$).

$$\bar{P}_{L3\phi}^*(s) = \bar{P}_{S3\phi}^*(s) = -[H(s)C(s)F_1(s) + F_2(s)] \Delta W_{dc}(s) \quad (6.50)$$

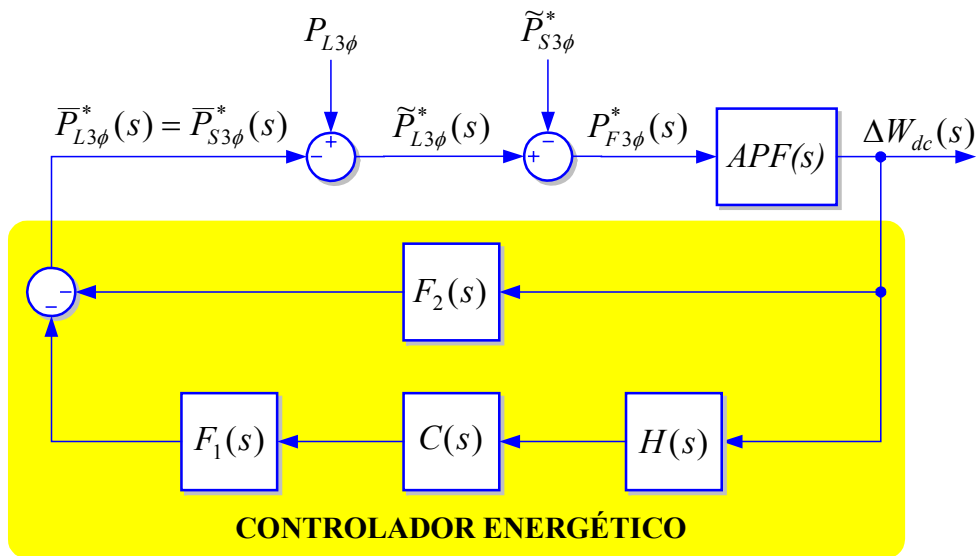


Figura 6.19. Estructura final del controlador energético del SAPF.

Sobre la base de (6.50), en la Figura 6.19 se representa la estructura final del controlador energético del SAPF.

La Figura 6.20 muestra la implementación práctica del controlador energético del SAPF. En esta figura se aprecia como, a partir de la lectura de la tensión absoluta del bus de continua, y haciendo uso de la expresión (6.14), se calcula la variación de energía en el mismo (Δw_{dc}). Esta variable constituye la entrada del controlador energético del SAPF, y su salida corresponde con el valor medio de la potencia activa instantánea que debería ser suministrada desde el lado de fuente ($\bar{p}_{S3\phi}^*$). Esta variable de potencia se suministra como entrada al bloque de conversión de potencia a corriente [$P \rightarrow I^{+1}$], el cual responde a la expresión (6.24c). En este bloque, la otra

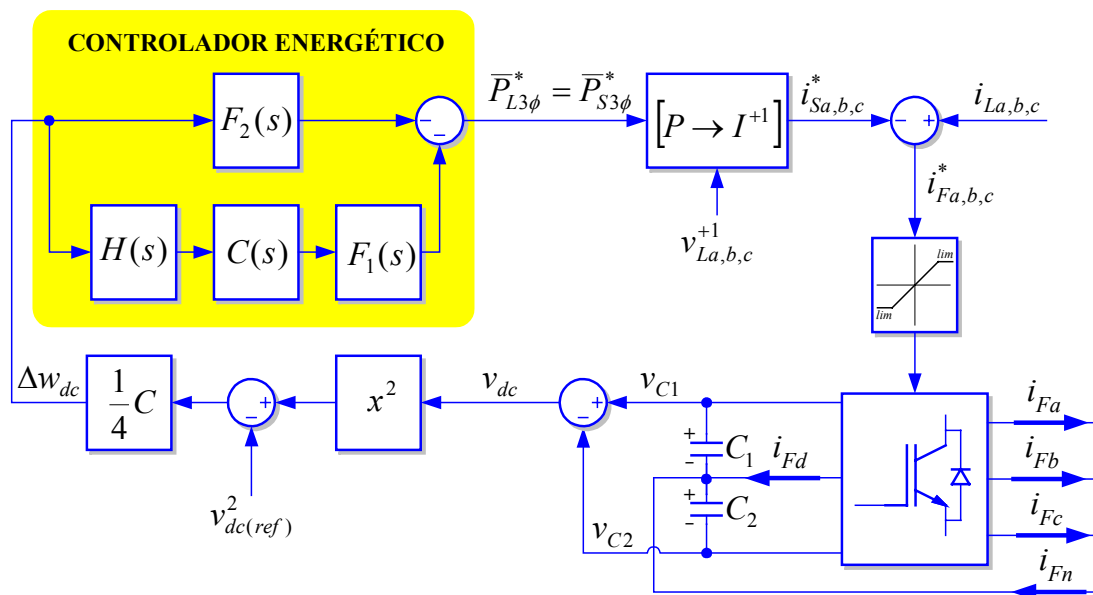


Figura 6.20. Implementación del controlador energético del SAPF.

variable utilizada en la transformación, es decir, la tensión sinusoidal de frecuencia fundamental y secuencia positiva ($v_{La,b,c}^{+1}$), proviene de la salida del DSRF-PLL, véase el Capítulo 3. Una vez que las corrientes que deberían circular en el lado de fuente son conocidas ($i_{Sa,b,c}^*$), basta con restarlas de la corriente instantánea que circula por la carga ($i_{La,b,c}$) para determinar las corrientes de referencia que deben ser aportadas al SAPF ($i_{Fa,b,c}^*$). Estas corrientes de referencia pasan a través del bloque limitador para proteger el inversor del SAPF. En la Figura 6.20 se supone que el bloque que representa el inversor FLSC lleva implementado en su interior el controlador de la corriente inyectada por cada una de las cuatro ramas, así como el posible controlador de la tensión diferencial del bus de continua. Lógicamente, si se utilizase un inversor en puente completo, este último controlador no sería necesario.

Para evaluar el comportamiento del controlador energético del SAPF, se simulará el sistema bajo unas condiciones desfavorables de carga y de red. En el lado de carga se supondrá la existencia de un cargador de baterías conectado entre la fase *b* y el conductor de neutro. Este cargador utiliza un rectificador monofásico no controlado y un filtro inductivo en el lado de continua. La conexión del cargador se realiza en el instante $t=5\text{ms}$, y es desconectado en el paso por cero de corriente inmediatamente siguiente al instante $t=0,6\text{s}$. Para la simulación de esta carga, se ha ajustado un valor de tensión en la batería que, en régimen permanente, da lugar a un consumo medio de potencia activa de $1,5\text{kW}$ cuando la tensión de red presenta su valor nominal. Así mismo, se ha considerado que en el instante inicial de comienzo de simulación, el detector de tensión de secuencia positiva, DSRF-PLL, se encuentra perfectamente sintonizado, con lo que el valor real de la tensión sinusoidal de frecuencia fundamental y secuencia positiva en la red se encuentra disponible desde el instante $t=0\text{s}$. Esta carga absorberá unas corrientes distorsionadas y desequilibradas, las cuales darán lugar a unas oscilaciones de potencia con una frecuencia mínima de 100Hz . Esto permitirá evaluar la bondad del SAPF a la hora de compensar las componentes oscilantes de baja frecuencia en la potencia consumida por la carga.

En el lado de fuente, se ha supuesto la existencia de una falla que genera un hueco de tensión de tipo D con un voltaje característico $V_c=0,6$ [p.u.], habiéndose utilizado como voltaje de referencia el valor nominal de la tensión de fase en la red [6.13]. El hueco de tensión dura desde $t=0,2\text{s}$ hasta $t=0,4\text{s}$, y da lugar a que la componente de tensión de secuencia positiva decrezca hasta un 80% de su valor nominal. En este caso particular, la fase *a* es la que presenta un valor más bajo de tensión. La tensión que presenta la fase *b* es lo suficientemente alta como para conseguir que el rectificador de la carga siga conduciendo durante la existencia del hueco de tensión. Esto permitirá evaluar la bondad del controlador propuesto cuando aparecen oscilaciones de potencia tanto en el lado de fuente como en el lado de carga.

Los parámetros característicos del controlador coinciden con los utilizados anteriormente, es decir, $k=\omega_f=2\pi 10$ W/J, $\omega_h=2\pi 100$ rad/s y $\xi_f=\xi_h=1$. Así mismo, se ha considerado que el valor de los condensadores del bus de continua es $C_1=C_2=2000\mu\text{F}$, y que la tensión absoluta de referencia del bus de continua es $v_{dc(ref)}=700\text{V}$.

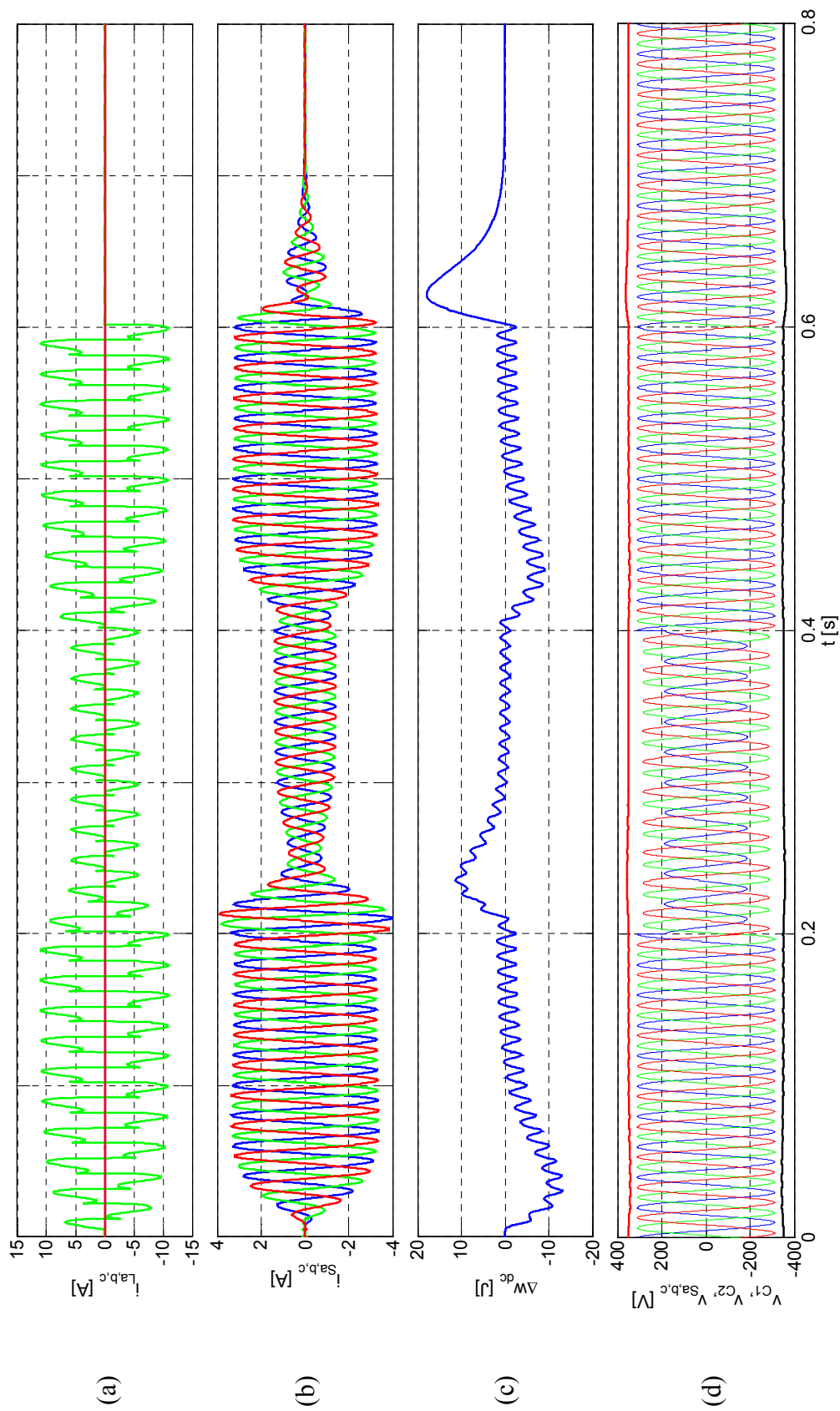


Figura 6.21. Corrientes, variación de energía y tensiones con carga distorsionada y desequilibrada, y red desequilibrada.

En la Figura 6.21 se muestra la evolución de las tensiones y corrientes, y la variación de energía en el sistema bajo las condiciones de simulación descritas anteriormente. Así mismo, en la Figura 6.22, se muestra la evolución de la potencia activa instantánea e imaginaria instantánea, en el lado de fuente y de carga, ante las mismas condiciones. En esta figura, y en las que aparecerán más adelante, las potencias instantáneas se calculan mediante la formulación propuesta en el dominio $d-q-z$, véase (2.141), y concretamente, la potencia imaginaria instantánea se calcula según lo indicado en (2.161).

En el instante $t=5\text{ms}$ es conectada la carga. Como se comentó anteriormente, esta carga consume una potencia activa de $1,5\text{kW}$. Aplicando la expresión (6.43), el valor absoluto de la máxima variación de energía en el bus de continua debida a la aparición de esta carga tendría que valer $|\Delta W_{dc(max)}| = 17,52\text{ J}$. Sin embargo, observando la Figura 6.21c, se aprecia como, en el primer valle de la variación de energía en el bus de continua, el valor absoluto máximo se encuentra muy por debajo del valor calculado teóricamente. Esto se debe a que, en el desarrollo teórico que se siguió para la obtención de la expresión (6.43), se supuso que la evolución de la potencia activa instantánea consumida por la carga respondía a una función escalón perfecta, ya que dicho escalón de potencia era el que daba lugar a la situación más desfavorable, es decir, al valor más alto de $|\Delta W_{dc(max)}|$. Si se observa la Figura 6.22a, se aprecia claramente que el crecimiento que experimenta el valor medio de la potencia activa instantánea consumida por la carga simulada responde a una evolución exponencial, no un escalón, y de ahí las diferencias existentes respecto al cálculo teórico. Esta evolución exponencial es consecuencia del periodo transitorio de carga de la inductancia de filtrado del lado de continua del cargador de baterías.

En el instante $t=0,2\text{s}$ aparece el hueco de tensión en la red. Esta disminución en el valor de la tensión de la fase b hace que disminuya la potencia absorbida por la carga. En esta simulación, el nivel de tensión que aparece en la fase b durante la falla hace que el valor medio de la potencia activa instantánea consumida por la carga, en régimen permanente, se encuentre en torno a los $0,5\text{kW}$. Nuevamente, la evolución del valor medio de la potencia activa instantánea consumida por la carga hasta llegar a estos $0,5\text{kW}$ debería responder a una función exponencial, aunque en este caso, dicha evolución se ve truncada a consecuencia de que el rectificador de la carga entra en modo de conducción discontinua. Por tanto, el valor de régimen estable en dicha potencia se alcanza después de un periodo transitorio con una duración menor al calculado teóricamente bajo el supuesto de un comportamiento lineal de la carga. Se puede afirmar entonces, que la carga experimenta una variación en la potencia activa consumida de aproximadamente -1kW , siguiendo una evolución transitoria que, con relación a la evolución seguida en el caso de la conexión anterior, se aproxima más a la función escalón. Aplicando la expresión (6.43), el valor teórico para la máxima variación de energía en el bus durante esta evolución transitoria debería ser de $11,6\text{ J}$, el cual, como muestra la Figura 6.21c, se aproxima más al realmente alcanzado en la simulación.

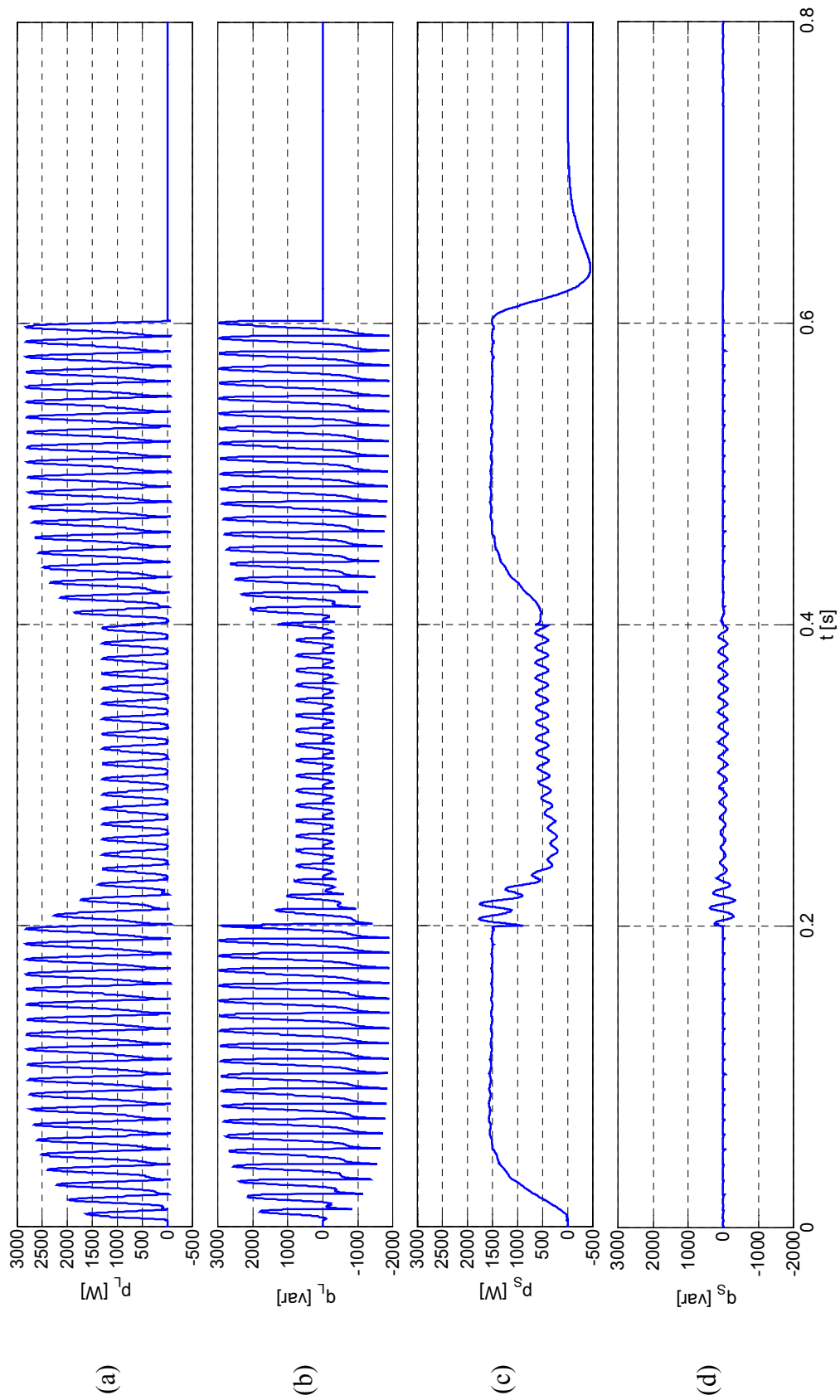


Figura 6.22. Potencias en el lado de fuente y de carga con carga distorsionada y desequilibrada, y red desequilibrada.

La aparición del hueco de tensión da lugar a la existencia de otro fenómeno transitorio de interés. En este sistema de control, la similitud que exista entre respuesta dinámica real, respecto a la calculada anteriormente de forma teórica, depende de la precisión con que el valor medio de la potencia activa instantánea suministrada por la fuente, $\bar{p}_{S3\phi}$, siga al valor de consigna aportado como referencia, $\bar{p}_{S3\phi}^*$. Lógicamente, esta precisión depende de la exactitud con que la componente de frecuencia fundamental y secuencia positiva de las tensiones de red esté siendo detectada. Por este motivo la velocidad en la respuesta del detector de tensión de secuencia positiva, DSRF-PLL, es una cuestión crucial. En esta simulación, los valores asignados a los parámetros de este detector dan lugar a que el nuevo valor de tensión de secuencia positiva sea detectado después de un periodo transitorio de duración inferior a un ciclo de la tensión de red. En este corto periodo de tiempo, y debido a las características particulares de la carga considerada, la variación en el nivel medio de la energía almacenada en el bus de continua ha sido pequeña, y consecuentemente, el controlador energético establecerá que el valor medio de la potencia activa instantánea que debe ser suministrada desde el lado de fuente, aunque inferior, sea muy similar al que existía antes de la aparición del hueco de tensión. Por tanto, y de manera momentánea, para suministrar este valor de potencia activa cuando la componente de tensión de secuencia positiva ha decrecido hasta el 80% de su valor nominal, es necesario que las corrientes del lado de fuente experimenten un sobrepico transitorio de aproximadamente el 120% del valor que tenían antes de la aparición del hueco. Este razonamiento, justifica con exactitud el valor del sobrepico que aparece en las corrientes de fuente de la Figura 6.21b justo después de la aparición del hueco de tensión. La extrapolación de las conclusiones obtenidas mediante este razonamiento justifica la inserción del bloque de limitación de las corrientes de referencia del inversor, el cual sería imprescindible, por ejemplo, ante la aparición de un cortocircuito trifásico en el punto de acoplo común entre el SAPF y la red.

Durante la existencia del hueco de tensión, las tensiones de red se encuentran desequilibradas, y por tanto, la interacción de las tensiones de fuente de secuencia negativa con las corrientes de fuente de secuencia positiva, ambas de frecuencia fundamental, dan lugar a la aparición de oscilaciones de 100Hz de frecuencia en las potencias activa e imaginaria instantáneas desarrolladas por la fuente. Estas oscilaciones quedan perfectamente reflejadas en las Figuras 6.22c y 6.22d. En este intervalo, como indicaba (6.30), las oscilaciones en la energía almacenada en el bus de continua resultan de integrar la potencia que se obtiene de la diferencia entre las oscilaciones de potencia en el lado de carga y de fuente. La variación en la amplitud de la oscilación en la energía almacenada en el bus de continua queda perfectamente reflejada en la Figura 6.21c.

Tras la extinción del hueco de tensión, la carga experimenta nuevamente un pseudo-escalón en la potencia activa consumida, en este caso de 1kW. El comportamiento del sistema en este caso será relativamente similar al experimentado en la conexión inicial de la carga, es decir, con un crecimiento exponencial en el valor medio de la corriente solicitada por el cargador de baterías.

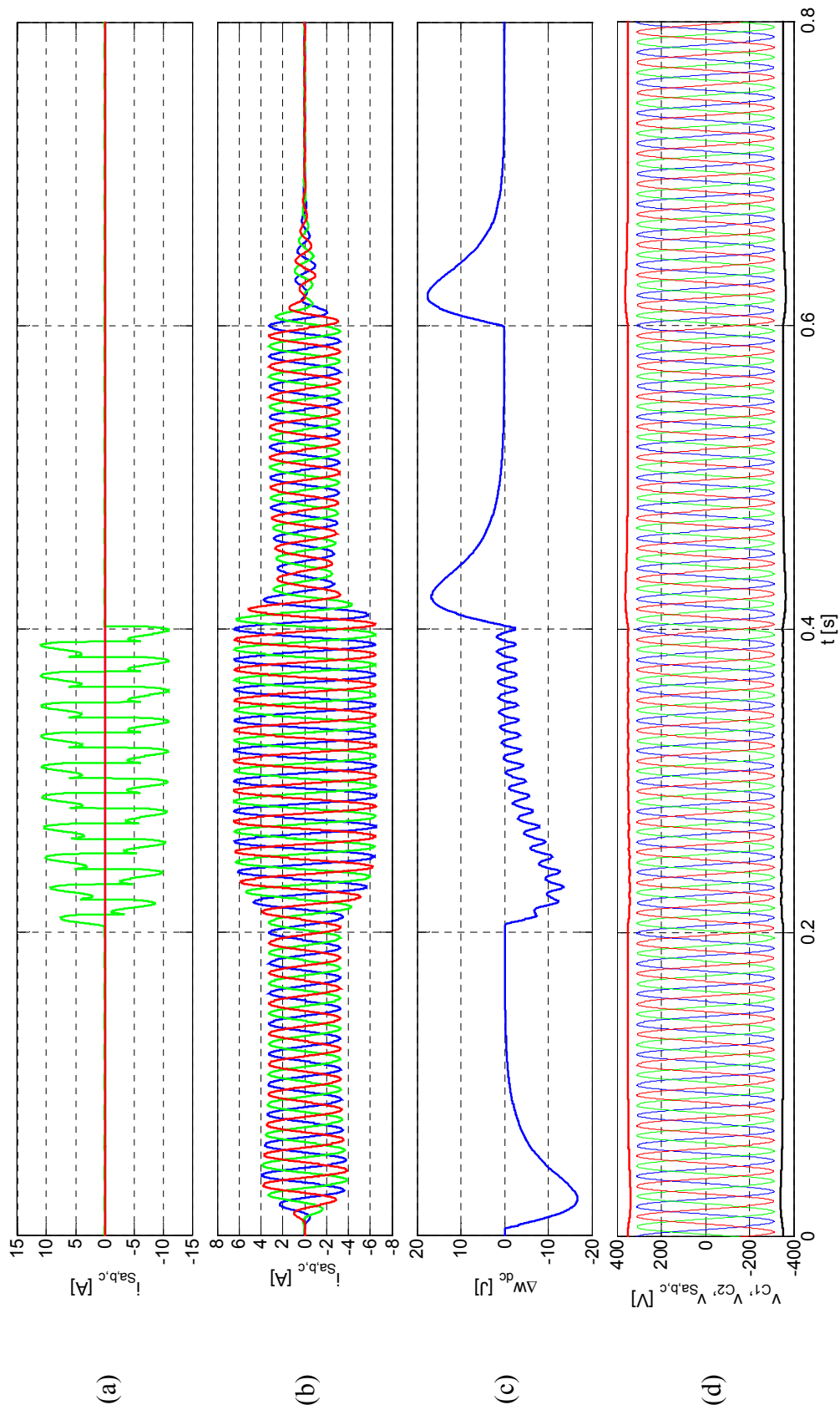


Figura 6.23. Corrientes, variación de energía y tensiones con cargas conectadas a la red y al bus de continua.

En $t=0,6s$, el interruptor de la carga recibe orden de apertura. Debido a las características de este interruptor, la apertura real se producirá en el siguiente paso por cero de la corriente de la fase b . En ese instante, la carga experimenta una variación de potencia que se asemeja bastante a una función escalón. La amplitud de este escalón negativo de potencia es de $-1,5kW$, por este motivo, la amplitud de la última cresta en la variación de energía del bus de continua alcanza un valor que se asemeja bastante al calculado teóricamente mediante (6.43).

Según mostraba (6.47), el controlador propuesto permite tener un control total del estado energético del bus de continua frente a variaciones en cualquiera de los términos de potencia que afectan al SAPF. Por este motivo, y sin necesidad de realizar ninguna modificación en el control, se extenderá la funcionalidad inicial del sistema hacia la rectificación de factor de potencia unitario con capacidad de filtrado activo de las corrientes consumidas por cargas adicionales.

Para evaluar el comportamiento del sistema en este caso se simula un escenario en el que, en el instante $t=5ms$, una carga resistiva de $326,6\Omega$ es conectada en paralelo con el bus de continua. Esta carga supone un consumo de potencia de $1,5kW$ cuando la tensión del bus de continua se encuentra en su valor de referencia, es decir, $700V$. Más adelante, en $t=0,2s$, se conecta a la red el cargador de baterías utilizado anteriormente. En $t=0,4s$, el cargador de baterías es desconectado de la red. Por último, en $t=0,6s$, la carga resistiva del bus de continua es también desconectada. Es preciso destacar que, en lugar de la carga resistiva, se podría haber implementado una estructura *back-to-back*, por ejemplo, mediante un inversor en fuente de tensión que alimentase un motor de inducción trifásico. Teniendo en cuenta que las componentes armónicas de corriente debidas a la conmutación del inversor prácticamente no modificarían el estado energético del bus de continua, los resultados obtenidos en ambos casos habrían sido prácticamente idénticos.

En la Figura 6.23 se muestra la evolución de las corrientes y tensiones, y la variación de energía bajo las condiciones descritas anteriormente. En la Figura 6.24 se muestra la evolución de las potencias instantáneas del lado de fuente y de carga.

En la situación simulada, la conexión y desconexión de la carga resistiva origina la aparición de escalones en la potencia interna consumida por el SAPF. Estos escalones de potencia no son completamente ideales, debido a la pequeña variación que experimenta la tensión absoluta del bus de continua. Sin embargo, el valor absoluto máximo de la variación de energía en el bus de continua que se produce a consecuencia de dicha conexión y desconexión, coincide, de manera muy aproximada, con el que se obtiene teóricamente mediante la expresión (6.43).

Ante la conexión y desconexión del cargador de baterías, la evolución seguida por las variables del sistema es exactamente la misma que en la simulación anterior, por lo que no se requieren comentarios adicionales.

6. Control de la energía en el bus de continua

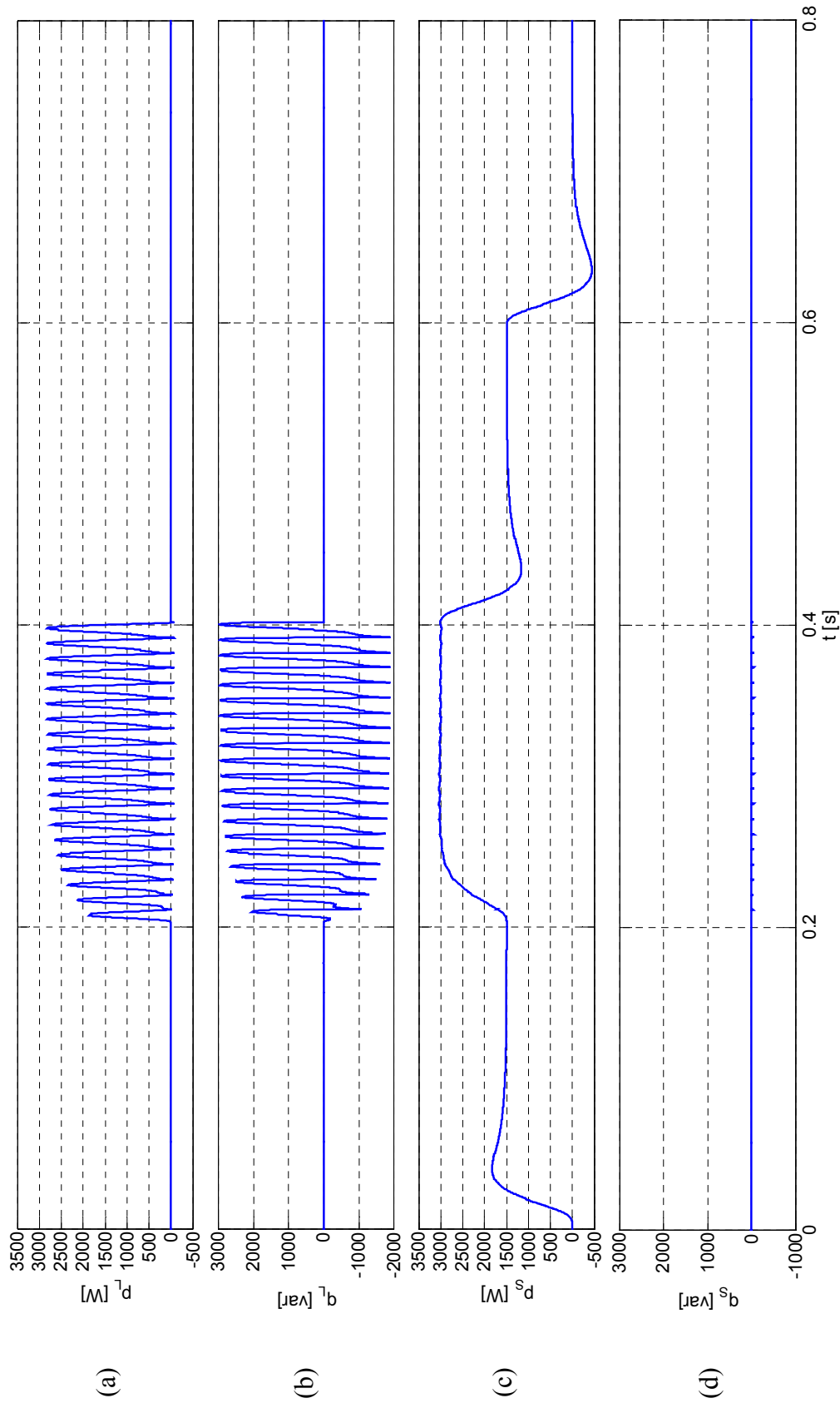


Figura 6.24. Potencias en el lado de fuente y de carga con cargas conectadas a la red y al bus de continua.

6.6. Control de la máxima variación de energía en el bus DC

En el Apartado anterior, se expuso la estructura necesaria para controlar el SAPF a partir de la variación que experimenta el valor medio de la energía almacenada en el bus de continua. Para sintonizar este bucle de control, se tuvo en cuenta la frecuencia mínima de las oscilaciones en la potencia activa instantánea consumida por la carga, estableciéndose unos parámetros de control que garantizaban que todas aquellas oscilaciones de la potencia activa de la carga, con frecuencia igual o superior a dos veces la frecuencia fundamental de la red, serían perfectamente compensadas por parte del SAPF. Estos parámetros de sintonización implicaban que, ante un determinado escalón en la potencia activa instantánea consumida por la carga, el valor absoluto de la variación de energía del bus de continua alcanzaba un valor máximo que era determinado mediante (6.43). Teniendo en cuenta este valor máximo de variación de energía, los condensadores del bus de continua deberían dimensionarse según especificado en (6.44), asegurando de esta forma que la tensión del bus de continua, mínima o máxima, no rebasaba unos valores límite establecidos como referencia. Según esto, los condensadores del bus de continua se dimensionan para que el inversor del SAPF soporte un escalón en la potencia activa consumida por la carga, cuya amplitud se establece como una condición de diseño. Sin embargo, la característica de la carga es impredecible, pudiendo aparecer en la misma escalones de potencia activa de amplitud superior a aquella que se consideró en el dimensionamiento del sistema, lo cual implicaría un rebasamiento de los valores límites, mínimo o máximo, de tensión en el bus de continua, y consiguiente el SAPF perdería su funcionalidad e incluso podría llegar a destruirse.

Según lo expuesto, para aquella situación en que la carga experimente un escalón de potencia activa superior al considerado en el dimensionamiento de los condensadores del bus de continua del SAPF, se hace necesario el diseño de un sistema adicional que asegure que la variación de energía, positiva o negativa, en el dicho bus no supere unos valores límite establecidos como referencia. El principio de funcionamiento de este sistema de seguridad adicional consiste en el aumento de la ganancia del controlador energético del SAPF cuando la variación de energía en el bus de continua rebasa los valores límite de referencia. Cuando este sistema limitador entre en funcionamiento, la misión principal del control del SAPF no será compensar perfectamente las oscilaciones de la potencia activa instantánea consumida por la carga, sino que en ese caso, la prioridad será conseguir el restablecimiento energético del bus de continua. En estas últimas condiciones, el bloque $H(s)$ pierde su razón de ser, ya que dicho bloque fue incluido en el lazo de control para corregir el desfase que se producía en la compensación de las componentes oscilantes de la potencia de carga con frecuencias en torno a los 100Hz, y ahora, esta perfección en la compensación de potencia carece de importancia.

Si se considera que el bloque $H(s)$ es eliminado del lazo de control, las funciones de transferencia características del mismo coincidirán con las mostradas en (6.38), cuyo diagrama de Bode se mostró en la Figura 6.11. Según (6.38), el sistema será estable para cualquier valor de ganancia del controlador proporcional (k). Lógicamente en

esta última afirmación se está obviando el efecto del periodo de muestreo, ya que se considera que por muy grande que fuese el valor de ganancia seleccionado, la constante de tiempo resultante para el sistema siempre sería muy superior a dicho periodo de muestreo. El aumento de la ganancia k implicará una mayor velocidad de respuesta en la cancelación de la variación de energía en el bus de continua, lo que irá asociado a una disminución en la banda pasante de la función de transferencia que relaciona la potencia activa instantánea desarrollada por el filtro con la potencia activa instantánea consumida por la carga. Es decir, un aumento de la ganancia del controlador proporcional mejora el control de la energía del bus de continua, pero empeora la característica de filtrado del SAPF, ya que existirán componentes oscilantes de la potencia activa instantánea consumida por la carga que no serán adecuadamente compensadas.

La expresión del valor límite de la variación de energía en el bus de continua es:

$$\Delta W_{dc(lim)} = \frac{1}{4} C |v_{dc(ref)}^2 - v_{dc(lim)}^2|, \quad (6.51)$$

donde $v_{dc(lim)}$ representa el valor límite de tensión, superior o inferior a $v_{dc(ref)}$, que puede ser aceptado en el bus de continua, y que una vez alcanzado dará lugar al disparo del sistema de limitación de la máxima variación de energía. Lógicamente podrían existir dos valores límite de variación de energía, uno relacionado con la mínima tensión aceptable en el bus, y otro relacionado con la máxima. En ese caso, deberían existir dos disparadores, uno para cada valor de variación de energía, que deberían habilitar el mecanismo de seguridad. En el desarrollo de este trabajo se ha elegido un único valor límite de variación de energía, el correspondiente a la tensión mínima admisible en el bus de continua, por lo que la tensión máxima alcanzable en dicho bus será:

$$v_{dc(lim-max)} = \sqrt{2v_{dc(ref)}^2 - v_{dc(lim-min)}^2}. \quad (6.52)$$

Si la variación de energía en el bus de continua alcanza su valor límite, el lazo de control debería modificar su ganancia ($k=k_c$) para conseguir que dicho valor límite no sea rebasado y conseguir el restablecimiento energético del bus. Una vez que el nivel energético del bus haya sido restablecido, la ganancia del lazo de control recuperará su valor original ($k=k_f$) con el objetivo de priorizar nuevamente la funcionalidad de filtrado activo en el sistema.

El esquema inicial de este sistema de control de la variación máxima de energía en el bus de continua se muestra en la Figura 6.25. En esta figura, el bloque $C_1(s)$ representa el controlador proporcional original con ganancia $k_f = \omega_f = 2\pi 10$ W/J, mientras que el bloque $C_2(s)$ representa el controlador proporcional con ganancia k_c , el cual entrará en acción cuando el valor límite de variación de energía en el bus sea alcanzado. Como se justificará más adelante, el valor de la ganancia k_c es función de la amplitud del escalón de potencia activa experimentado por la carga. En este sentido, se puede elegir un valor de k_c que sea capaz de restaurar adecuadamente el estado energético del bus de continua frente a un escalón de la máxima amplitud previsible en la potencia activa consumida por la carga. La elección de este elevado valor de ganancia implicará que, en el momento en que el sistema de seguridad entre

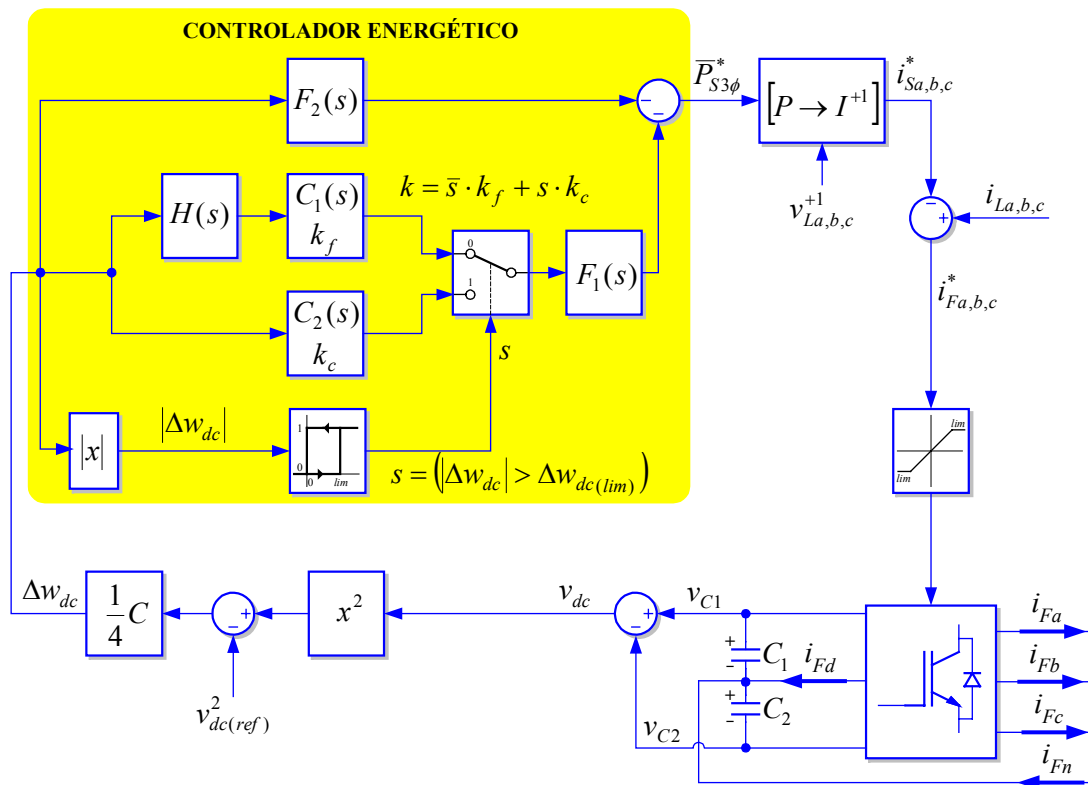


Figura 6.25. Controlador de la máxima variación de energía en el bus DC.

en funcionamiento, el valor de la corriente inyectada por el SAPF será también elevado. Esto puede dar lugar a aparezcan picos de corriente indeseables en la red cuando se alcance el valor límite de variación de energía en el bus de continua como consecuencia de un escalón de potencia en la carga cuya amplitud sea inferior a aquella considerada como la máxima amplitud previsible.

Para ilustrar esta situación se considerará un caso particular en el que el valor elegido para los condensadores del bus de continua es $C_1=C_2=2000\mu\text{F}$ y la tensión absoluta de referencia del bus de continua es $v_{dc(ref)}=700\text{V}$. Si el valor de pico de la tensión nominal de fase de la red es 311V , se puede considerar admisible que el valor límite mínimo de tensión absoluta en el bus de continua sea $v_{dc(lim-min)}=670\text{V}$, por lo que, según (6.52), el valor límite máximo de tensión absoluta en el bus será $v_{dc(lim-max)}=728\text{V}$. De acuerdo con estos valores límite de tensión, y utilizando (6.51), el valor límite de la variación de energía en el bus de continua será $\Delta w_{dc(lim)}=20\text{J}$. Por tanto, en circunstancias normales de funcionamiento, donde la ganancia del lazo de control es $k=k_f=\omega=2\pi 10\text{ W/J}$, la expresión (6.43) permite obtener el valor absoluto del máximo escalón de potencia admisible en la carga para que la variación de energía en el bus no alcance su valor límite. Para los valores considerados, este valor absoluto de potencia es $|\Delta P_L|=1,7\text{kW}$. Según esto, cualquier escalón de potencia activa en carga con amplitud superior a la anteriormente indicada implicaría una variación de energía en el bus de continua superior a la establecida como límite, y

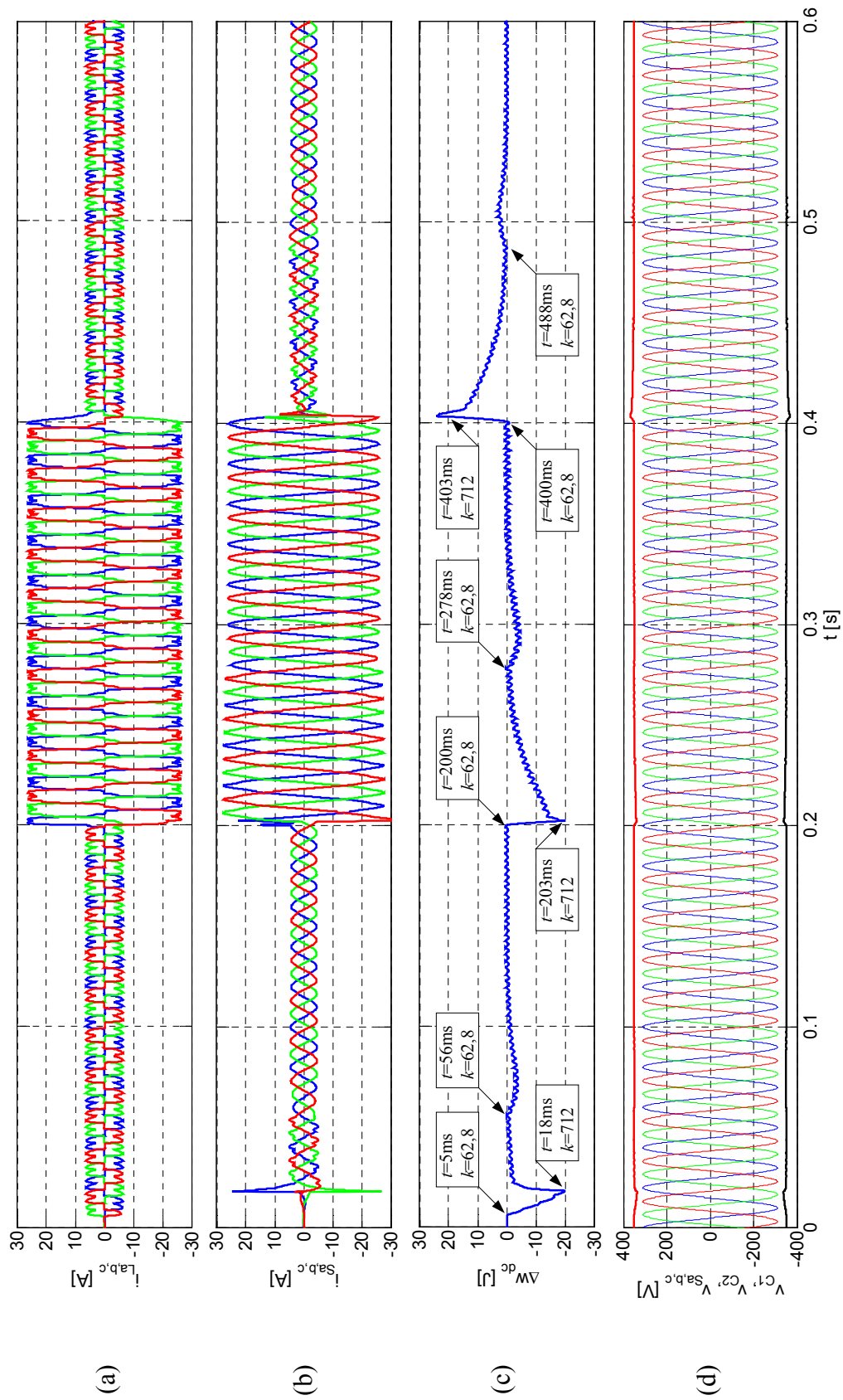


Figura 6.26. Corrientes, variación de energía y tensiones cuando la ganancia correctora del lazo de control es constante.

consiguientemente, se debería disparar el mecanismo de seguridad que modifica la ganancia del lazo de control. En el caso particular considerado, la nueva ganancia elegida para el lazo de control vale $k=k_c=11,3 \cdot \omega_f=712$ W/J. Con esta nueva ganancia k_c , el sistema de control puede restaurar el estado energético del bus, desde su valor límite, siempre que la amplitud del escalón de potencia experimentado por la carga presente una amplitud máxima de 15kW. Más adelante, quedará perfectamente justificada la elección de este valor para la ganancia k_c .

Para evaluar el comportamiento del sistema, en $t=5$ ms se conecta una carga que consume una potencia activa de 2kW. La amplitud de este escalón de potencia en carga es superior al máximo admisible cuando el lazo de control mantiene su ganancia original ($k=k_f$). Posteriormente, en $t=0,2$ s, se conecta otra carga que consume una potencia activa de 10kW. Por último, en $t=0,4$ s, esta última carga se desconecta. La Figura 6.26 muestra la evolución de las principales variables características del sistema cuando se aplica un valor constante de ganancia correctora k_c , que en este caso ha sido fijada en $k_c=712$ W/J.

Después de la conexión de la primera carga, el bus alcanza su valor límite de variación de energía en $t=18$ ms. En ese instante, actúa el conmutador de la estructura del control y se aplica la ganancia de corrección, $k=k_c=712$ W/J. Teniendo en cuenta que este valor de ganancia es el idóneo para que la variación de energía en el bus evolucione adecuadamente hacia su recuperación cuando el escalón de potencia en la carga hubiese sido de 15kW, y considerando que el escalón real experimentado por dicha carga ha sido de tan sólo 2kW, la respuesta natural del lazo de control ante esta discrepancia dará lugar a la aparición un elevado sobrepico inicial en la corriente solicitada por el SAPF. Este sobrepico se ve reflejado en las corrientes de fuente con una amplitud de aproximadamente 25A. Tras este pico de corriente, el sistema evoluciona hacia la recuperación total del bus de continua, hasta que en el instante $t=56$ ms, la variación de energía en el bus de continua vuelve a ser nula. Durante este periodo de tiempo, como se aprecia en la Figura 6.26b, las corrientes de carga son incorrectamente compensadas. Este error de compensación se debe a que el ancho de banda de la función de transferencia que relaciona la potencia activa instantánea desarrollada por el filtro con la potencia activa instantánea consumida por la carga ha disminuido aproximadamente en la misma proporción en que la ganancia del lazo de control ha aumentado. Consiguientemente, gran parte de las oscilaciones de la potencia activa instantánea consumida por la carga no han sido convenientemente compensadas. Este error en la compensación de la potencia activa instantánea queda perfectamente reflejado en la Figura 6.27c, donde se representa la potencia activa instantánea del lado de fuente.

En el instante $t=56$ ms, el conmutador de la estructura del control adopta nuevamente su posición original, con lo que la ganancia del lazo de control vuelve a valer $k=k_f=\omega_f=2\pi 10$ W/J. En la Figura 6.26c, puede apreciarse cómo en ese instante se

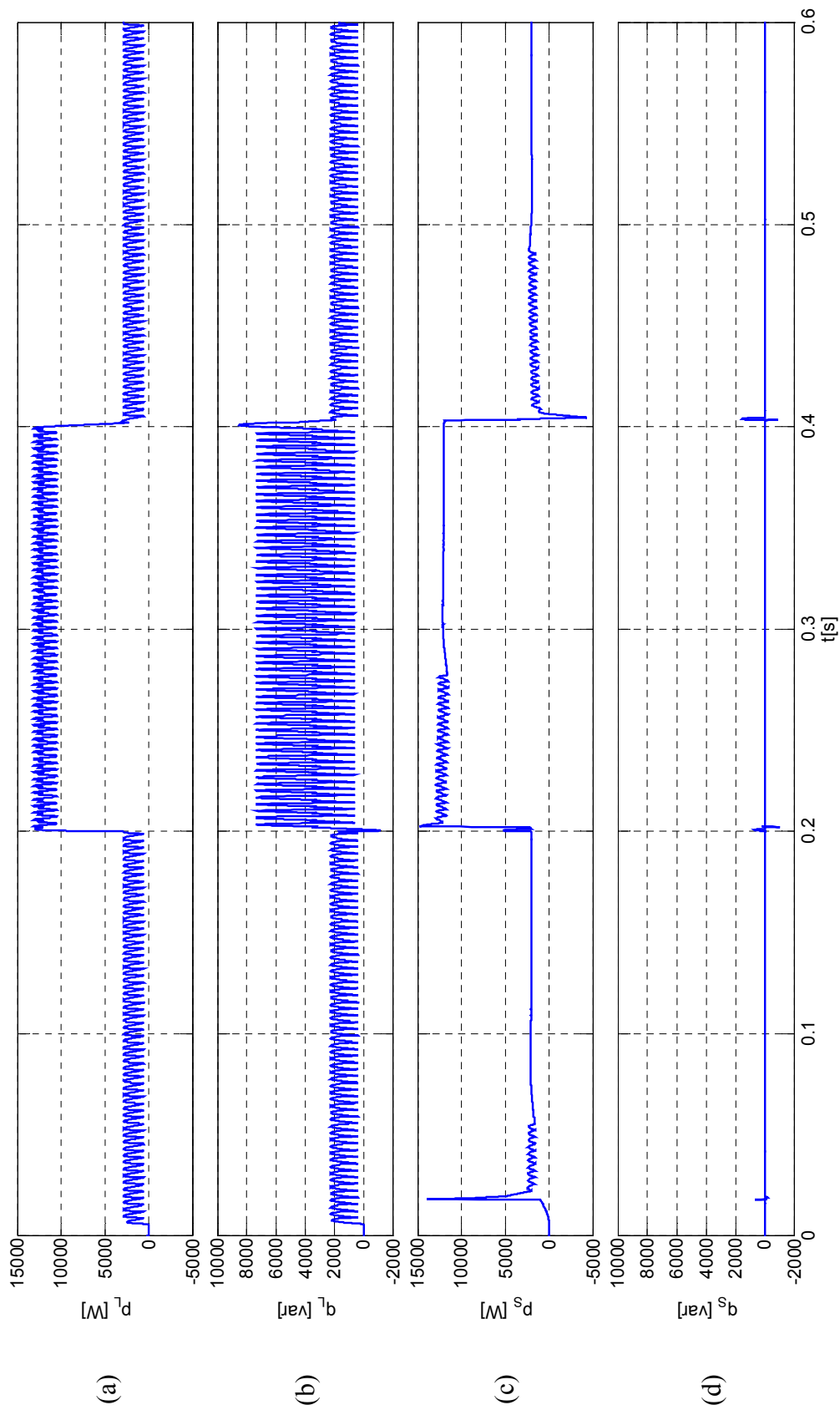


Figura 6.27. Potencias en el lado de fuente y de carga cuando la ganancia correctora del lazo de control es constante.

produce una suave evolución en la variación de energía almacenada en el bus de continua. Esta suave evolución es debida a que la salida de la rama constituida por los bloques $H(s) \cdot C_I(s)$ no vale cero en ese instante, aunque sí un valor muy próximo. Este efecto aparece como consecuencia de que el bloque $H(s)$ introduce un cierto retraso en la propagación de la señal correspondiente a la variación de energía en el bus de continua. Esta suave evolución podría haber sido minimizada haciendo que el conmutador de la estructura del controlador retornase a su posición original cuando la salida del bloque $C_I(s)$ fuese igual a cero, aunque esto implicaría una ralentización innecesaria en la restauración de la funcionalidad de acondicionamiento activo de corriente en el sistema.

En la Figura 6.26c, se puede apreciar cómo, a partir del instante $t=56\text{ms}$, las corrientes de carga son convenientemente acondicionadas, y en la Figura 6.27c, se aprecia cómo, a partir de ese mismo instante, la potencia activa instantánea entregada por la fuente está libre de oscilaciones, lo cual es lógico al estar trabajando con tensiones de red sinusoidales y perfectamente equilibradas.

El proceso descrito ante la entrada de la carga de 2kW se repite más adelante, en $t=0,2\text{s}$, cuando se conecta la carga de 10kW. En ese caso, el sobrepico de corriente que aparece cuando el conmutador de la estructura del lazo de control cambia de posición es considerablemente inferior, ya que ahora la diferencia entre la potencia para la cual fue calculada la ganancia correctora (15kW) y la potencia real demanda por la carga (10kW) es menor.

En $t=0,4\text{s}$, cuando la carga de 10kW es nuevamente desconectada, la variación de energía en el bus experimenta una evolución inversa a la que ofrecía en los casos anteriores. En este caso, el valor límite de variación de energía en el bus de continua se alcanza en $t=403\text{ms}$, instante en el que el conmutador de la estructura del lazo de control cambia de posición.

En la Figura 6.26b se aprecia cómo, una vez alcanzado en valor límite, la variación de energía en el bus de continua sigue aumentando durante algunos milisegundos más. Esto se debe a una característica inherente del inversor en fuente de tensión controlado por corriente. En este inversor, la dinámica en el seguimiento de las corrientes de referencia cuando se pasa súbitamente de una situación de absorción de potencia activa a otra de entrega de potencia activa es más lenta que cuando la transición de potencia se produce en el sentido contrario. A excepción de esta particularidad, el comportamiento del sistema es idéntico al descrito anteriormente.

En la Figura 6.27d, cabe destacar que, independientemente del valor asignado a la ganancia del lazo de control, la potencia imaginaria de la carga está siendo correctamente compensada en todo momento. Esto resulta lógico, ya que al estar trabajando con tensiones de red puramente sinusoidales y equilibradas, el bloque de generación de las corrientes de referencia mostrado en la Figura 6.25, $[P \rightarrow I^{+1}]$, el cual venía regido por (6.24c), ofrece a su salida un conjunto de corrientes puramente activas en todo momento. Por tanto, los pequeños picos que aparecen en la potencia imaginaria desarrollada por la fuente se deben únicamente a errores en el seguimiento de las corrientes de referencia por parte del inversor del SAPF.

El mecanismo de protección presentado hasta el momento, aunque podría resultar operativo en situaciones particulares, resulta ineficiente por dos razones fundamentales, que son: *i*) la necesidad de establecer la ganancia de corrección (k_c) en función de una amplitud máxima previsible en el escalón de potencia activa experimentado por la carga, lo cual puede dar lugar a situaciones conflictivas debido a la imprevisibilidad del comportamiento de dicha carga, y *ii*) la aparición de elevados sobrepicos de corriente en la red cuando el valor límite de la variación de energía en el bus de continua se alcanza como consecuencia de la aparición de un escalón de potencia en carga cuya amplitud sea bastante inferior a aquella considerada como la máxima previsible. Por este motivo, se hace necesario el diseño de un mecanismo de protección que estime, en función de la evolución experimentada por la variación de energía en el bus de continua, la amplitud del escalón de potencia experimentado por la carga, y en función de dicha estimación, determine el valor apropiado de ganancia correctora del lazo de control para conseguir la adecuada recuperación del nivel energético del bus de continua.

En la Figura 6.28 se muestra la evolución de la variación de energía en el bus de continua para diferentes amplitudes de escalón en la potencia activa demandada por la carga. En este caso, se ha considerado el sistema de control original, es decir, se ha tenido en cuenta el bloque $H(s)$, y la ganancia del lazo de control es $k=k_f$.

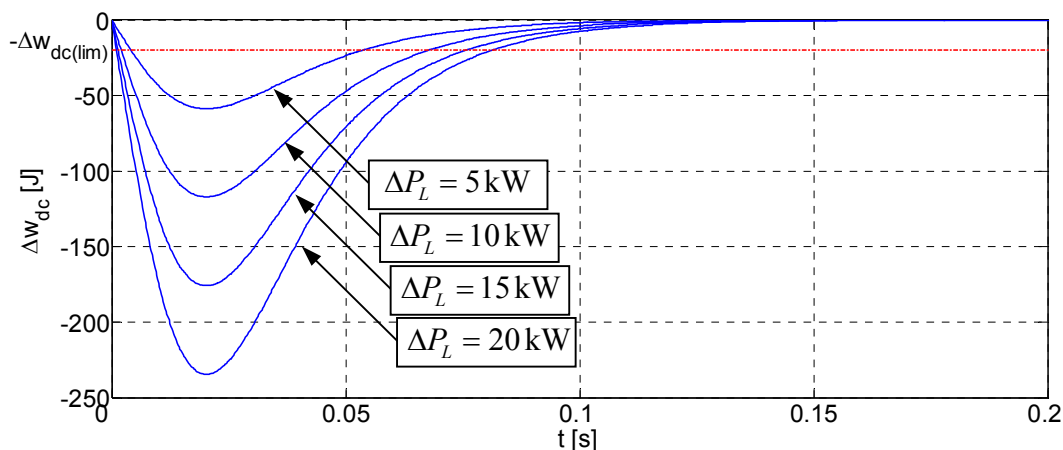


Figura 6.28. Evolución de la variación de energía para diferentes escalones de carga cuando la ganancia del lazo de control es $k=k_f=\omega_f=2\pi 10$ W/J.

Como se puede observar en la Figura 6.28, cuando la variación de energía alcanza el valor límite, su pendiente es función de la amplitud del escalón de potencia activa experimentado por la carga, o en otras palabras, la potencia desarrollada por el bus de continua (p_{eff}) en ese instante está directamente ligada con la amplitud de dicho escalón en la carga. Por tanto, la derivada de la variación de energía en el instante en que el bus de continua alcanza su valor límite podría constituir variable de partida para la estimación de la amplitud del escalón de potencia activa en carga. Sin embargo, cuando el SAPF se encuentra compensando las oscilaciones de potencia de la carga, la variación de energía en el bus presentará oscilaciones que, como se comentó anteriormente, pueden llegar a tener una frecuencia mínima de hasta 100Hz.

Por tanto, para evitar los errores que dichas oscilaciones introducirían en la estimación de la amplitud del escalón de potencia de la carga, se utiliza un filtro pasa-bajas, con una frecuencia de corte de 10Hz y factor de amortiguamiento unitario. La derivada de la señal de salida de este filtro permitirá obtener un observador del valor medio instantáneo de la potencia desarrollada por el bus de continua, \hat{P}_{eff} . Por tanto, esta variable de observación se obtendrá mediante:

$$O(s) = \frac{\hat{P}_{eff}}{\Delta W_{dc}}(s) = s \cdot LPF(s) = \frac{s\omega_f^2}{(s + \omega_f)^2}, \quad (6.53)$$

donde $\omega_f = 2\pi 10$ rad/s. La Figura 6.29 muestra la evolución de esta variable de observación para diferentes amplitudes del escalón de potencia activa experimentado por la carga. En este caso, se ha considerado el sistema de control original, es decir, se ha tenido en cuenta el bloque $H(s)$, y la ganancia del lazo de control es $k = k_f$.

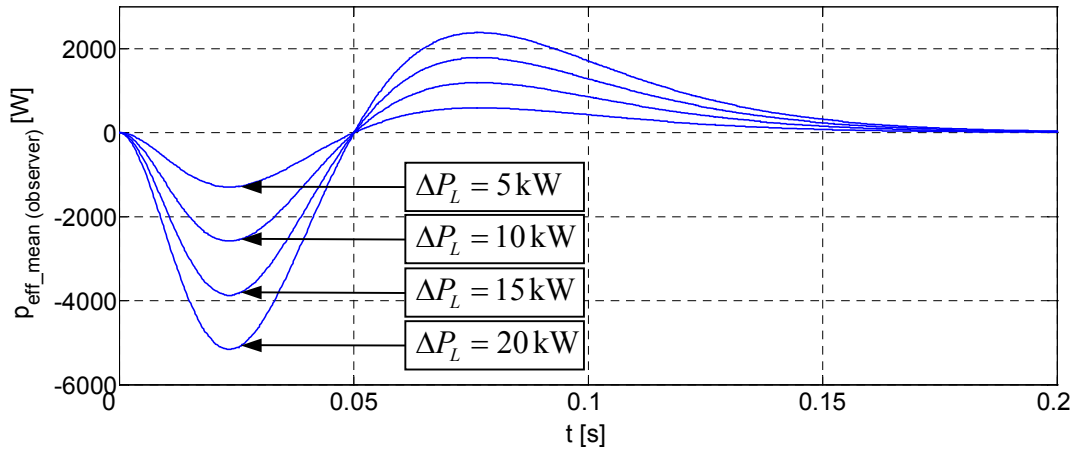


Figura 6.29. Evolución del observador del valor medio instantáneo de la potencia desarrollada por el bus de continua para $k = k_f = \omega = 2\pi 10$ W/J.

La manipulación de las expresiones analíticas que dan lugar a las señales mostradas en las Figuras 6.33 y 6.34 resulta sumamente complicada, por lo que se procede a realizar una aproximación de las mismas en torno al instante $t=0s$.

La evolución real de la variación de energía en el bus de continua, bajo la suposición de un escalón positivo de potencia activa en la carga (potencia consumida por la carga), puede ser aproximada como:

$$\Delta w'_{dc} = -\Delta P_L \cdot t. \quad (6.54)$$

En la Figura 6.30 se muestra la evolución real, en trazo grueso, y la aproximada, en trazo fino, de la variación de energía en el bus de continua en torno a su punto de corte con el valor límite. A partir de (6.54), el instante en que la variación de energía en el bus de continua alcanza su valor límite (t_{lim}) vale:

$$t_{lim} = \frac{\Delta w_{dc(lim)}}{\Delta P_L}, \quad (6.55)$$

donde $\Delta w_{dc(lim)}$ es un valor positivo calculado mediante (6.51).

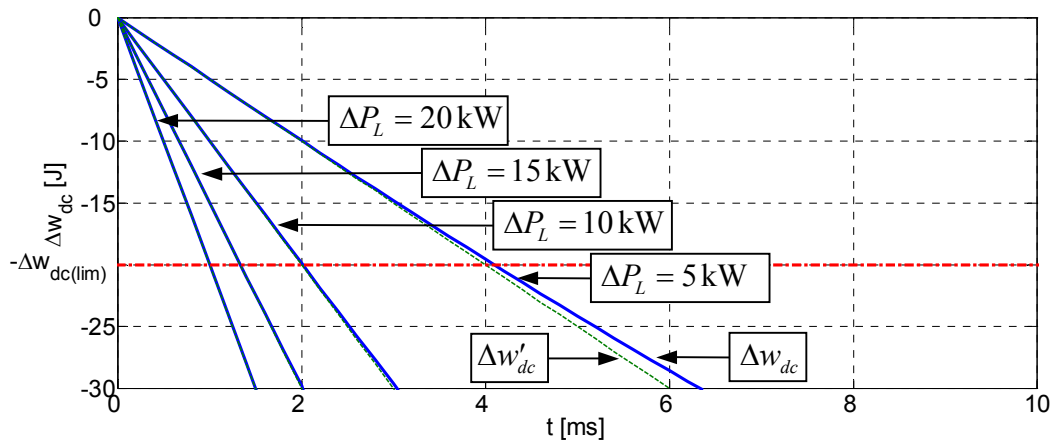


Figura 6.30. Detalle de la evolución de la variación de energía.

De la misma manera, la evolución real del observador del valor medio instantáneo de la potencia desarrollada por el bus de continua, bajo la suposición de un escalón positivo de potencia activa en la carga, puede ser aproximada mediante:

$$\hat{p}'_{eff} = -\frac{k_f^2 \cdot \Delta P_L}{2} t^2. \quad (6.56)$$

En la Figura 6.31, se muestra la evolución real, en trazo grueso, y la aproximada, en trazo fino, de este observador de la potencia media desarrollada por el bus de continua en torno al instante en el que la variación de energía en dicho bus alcanza su valor límite. En esta figura, se puede apreciar como la aproximación realizada no se ajusta perfectamente a la evolución real de la variable. Sin embargo, como se expondrá más adelante, este defecto en la aproximación simplemente se traducirá en un error, de magnitud prácticamente constante, en la estimación de la amplitud del escalón de potencia en carga, habiéndose conseguido dicha estimación mediante expresiones simples y fácilmente manejables.

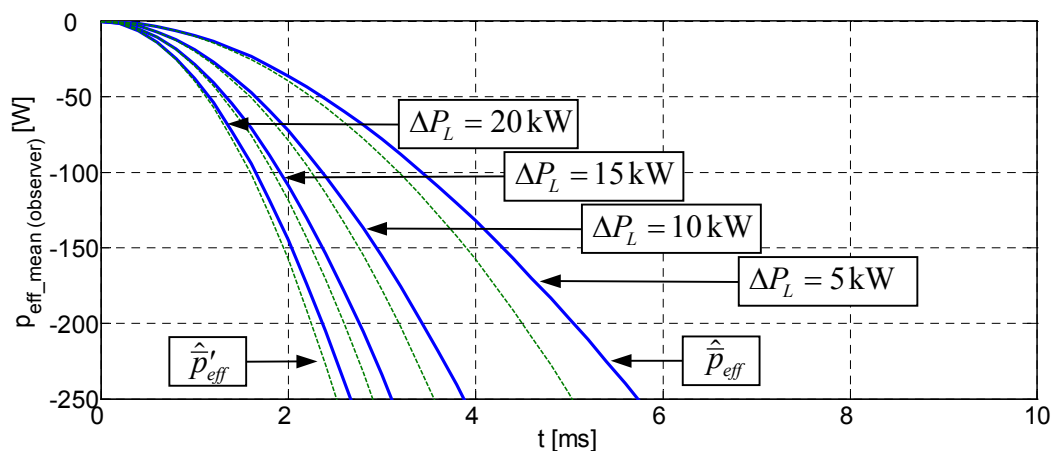


Figura 6.31. Detalle de la evolución del observador del valor medio de potencia desarrollada por el bus de continua.

Sustituyendo (6.55) en (6.56) se obtiene la expresión (6.57), que es una aproximación del valor que presentaría el observador de la potencia media desarrollada por el bus de continua cuando la variación de energía en dicho bus alcanzase su valor límite.

$$\hat{p}'_{eff}\Big|_{t=t_{lim}} = -\frac{k_f^2 \cdot \Delta w_{dc(lim)}^2}{2 \cdot \Delta P_L} \quad (6.57)$$

En la Figura 6.32, se muestran las curvas correspondientes al valor real y al valor aproximado que presenta el mencionado observador en el instante en que la variación de energía en el bus de continua alcanza el valor límite del ejemplo anterior, es decir, con $\Delta w_{dc(lim)} = 20\text{J}$. Claramente, debido a la simplicidad de las ecuaciones que se están manejando, existe una apreciable diferencia entre ambas curvas, sobre todo para amplitudes bajas en el escalón de potencia experimentado por la carga. Esta diferencia entre ambas curvas podría haber sido minimizada si se hubiese utilizado un polinomio de orden superior en la aproximación realizada en (6.56), y consiguientemente la estimación de la amplitud del escalón de potencia activa experimentado por la carga sería más precisa. Sin embargo, esta estimación sumamente precisa carece de sentido, ya que en una situación real de funcionamiento del sistema, el escalón en la potencia activa instantánea consumida por la carga no será perfecto, sino que irá acompañado de las habituales oscilaciones en la misma. Esto implicará la aparición de unas oscilaciones superpuestas sobre la evolución de la variación de energía en el bus de continua, y de otras, de menor amplitud, en la salida del observador de la potencia media desarrollada por el bus de continua. Ambas oscilaciones podrán falsear el proceso de estimación de la amplitud del escalón de potencia en carga, por lo que sería necesario sobredimensionar adecuadamente la amplitud estimada de este escalón a modo de conseguir que la variación de energía en el bus de continua no llegue a sobrepasar en ningún momento su valor límite. Como quedará inmediatamente justificado, cuando se utilizan las expresiones aproximadas que han sido mostradas hasta el momento, la amplitud

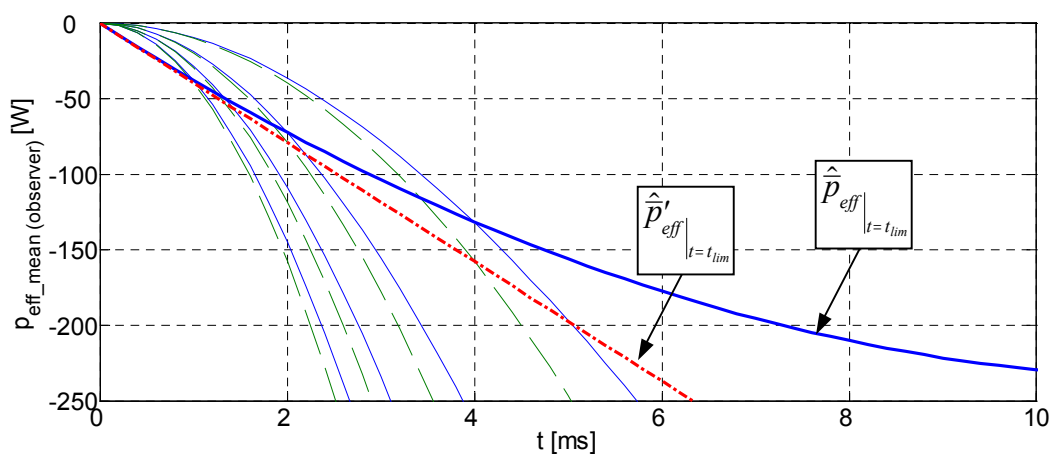


Figura 6.32. Valor del observador de la potencia media desarrollada por el bus de continua cuando $|\Delta w_{dc}| = \Delta w_{dc(lim)} = 20\text{J}$.

estimada del escalón de potencia en carga será siempre mayor a la real, por lo que el sobredimensionamiento en la amplitud estimada del citado escalón se conseguirá de forma implícita mediante la utilización de expresiones simples y fácilmente manejables. Por tanto, si se acepta como válido que:

$$\hat{p}_{eff}|_{t=t_{lim}} \approx \hat{p}'_{eff}|_{t=t_{lim}}, \quad (6.58)$$

la expresión (6.59) podría ser utilizada para estimar la amplitud del escalón de potencia experimentado en la carga ($\Delta\hat{P}_L$), en la cual, se utiliza como dato de partida el valor del observador de la potencia media desarrollada en el bus de continua en el instante en que la variación de energía en dicho bus alcanza su valor límite. En la Figura 6.33, se muestra la representación gráfica de esta función cuando se considera que $\Delta w_{dc(lim)} = 20 \text{ J}$ y $k=k_f=\omega_f=2\pi 10 \text{ W/J}$.

$$\Delta\hat{P}_L = -\frac{k_f^2 \cdot \Delta w_{dc(lim)}^2}{2 \cdot \hat{p}_{eff}|_{t=t_{lim}}} \quad (6.59)$$

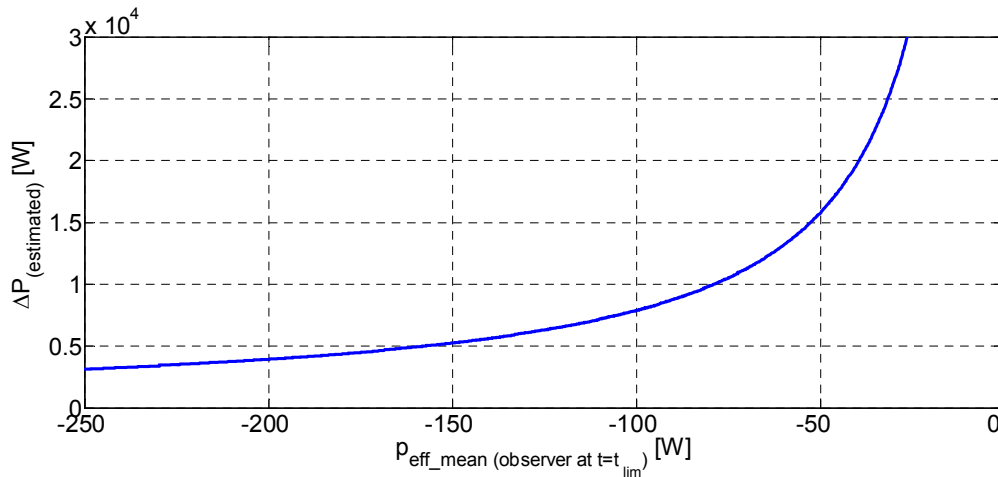


Figura 6.33. Amplitud estimada del escalón de potencia activa en carga partiendo del valor del observador de la potencia media desarrollada por el bus de continua cuando $|\Delta w_{dc}| = \Delta w_{dc(lim)} = 20 \text{ J}$.

Mediante simulación, se ha evaluado el sistema de estimación propuesto, considerando diferentes amplitudes para el escalón de potencia activa experimentado por la carga, comprendidas entre 2kW y 20kW. Así mismo, se han considerado diferentes valores para la ganancia original del bucle de control. El análisis de los resultados obtenidos por el sistema de estimación, en los diferentes casos estudiados, permite deducir la ecuación (6.60), la cual establece la relación existente entre la amplitud estimada del escalón de potencia en carga ($\Delta\hat{P}_L$) respecto a su amplitud real (ΔP_L) y al resto de parámetros característicos del sistema ($\Delta w_{dc(lim)}$ y k_f).

$$\Delta\hat{P}_L = \Delta P_L + k_f(-0,0064\Delta w_{dc(lim)}^2 + 0,6698\Delta w_{dc(lim)} - 0,0077) \quad (6.60)$$

La Figura 6.34 muestra el resultado obtenido del sistema de estimación cuando se considera que $\Delta w_{dc(lim)} = 20\text{ J}$ y $k=k_f=\omega_f=2\pi 10\text{ W/J}$. En esta figura, la línea de trazo grueso muestra la salida del sistema de estimación, mientras que la línea de trazo fino representa la salida exacta. En este caso, para los valores de los parámetros considerados en este diseño, se está introduciendo un coeficiente de sobredimensionamiento de 682W en la estimación de la amplitud del escalón de potencia en la carga.

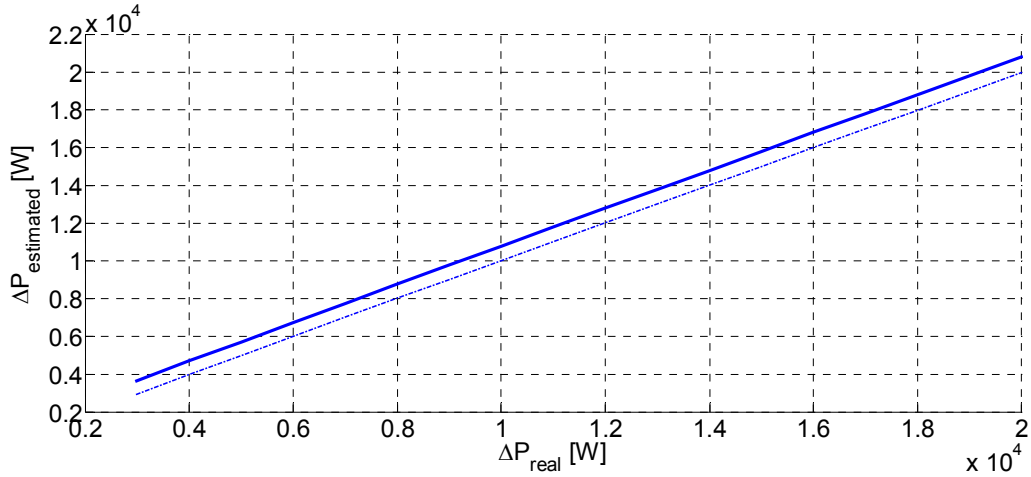


Figura 6.34. Característica del sistema de estimación de la amplitud del escalón de potencia activa en carga.

Una vez que la amplitud del escalón de potencia activa en el lado de carga ha sido convenientemente estimada, es preciso determinar el valor apropiado de la ganancia correctora del lazo de control (k_c) para asegurar la adecuada recuperación energética del bus de continua. Esta recuperación se debe producir sin que aparezcan sobrepicos indeseables en las corrientes inyectadas por el SAPF. Lógicamente, como ocurría en el sistema de protección descrito anteriormente, cuando la variación de energía en el bus de continua alcanza su valor límite, el lazo de control cambia su estructura, quedando inoperativo el bloque $H(s)$. En estas circunstancias, las funciones de transferencia características del sistema coinciden con aquellas mostradas en (6.38). Partiendo de la expresión (6.38b), y suponiendo que la potencia activa consumida por la carga experimente un escalón de 10kW, la Figura 6.35 muestra la evolución de la variación de energía en el bus de continua para diferentes valores de la ganancia correctora, superior a la ganancia original ($k_c > k_f$).

La expresión (6.61) corresponde a la función temporal de las curvas mostradas en la Figura 6.35. Esta expresión ha sido obtenida a partir del estudio analítico de la función de transferencia (6.38b) con una ganancia correctora superior a la ganancia original.

$$\Delta w_{dc} = \Delta P_L \left\{ \frac{r-2}{(r-1)^2 k_f} e^{-kt} - \left[\frac{r-2}{(r-1)^2 k_f} + \frac{t}{(r-1)} \right] e^{-k_f t} \right\} ; \quad r = \frac{k_c}{k_f} \quad (6.61)$$

En (6.61), la variable r representa la relación entre el valor asignado a la ganancia correctora (k_c), respecto a la ganancia original (k_f).

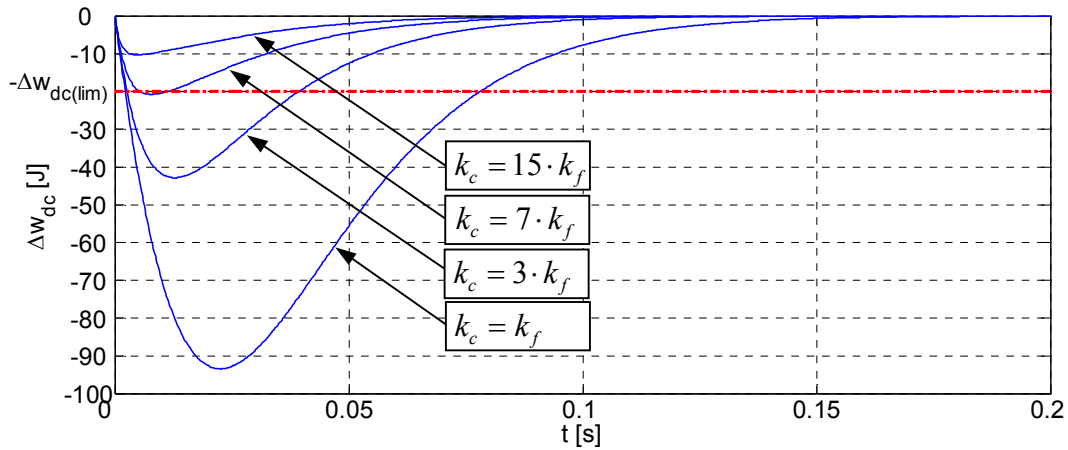


Figura 6.35. Variación de energía en el bus de continua ante un escalón de potencia en carga de 10kW considerando diferentes valores de ganancia correctora.

El análisis de (6.61) permite obtener la expresión del instante en que el valor absoluto de la variación de energía en el bus de continua alcanza su valor máximo. Esta expresión es:

$$t_{max} = \frac{1}{(r-1)k_f} \left[1 + LambertW(r(r-2)e^{-1}) \right], \quad (6.62)$$

donde, $LambertW(x)$ representa la función *W de Lambert* [6.14]. Esta función, que no puede ser expresada mediante funciones elementales, presenta infinitas soluciones, siendo únicamente analítica en su rama principal.

La máxima variación de energía en el bus de continua se obtiene sustituyendo la variable tiempo de (6.61) por la expresión (6.62), llegándose a una función tal que:

$$|\Delta w_{dc(max)}| = f(\Delta P_L, k, k_f). \quad (6.63)$$

Imponiendo ahora como condición que:

$$|\Delta w_{dc(max)}| = \Delta w_{dc(lim)}, \quad (6.64)$$

y utilizando las correspondientes herramientas de computación, se obtiene la expresión (6.65), que determina el valor adecuado de la ganancia correctora del lazo de control para asegurar que la variación de energía en el bus de continua no rebase su valor límite cuando aparece un determinado escalón en la potencia activa consumida por la carga.

$$k_c = 1,0117 \frac{\Delta P_L}{\Delta w_{dc(lim)}} - 0,7437 k_f \quad (6.65)$$

En la Figura 6.36 se muestra la evolución de la variación de energía en el bus de continua cuando se utiliza la expresión (6.65) para estimar el valor adecuado de la ganancia correctora frente a diferentes amplitudes en el escalón de potencia activa experimentado por la carga.

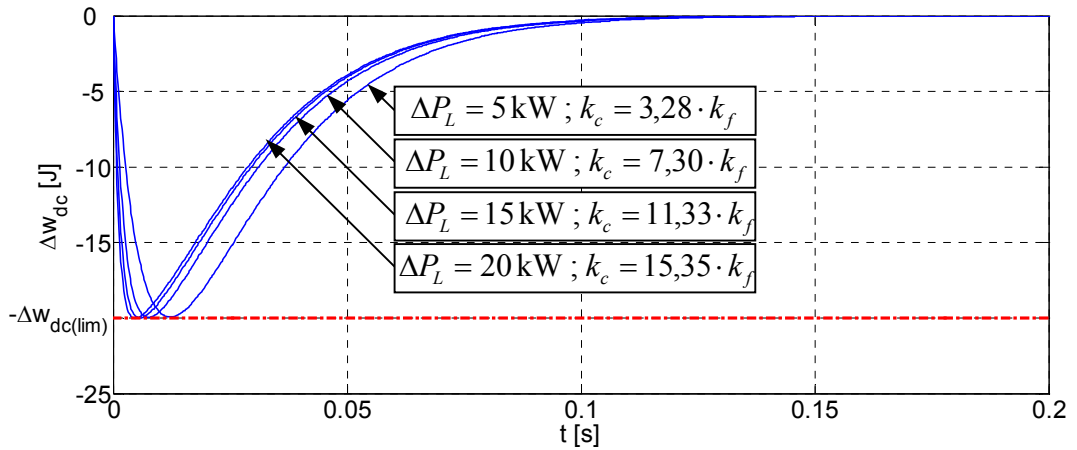


Figura 6.36. Variación de energía en el bus de continua ante diferentes escalones de potencia en carga con diferentes valores de ganancia correctora.

Partiendo de los análisis realizados hasta el momento, se propone el sistema de control mostrado de la Figura 6.37. Como se aprecia en esta figura, la variable de entrada al sistema de estimación de la ganancia correctora es el valor absoluto de la variación de energía en el bus de continua. De esta manera, el sistema será válido tanto para valores positivos como negativos del escalón de potencia activa experimentado por la carga. La función de transferencia del bloque $O(s)$ corresponde

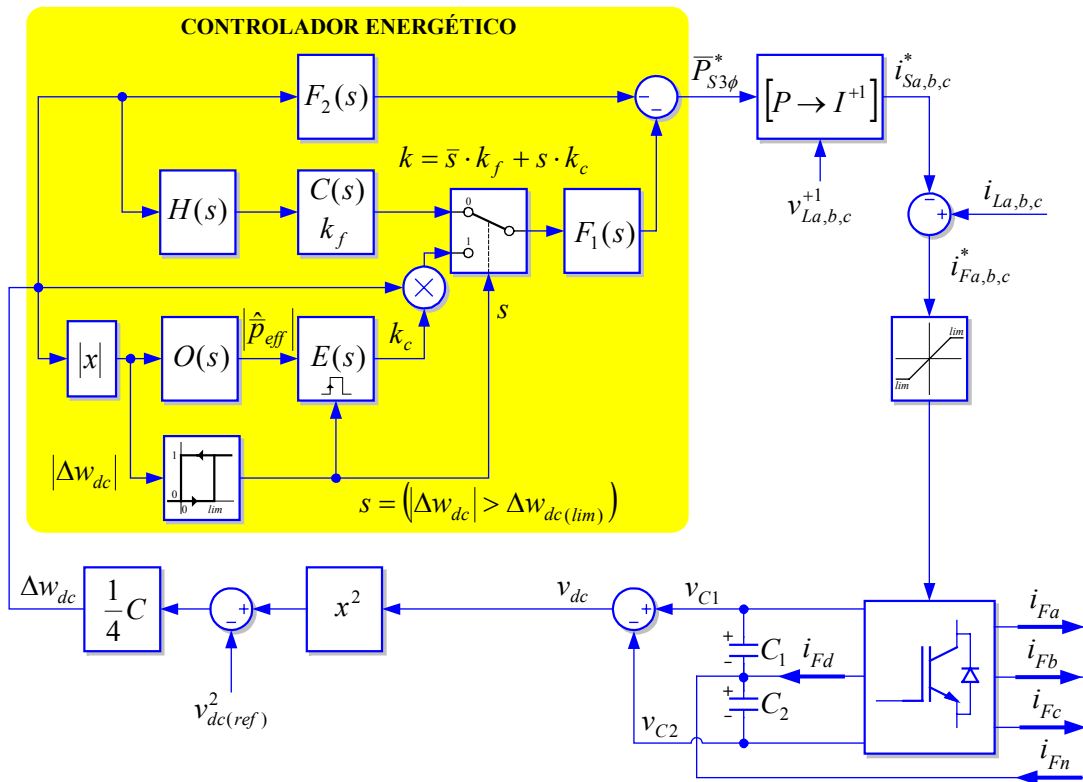


Figura 6.37. Controlador predictivo de la máxima variación de energía en el bus DC.

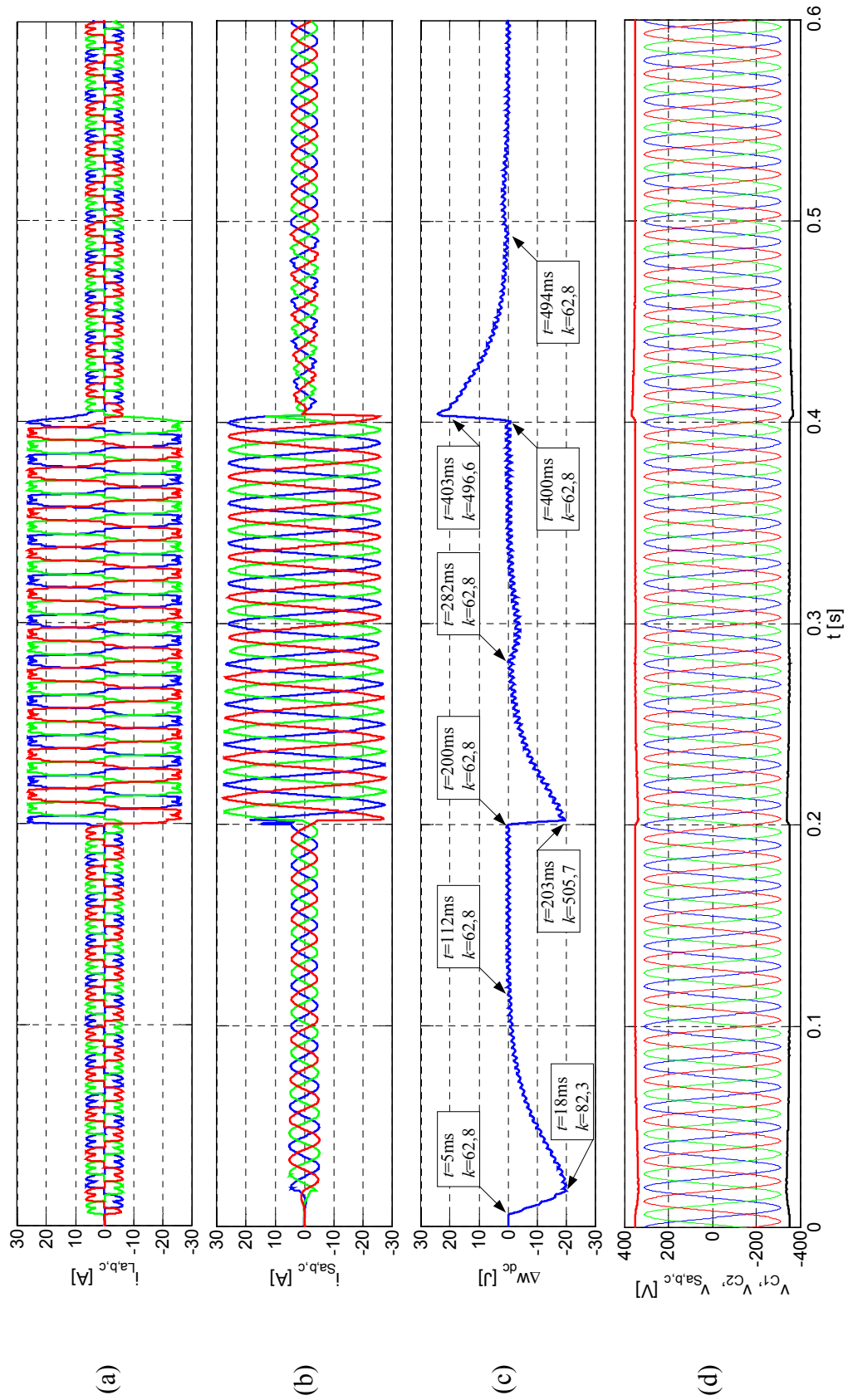


Figura 6.38. Corrientes, variación de energía y tensiones cuando la ganancia correctora del lazo de control es variable.

con aquella mostrada en (6.53). La función de transferencia del bloque $E(s)$ se obtiene mediante la combinación de las expresiones (6.59) y (6.65), realizando las correspondientes modificaciones en los signos de las variables, ya que ahora se trabaja con el valor absoluto de la variación de energía en el bus de continua. De esta forma, la expresión correspondiente al bloque estimador $E(s)$ será:

$$k_c = 0,5058 \frac{k_f^2 \Delta w_{dc(lim)}}{\left| \hat{P}_{eff} \right|_{t=t_{lim}}} - 0,7437 k_f \quad (6.66)$$

La activación de este bloque se produce cuando un flanco positivo aparece en su señal de disparo. En ese instante, la expresión (6.66) se procesa una sola vez, y el valor de ganancia correctora se mantiene inalterado en la salida del bloque hasta que la señal de disparo alcanza nuevamente su nivel bajo, es decir, cuando la variación de energía en el bus de continua vuelve a ser nula. En ese momento la estructura del control conmuta a su estado original, cumpliéndose nuevamente que $k=k_f$.

Para mostrar el comportamiento del sistema de control propuesto, se considerarán las mismas condiciones supuestas en el ejemplo en que la ganancia correctora adoptaba un valor elevado y constante. En ese caso, el valor elegido para los condensadores del bus de continua era $C_1=C_2=2000\mu\text{F}$, con una tensión absoluta de referencia en el bus de continua $v_{dc(ref)}=700\text{V}$. Así mismo, el valor límite de la variación de energía en el bus de continua era $\Delta w_{dc(lim)}=20\text{J}$, y la ganancia original del lazo de control valía $k=k_f=2\pi 10\text{ W/J}$.

En este ejemplo, en $t=5\text{ms}$, se conecta una carga que consume una potencia activa de 2kW . Posteriormente, en $t=0,2\text{s}$, también se conecta otra carga que consume una potencia activa de 10kW . Por último, en $t=0,4\text{s}$, esta última carga es desconectada. La Figura 6.38 muestra la evolución de las principales variables características del sistema. En esta Figura 6.38c se puede apreciar como la conexión de la carga de 2kW da lugar a que, en $t=18\text{ms}$, la variación de energía alcance su valor límite, y consiguientemente, el sistema de control cambia su estructura. En ese instante, la amplitud estimada para el escalón de potencia fue de 2550W , la cual difiere ligeramente de los 2682W que cabía esperar cuando se aplica la expresión (6.60). Si se tiene en cuenta que la evolución real experimentada por la potencia activa instantánea consumida por la carga no es un escalón perfecto, esta desviación en la estimación del escalón de potencia se debe aceptar como válida. A partir de este valor estimado de potencia, la expresión (6.66) determina que el valor de la ganancia correctora debe ser $k=k_c=1,3 \cdot k_f=82,26\text{ W/J}$. En la Figura 6.38c, se aprecia como este valor de ganancia da lugar a la recuperación energética del bus de continua, sin que, como indica la Figura 6.38b, aparezcan sobrepicos en las corrientes que circulan en el lado de fuente. Este valor de ganancia correctora es aplicado hasta el instante $t=112\text{ms}$, momento en el que la variación de energía en el bus de continua vuelve a ser nula. Este valor relativamente bajo de la ganancia correctora origina una reducción pequeña en el ancho de banda de la función de transferencia que relaciona la potencia activa instantánea desarrollada por el filtro con la potencia activa instantánea consumida por la carga, y consiguientemente, el detrimento en la

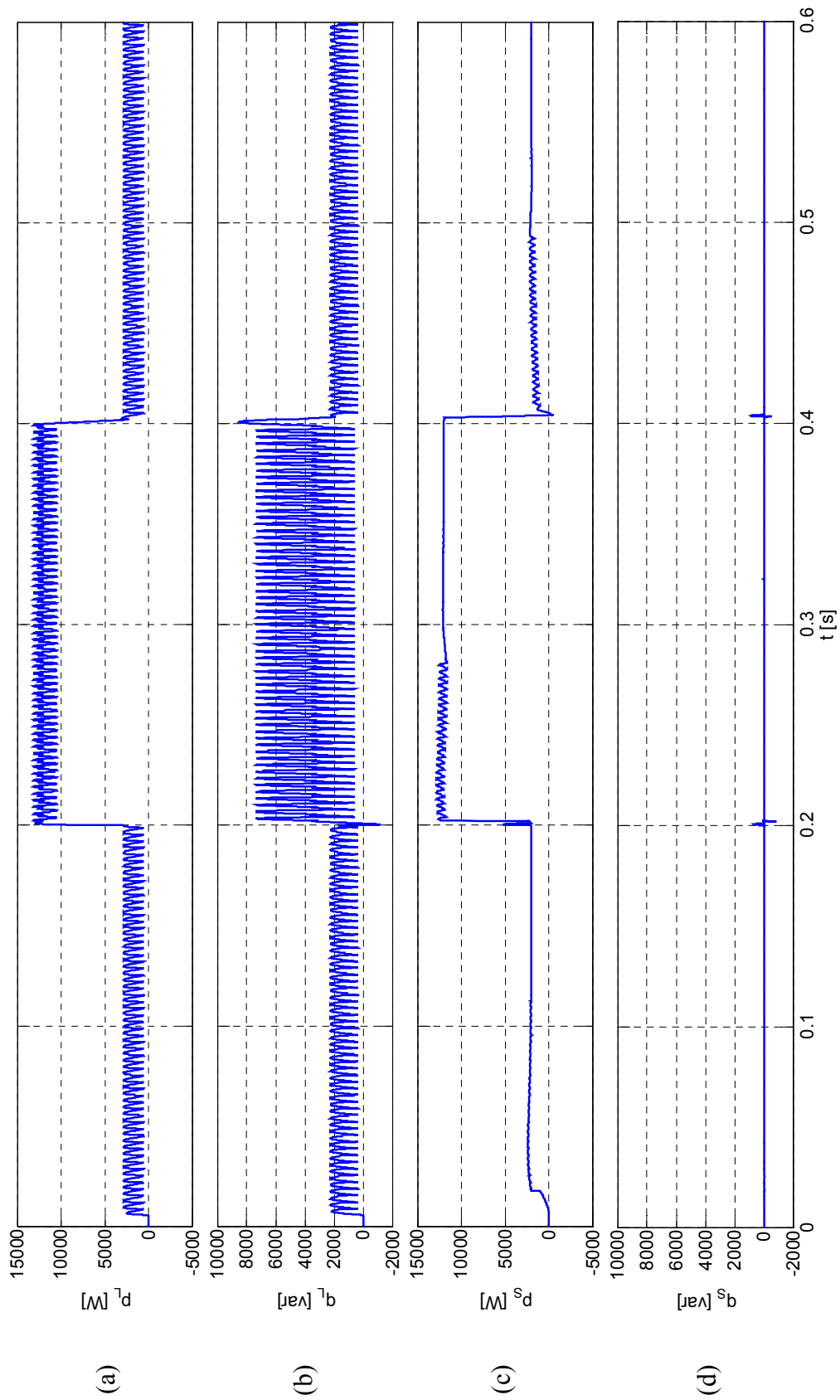


Figura 6.39. Potencias en el lado de fuente y de carga cuando la ganancia correctora del lazo de control es variable.

característica de compensación del SAPF es relativamente bajo, con lo que las corrientes en el lado de fuente siguen siendo prácticamente sinusoidales. Este hecho queda patente en la Figura 6.39c, donde se puede apreciar que la potencia activa instantánea desarrollada por la fuente es prácticamente constante durante este periodo de recuperación energética. Para los instantes en los que se alcanza el valor límite de variación de energía en el bus de continua como consecuencia de la conexión y desconexión de la carga de 10kW, se podrían realizar disquisiciones similares a las anteriormente expuestas. En ambos instantes, las amplitudes estimadas para el escalón de potencia activa en carga fueron 10921W y 10742W respectivamente, las cuales corresponden a unos valores de ganancia correctora $k=k_c=8,04 \cdot k_f=505,7$ W/J y $k=k_c=7,9 \cdot k_f=496,6$ W/J.

A la vista de los resultados de simulación, se puede afirmar que el sistema de protección mostrado en la Figura 6.37 constituye un mecanismo eficaz y adecuado para preservar el estado energético del bus de continua cuando parecen súbitos escalones aparecen en la potencia activa instantánea consumida por la carga. Sin embargo, este sistema de protección resultaría inadecuado en el caso de que, mientras se está aplicando un determinado valor de ganancia correctora, se alcanzase nuevamente el valor límite de variación de energía en el bus de continua como consecuencia de la aparición de un segundo escalón en la potencia activa instantánea consumida por la carga. Este problema podría ser fácilmente solventado modificando el mecanismo de disparo del bloque $E(s)$, es decir, haciendo que el valor de la ganancia correctora fuese recalculado cada vez que la variación de energía en el bus de continua alcanzase su valor límite. Además, como mecanismo de seguridad adicional, se podría definir un nivel crítico de variación de energía. Si por cualquier circunstancia este valor crítico fuese alcanzado, se aplicaría automáticamente el máximo valor permisible para la ganancia correctora. Se debe sobrentender que, si una vez activado este último mecanismo crítico de seguridad, el nivel energético del bus no tiende hacia su recuperación, por ejemplo a consecuencia de un cortocircuito en la carga, deberían entrar en acción mecanismos adicionales de seguridad que desconectasen al SAPF de la red.

6.7. Conclusiones

En este Capítulo se ha presentado una nueva metodología de control de un SAPF conectado a una red de tres o cuatro hilos. El sistema de control propuesto se basa en el mantenimiento del estado energético del SAPF, y es aplicable tanto a inversores en puente completo (FLFB, TLFB), como a inversores con el bus de continua referenciado al neutro de la red (TLSC, FLSC). El estudio de los flujos de potencia en una aplicación genérica de acondicionamiento de corriente ha permitido diseñar un sistema de control, en el que quedan perfectamente definidas las funciones de transferencia que relacionan en estado energético del bus de continua con el resto de variables del sistema. Por último, se ha mejorado el sistema de control del SAPF para poder garantizar unas condiciones de funcionamiento adecuadas cuando, a

consecuencia de cambios súbitos en la red o en la carga, el bus de continua tiende a rebasar unos límites energéticos fijados como referencia.

Los estudios llevados a cabo a lo largo de este Capítulo permiten concluir que:

- i)* En los métodos convencionales de control del SAPF, basados en el cálculo de parámetros de la carga, el control de la tensión del bus de continua da lugar a sistemas no lineales que dificultan el análisis de la respuesta transitoria en los mismos.
- ii)* La relación entre la energía almacenada en el bus de continua y la potencia activa instantánea desarrollada por el SAPF es lineal. Esta característica permite el diseño de un controlador energético del SAPF que se basa en el mantenimiento del estado energético del sistema. Este controlador energético tiene su origen en la cancelación de los errores de régimen permanente que aparecen en la energía almacenada en el bus de continua de un SAPF que se controla mediante un sistema convencional (basado en el cálculo de la potencia activa instantánea consumida por la carga).
- iii)* Las funciones de transferencia que caracterizan el controlador energético aquí propuesto son lineales y fácilmente analizables, lo que permite dimensionar los condensadores del bus de continua en función de la respuesta dinámica del sistema de control. Este aspecto supone una clara ventaja con respecto a otros enfoques convencionales, en los que los condensadores se calculan atendiendo únicamente a aspectos de régimen permanente, y se sobredimensiona finalmente su tamaño para soportar las desviaciones dinámicas que experimenta el sistema.
- iv)* El principio de funcionamiento del controlador energético del SAPF se basa en mantener constante el nivel medio de la energía almacenada en el bus de continua del inversor, haciendo para ello que las corrientes del lado de fuente sean perfectamente sinusoidales, equilibradas y enfasadas con la componente de frecuencia fundamental de la tensión de red. En el diseño del controlador, se ha conseguido obtener una ley de control única para el mantenimiento de del estado energético del SAPF frente a variaciones en cualquier término de potencia que afecta al mismo. Esta última característica supone una nueva ventaja del controlador energético, ya que es posible extender la funcionalidad del SAPF hacia aplicaciones de rectificación activa con factor de potencia unitario, o viceversa, es decir, es posible aportar funcionalidades de filtrado activo a las aplicaciones convencionales de rectificación basadas en un rectificador activo trifásico.
- v)* El hecho de que el controlador energético regule la principal variable de estado del SAPF, es decir, la energía de su bus de continua, permite el diseño de un sistema de protección que asegure que el valor de dicha variable de estado no rebase unos valores límites establecidos como

referencia cuando aparecen súbitas variaciones en las condiciones de contorno. En este trabajo, se propone un sistema de regulación (predictivo-adaptativo) que evalúa la tendencia de la variación de energía en el bus de continua cuando se alcanzan los niveles límite, y a partir de este dato, se estima la potencia activa consumida por la carga, y se establecen los parámetros adecuados en el bucle de control para conseguir la adecuada recuperación del estado energético del mismo, sin que aparezcan picos elevados de corriente en la red, y sin que la funcionalidad de filtrado activo se vea excesivamente deteriorada.

6.8. Referencias del Capítulo 6

- [6.1] L. M. Tolbert and T. G. Habetler, "Comparison of time-based non-active power definitions for active filtering," in *Proc. Int. Power Elect. Congress*, Oct. 2000, pp. 73-79.
- [6.2] R. Hao, Z. Cheng and X. You, "A novel current detection method based on rotating d-q reference frame for active power filter," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC'04)*, vol. 4, 2004, pp. 3034-3038.
- [6.3] C. -C. Chen and Y. -Y. Hsu, "A novel approach to the design of a shunt active filter for an unbalanced three-phase four-wire system under nonsinusoidal conditions," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, pp. 1258-1264, Oct. 2000.
- [6.4] F. Z. Peng, G. W. Ott and D. J. Adams, "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, pp. 1174-1181, Nov. 1998.
- [6.5] V. Soares, P. Verdelho and G. D. Marques, "An instantaneous active and reactive current component method for active filters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, pp. 660-669, Jul. 2000.
- [6.6] V. Cárdenas, L. Morán, A. Bahamondes and J. Dixon, "Comparative analysis of real time reference generation techniques for four-wire shunt active power filters," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC'03)*, vol. 2, 2003, pp. 791-796.
- [6.7] H. Fujita, Y. Watanabe and H. Akagi, "Transient analysis of a unified power flow controller and its application to design of the dc-link capacitor," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, pp. 735-740, Sep. 2001.
- [6.8] D. Xu, H. Fang, Y. S. Lee and E. Masada, "Active power filter with optimal DC side condenser," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC'00)*, vol. 3, 2000, pp. 1167-1170.
- [6.9] A. E. Emanuel, "Reflections on the effective voltage concept," in *Proc. Int. Work. Power Def. and Meas.*, Oct. 2003, pp.1-7.
- [6.10] K. N. Sakthivel, S. K. Das and K. R. Kini, "Importance of quality AC power distribution and understanding of EMC standards IEC-61000-3-2, IEC-61000-3-3 & IEC-61000-3-11," in *Proc. IEEE Electromagnetic Interference and Compatibility*, 2003, pp. 423-430.
- [6.11] M. Aredes, J. Häfner and K. Heumann, "Three-phase four-wire shunt active filter control strategies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, pp. 311-318, Mar. 1997.
- [6.12] G. W. Chang, and T. -C. Shee, "A novel reference compensation current strategy for shunt active power filter control," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, pp. 1751-1758, Oct. 2004.
- [6.13] M. J. Bollen, "Voltage sags in three-phase systems," *IEEE Power Energy Review*, vol. 21, pp. 8-15, Sep. 2001.
- [6.14] Robert M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth, "On the Lambert W function", *Advances in Computational Mathematics*, vol. 5, pp. 329-359, 1996.

