

COMPORTAMENT DINÀMIC DE CONVERTIDORS CC/CC CONTROLATS PER MICROPROCESSADOR APLICATS A L'APROFITAMENT D'ENERGIA SOLAR

J. Peracaula, J. Bordonau
 Dept. d'Eng. Electrònica - Universitat Politècnica de Catalunya
 E.T.S. Enginyers Industrials - Diagonal, 647
 E-08028 Barcelona
 Tel.: +34-3-4016604, FAX: +34-3-4016600
 E-Mail: peracaula@eel.upc.es

En aquest article s'analitza el comportament dinàmic dels convertidors CC/CC controlats per microprocessador, quan s'usen en la conversió d'energia generada per cel.les solars. Per l'obtenció de resultats experimentals, s'ha emprat un prototipus basat en un convertidor de Cuk, controlat amb un microprocessador de 16 bits (Motorola 68010), amb coprocessador, funcionant a una freqüència de relloige de 12,5 MHz.

Quan s'usa un control digital, el període de mostreig és una de les restriccions més importants, de cara a obtenir una resposta ràpida del sistema. En el cas que es presenta, el període de mostreig està condicionat pel temps d'execució de l'algorisme de control al microprocessador 68010. Encara que aquest factor introdueix una limitació en el comportament dinàmic del sistema, és interessant comparar els resultats amb els obtinguts mitjançant un control de tipus analògic [1].

Es comenten els avantatges del control digital i s'extrauen algunes conclusions pràctiques.

Paraules clau: control amb microprocessador, convertidor CC/CC, cel. la solar, model dinàmic, control electrònic.

1. INTRODUCCIÓ

La conversió CC/CC de l'energia procedent de panells solars requereix normalment una regulació de tensió i de corrent a la sortida per compensar les variacions de la radiació solar i de les condicions de càrrega [2].

La solució convencional per la regulació de la sortida del convertidor consisteix en un anell tancat de control realitzat analògicament, que governa l'estat (conducció/bloqueig) dels transistors de potència del convertidor.

En aquest treball, es presenta un control basat en un microprocessador de 16 bits (Motorola 68010) i es dedica una atenció especial al comportament dinàmic del sistema global, que consisteix en el convertidor, el controlador basat en microprocessador i la interfície entre ells.

Les figures 1 i 3 presenten un diagrama de blocs del sistema.

Alguns avantatges del control digital són la facilitat per modificar els paràmetres que han de cobrir els diferents règims de funcionament, la insensibilitat a grans canvis en les condicions ambientals, la facilitat de comunicació amb altres equips i la possibilitat d'una monitorització digital del funcionament de l'equip.

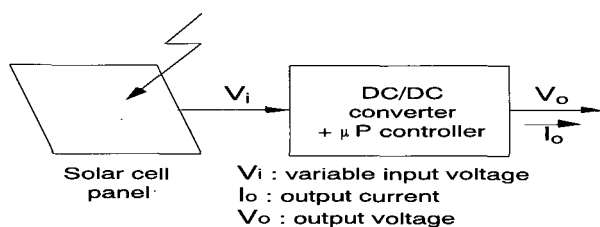


Figura 1. Diagrama de blocs d'un sistema d'alimentació en CC basat en cel.les solars.

S'ha construït un prototipus basat en un microprocessador Motorola 68010, funcionant a 12,5 MHz i un convertidor CC/CC (de tipus Cuk) alimentat per cel.les solars, commutant a una freqüència de 300 kHz.

2. EL CONVERTIDOR COMMUTAT

S'ha utilitzat un convertidor tipus Cuk. La seva resposta dinàmica es pot descriure per una funció de transferència de 4t ordre, degut a la presència de 2 inductàncies, L_1 i L_2 , i de dues capacitats, C_1 i C_2 . Veure la Fig. 2.

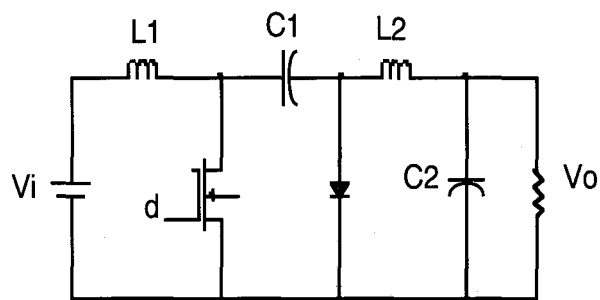


Figura 2. Convertidor CC/CC de 4t ordre (tipus Cuk).

El convertidor és altament no lineal. El seu guany en CC es pot descriure per l'equació (1), quan no hi ha perdues:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad (1)$$

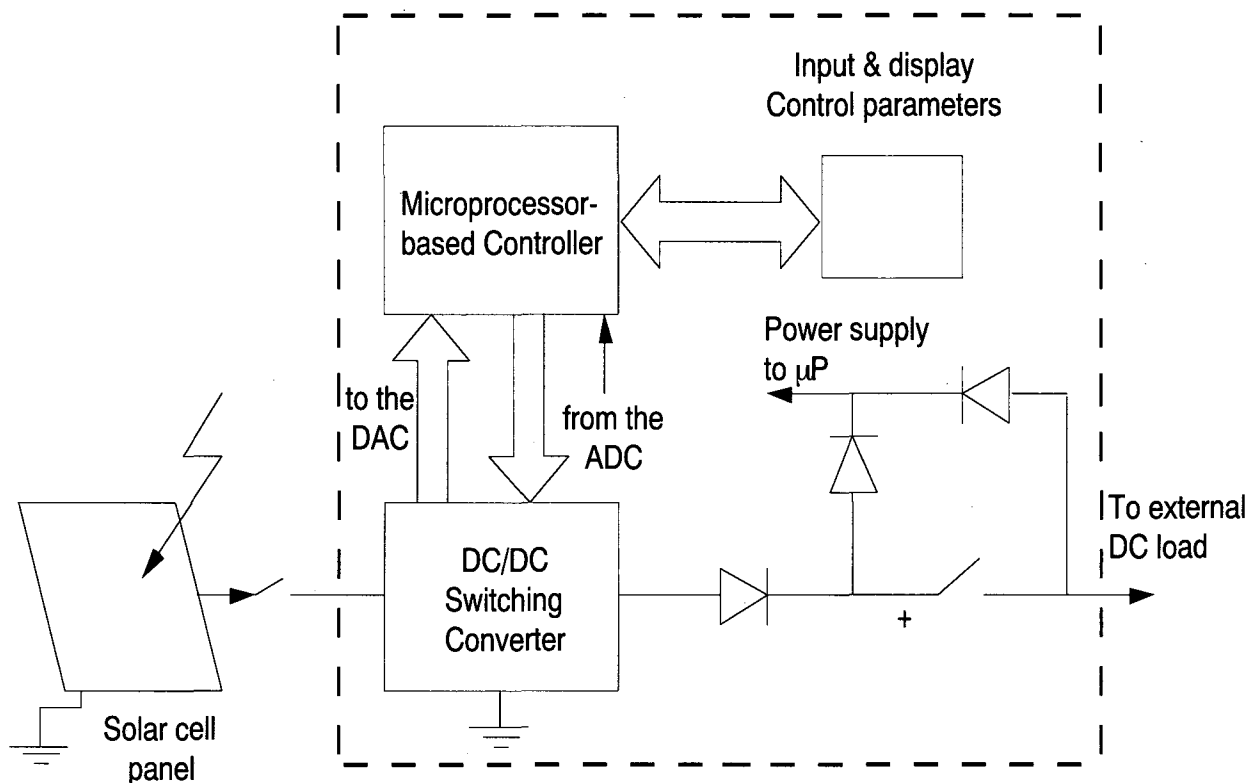


Figura 3. El sistema complet, amb la font d'energia, la planta (convertidor commutat), el controlador basat en microprocessador i la càrrega de CC.

a on

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

és la relació entre l'interval de conducció del transistor de potència i el període de commutació (relació de conducció), que ve controlada pel microprocessador.

3. MÒDUL DEL MICROPROCESSADOR

El mòdul del microprocessador utilitza un Motorola 68010, un microprocessador de 16 bits, que treballa internament amb registres de 32 bits amb una freqüència de rellotge de 12,5 MHz. També inclou un coprocessador per les instruccions de coma flotant i 64 KB de memòria. El programa de control s'emmagatzema en memòria tipus ROM i els paràmetres de control es poden introduir en una porció de memòria tipus RAM mitjançant un canal de comunicació sèrie, controlat per un ACIA MC6850. Una bateria auxiliar de petit tamany assegura la no volatilitat dels paràmetres de control emmagatzemats en RAM.

La comunicació paral·lela amb l'entrada del convertidor digital/anàlogic (DAC) i amb la sortida del convertidor analògic/digital (ADC) es fa amb un circuit d'interfície MC68230, que té dos ports de 8 bits. El temps de conversió pel ADC AD570JD és de 25 µs i el temps d'establiment del DAC08 és de 85 ns.

La possibilitat de modificar els paràmetres de control permet l'execució de tests experimentals del comportament del convertidor amb diferents jocs de paràmetres i la seva optimització al laboratori. Quan un conjunt de paràmetres es considera òptim per una aplicació determinada, poden emmagatzemar-se de forma permanent en ROM.

4. MODEL MATEMÀTIC DE PETIT SENYAL I FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA DEL CONVERTIDOR

El diagrama de blocs del convertidor i del controlador per petit senyal es mostra a la Fig. 4.

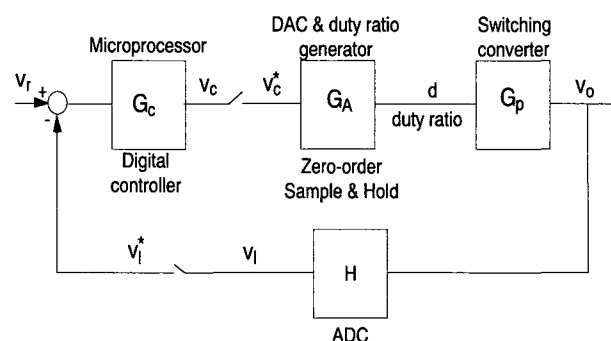


Figura 4. Diagrama de blocs del sistema de control basat en microprocessador.

Nota: totes les notacions es refereixen a la modelització de petit senyal. Els senyals marcats amb * corresponen a senyals mostrejats.

Si es suposa un comportament lineal del DAC i del generador de la relació de conducció dels transistors de potència, que tradueixen un codi digital (en el rang de 0 a 255) en una relació de conducció (que varia de 0 a 1), la funció de transferència G_A es pot escriure com a (3)

$$G_A(s) = \frac{1}{255} \frac{1 - e^{-T_s s}}{s} \quad (3)$$

a on T_s és el període de mostreig imposat pel temps d'execució de l'algorisme de control ($T_s \approx 0,65$ ms). Aquest període es pot reduir fins a 0,40 ms si s'usa codi en assamblador, en lloc d'escriure el programa en llenguatge C.

Pel cas de l'ADC, que inclou una circuiteria de condicionament, s'ha establert un rang de sortida digital de 0 a 255, quan l'entrada analògica varia de 0 a 25 V. En aquest cas, la funció de transferència és a l'equació (4) i no cal explicitar la funció de transferència del circuit de mostra-retenció (sample & hold), degut a que treballa a la mateixa freqüència de mostreig del sistema.

$$H(s) = \frac{255}{25} \quad (4)$$

La funció de transferència del convertidor commutat és més complexe i es pot escriure com a l'equació (5) [3]-[4] si $C_e \gg C_2$:

$$G_p(s) = \frac{V_o}{D(1-D)} \frac{1 - \frac{L_e}{R}s + (1-D)L_e C_e s^2}{\left[1 + \frac{L_e}{R}s + L_e C_e s^2\right] \left[1 + \frac{L_2}{R}s + L_2 C_2 s^2\right]} \quad (5)$$

amb les definicions de les eq. (6) i (7)

$$L_e = \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 L_1 \quad (6)$$

$$C_e = \frac{C_1}{D^2} \quad (7)$$

La funció de transferència de 4t ordre de (5) es pot aproximar per una expressió més simple tenint en compte que per valors de la relació de conducció a l'interval $0,35 \leq D \leq 1$, el seu parell de zeros redueix l'efecte del parell de pols definit per L_e i C_e . Com a conseqüència, els pols determinats per L_2 i C_2 són dominants i es pot escriure una bona aproximació de l'equació de transferència (8):

$$G_p(s) = \frac{V_o}{D(1-D)} \frac{1 - \frac{L_e}{R}s + (1-D)L_e C_e s^2}{1 + \frac{L_2}{R}s + L_2 C_2 s^2} \quad (8)$$

La Fig. 5 mostra la transformació del diagrama de blocs de la Fig. 4 en un diagrama amb realimentació unitària amb la funció de transferència en el pla z del controlador $G_C(z)$ aïllada.

La funció de transferència en el pla z del sistema és:

$$\frac{v_l(z)}{v_r(z)} = \frac{H G_A G_p(z) G_c(z)}{1 + H G_A G_p(z) G_c(z)} \quad (9)$$

Pel controlador, s'ha triat una acció de tipus PID, tal com es veu a l'eq. (10):

$$v_c(t) = K_p v_e(t) + K_i \int_0^t v_e(\tau) d\tau + K_d \frac{dv_e}{dt} \quad (10)$$

i la transformada z corresponent és la (11):

$$G_c(z) = \frac{A z^2 + B z + C}{z^2 - z} \quad (11)$$

amb les definicions donades per les equacions (12), (13) i (14):

$$A = K_p \left(1 + T_s \frac{K_i}{2} + \frac{K_d}{T_s}\right) \quad (12)$$

$$B = -K_p \left(1 - T_s \frac{K_i}{2} + 2 \frac{K_d}{T_s}\right) \quad (13)$$

$$C = K_p \frac{K_d}{T_s} \quad (14)$$

(T_s = període de mostreig)

La definició dels paràmetres de control pot fer-se assignant valors a K_p , K_i i K_d o directament als coeficients A, B i C de la seva transformada z.

Si l'usuari tria el mode d'assignació de paràmetres K_p , K_i , K_d , el programa calcula els valors dels coeficients A, B, C dels coeficients realment utilitzats per l'algorisme de control.

El microprocessador executa, en realitat, dues tasques:

- L'algorisme de control.
- La comunicació amb l'usuari.

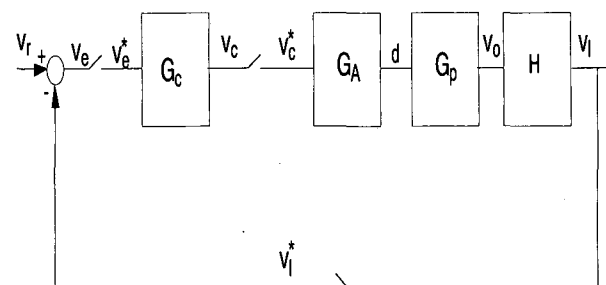


Figura 5. Diagrama de blocs equivalent del sistema de control amb realimentació unitària.

L'algorisme de control realitza l'acció PID expressada per la funció de transferència G_c i controla el funcionament dels convertidors ADC i DAC.

La comunicació amb l'usuari permet la introducció de diferents jocs de paràmetres al controlador per verificar i optimitzar el comportament del sistema.

5. COMPORTAMENT DEL CONVERTIDOR I DEL REGULADOR

Si es compara el període de mostreig, imposat pel temps d'execució de l'algorisme de control del microprocessador, i les constants de temps del convertidor de potència, determinades bàsicament per la capacitat i inductància de sortida del circuit de potència, es comprova que les condicions imposades pel teorema de mostreig es verifiquen sobradament.

Comparant amb realitzacions prèvies desenvolupades als nostres laboratoris [5] -usant un microprocessador de 4 MHz de freqüència de rellotge, sense coprocessador i un convertidor de potència a 40 kHz de freqüència de commutació-, l'increment de la freqüència del rellotge del microprocessador fins a 12,5 MHz, junt amb l'ús de coprocessador, ha permès reduir el temps d'execució de l'algorisme de control aproximadament de 6,5 a 0,65 ms, així com incrementar la freqüència de commutació del convertidor de potència des de 40 kHz a 300 kHz.

6. RESULTATS EXPERIMENTALS

Es donen ara conjunts de paràmetres de control que s'han assajat en el prototipus de convertidor controlat per microprocessador al laboratori. Tots aquests grups verifiquen la condició de compensació de zero i pol, és a dir, el numerador de la funció de transferència de l'eq. (15),

$$G_c(z) = \frac{Az^2 + Bz + C}{z^2 - z} \quad (15)$$

compensa el denominador de la funció de transferència de la planta controlada $H G_A G_P(z)$; veure l'eq. (9).

Paràmetres del controlador

A	B	C
1.0	-0.45008	0.97065
0.5	-0.22504	0.48533
0.1	-0.04501	0.09707
0.01	-0.00450	0.00971
0.001	-0.00045	0.00097

Les Fig. 6, 7 i 8 mostren el comportament del sistema amb $A=0.1, B=-0.04501, C=0.09707$; aquests paràmetres s'han definit a les equacions (12), (13) i (14).

7. CONCLUSIONS

S'han presentat consideracions teòriques i pràctiques pel control en anell tancat de convertidors CC/CC usant un microprocessador de 16 bits amb coprocessador.

El mètode de compensar 2 pols de la planta (el convertidor CC/CC de potència) amb dos zeros introduïts pel controlador, permet un algorisme de control relativament simple i, per tant, reduir el temps d'execució del programa

i l'increment de la freqüència de commutació. Això implica una resposta ràpida del sistema en front de pertorbacions.

Aquestes característiques del software combinades amb un hardware basat en un microprocessador de 16 bits funcionant a 12,5 MHz de freqüència de rellotge i fent ús d'un coprocessador, ha resultat en un temps d'execució de 0,65 ms per l'algorisme de control en el prototipus construït i verificat al laboratori.

Les utilitats de comunicació permeten l'ajust i optimització dels paràmetres emmagatzemats en RAM i la possibilitat d'una posterior introducció a ROM, un cop fixades les característiques òptimes del controlador.

S'han desenvolupat una sèrie d'assaigs amb diferents conjunts de paràmetres dels coeficients PID del regulador i s'han mostrat alguns dels resultats.

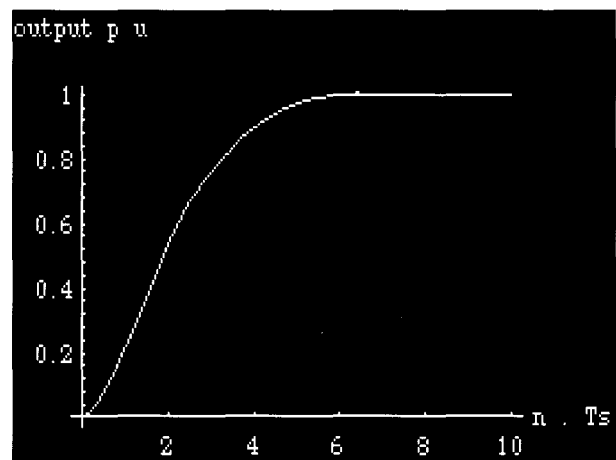


Figura 6. Resposta del sistema a un esglaió unitari de la càrrega amb uns coeficients $A=0.1, B=-0.0451, C=0.09707$ -paràmetres definits a les eq. (12), (13) i (14).

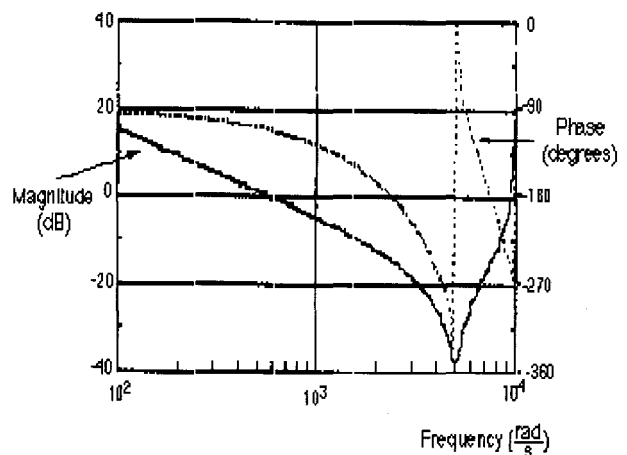


Figura 7. $H G_A G_P(z) G_C(z)$ - Diagrama de Bode del sistema en anell obert amb $A=0.1, B=-0.0451, C=0.09707$.

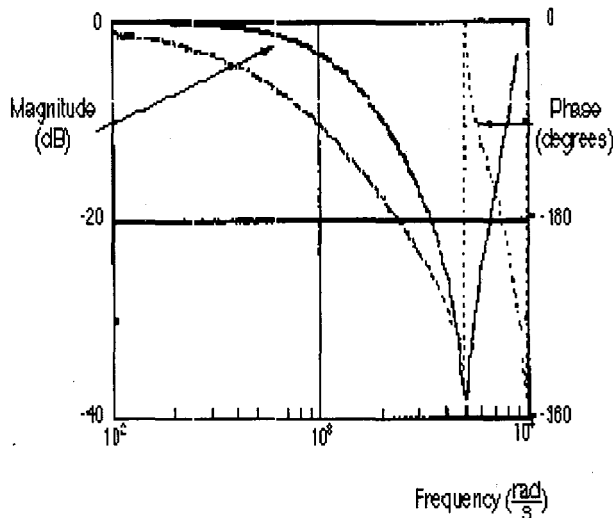


Figura 8. Diagrama de Bode del sistema en anell tancat amb $A=0.1$, $B=-0.0451$, $C=0.09707$.

8. REFERÈNCIES

- [1] J. Peracaula, J. Bordonau i X. Soler, «Analog versus digital control of a power converter: a performance comparison on controlled and switching converters,» en els *Proc 2nd European Conf on Power Electronics and Applications (EPE'87)*, setembre 1987, pàg. 739-744.
- [2] C. Hu i R. M. White, «Solar Cells. From basic to advanced systems,» McGraw-Hill Book Co, USA, 294 pàg. 1983.

[3] A. Poveda, L. Martínez, J. Cabestany i J. Bordonau, «Small signal model of a Cuk-type PWM shunt regulator,» en els *Proc MELECON'87 & 34th Congress on Electronics*, 1986.

[4] R. D. Middlebrook i S. Cuk, «Advances in Switched-Mode Power Conversion,» TESLACO, EE.UU., Vol I - II, 1983.

[5] J. Bordonau i J. Peracaula, «Microcomputer Control of Switching Converters,» en els *Proc Symp on Mini and Microcomputers and their Applications MIMI'88*, juny 1988, pàg. 55-58.

Joan Peracaula Roura

Catedràtic del Dept. d'Eng. Electrònica de la UPC des de 1971. Ha estat Director Tècnic d'ASEA i AEG, Director del Centre Nacional de Microelectrònica del CSIC i Director de l'E.T.S. d'Enginyers Industrials de Barcelona. Actualment és responsable del programa de doctorat d'Eng. Electrònica. Les seves àrees d'interès són el disseny, modelat i simulació de convertidors electrònics de potència, dels seus sistemes de control i les seves aplicacions.

Josep Bordonau Farrerons

Prof. Titular del Dept. d'Eng. Electrònica de la UPC des de 1990. Premi extraordinari de doctorat de la UPC. Actualment és sots-director de recerca del Dept. d'Eng. Electrònica de la UPC. Les seves àrees d'interès són el disseny, modelat i simulació de convertidors electrònics de potència, dels seus sistemes de control i les seves aplicacions.

* Aquest treball s'ha finançat amb el projecte no. PA86-0193 de la Comisión Interministerial de la Ciencia y la Tecnología (CICYT) - Ministerio de Educación y Ciencia. i s'ha presentat a la European Space Power Conference (ESPC), organitzada per l'European Space Agency (ESA), celebrada a Graz (Austria), del 23 al 27 d'agost de 1993.

Nota Farcida:

"Se han demostrado que las cosas no pueden ser de otra manera distinta a como son, ya que como todas las cosas han sido dispuestas en orden a un fin determinado, deben servir necesariamente para lo mejor. Es sabido que las narices son para llevar gafas -por lo tanto nosotros disponemos también de gafas; los pies están evidentemente adaptados para llevar zapatos - por consiguiente disponemos también de calzado - las piedras están para ser talladas y utilizadas en la construcción de palacios, y como consecuencia de ello nuestro misericordioso señor tiene un magnífico palacio."

Cándido o el Optimismo (1759)

Voltaire hace que Pangloss, el preceptor de la Corte, instruya al joven Cándido.

Nota: "Cuidado con lo que deseas porque acabarás por conseguirlo"