

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

切換式電源供應器關鍵性技術之研發—子計畫(六)負載與輸入電壓變化對切換式直流轉換器動態性能分析與控制器之研發

(Dynamical analysis and controller design of switching-type dc converter due to load change and input voltage variation)

計畫編號：NSC 88-2213-E-009-104

執行期間：87年 8月 1日 至 88年 7月 31日

主 持 人：廖德誠 交通大學電機與控制工程系副教授

一、中文摘要

新一代的網路型切換式電力系統，例如 Power Electronic Building Block (PEBB) 網路型方式的架構中，轉換器的輸入電壓與負載的變化範圍將變大且不易估測，可能使系統產生不穩定輸出電壓，甚至導致“渾沌現象”的發生；電路若因系統參數(如輸入電壓)的變化發生“渾沌現象”時，將產生各種頻率的渾沌信號，這種信號無法利用各種濾波器來加以消除，因此，切換式電力電子電路之非線性動態特性的分析與控制成為一個相當重要的研究課題，就我們的瞭解國內並未有專家學者與產業界從事類似的研究。經與電力電子推動小組成員討論，此方面之研究屬於前瞻性尖端科技的研發符合推動小組的規畫目標。在此計畫中，我們由系統的模型出發，以分叉理論來探討系統可能出現的非線性、不穩定的動態特性，研究及設計可行的控制器以改善系統特性，提昇電路性能。同時，我們亦將研究負載變化對直流輸出及系統暫態性能的影響，以改進系統效能，提高電路的穩定性。所以，本計畫將讓我們能更進一步瞭解電力電子電路的系統動態特性，進而控制或消除系統可能產生的不穩定性，使系統能提昇能量效率並符合靜態及動態性能的要求。

本計畫以資料取樣與諧波平衡的方法，針對切換式電力電子系統的轉換器動態特性，如振盪週期解的預測、非連續時域模型與穩定性分析、兩倍週期振盪的穩

定化等，以及對系統可能發生的渾沌現象加以分析與控制。其研究目標主要分為下列兩個方向：(1) 在 DC/DC 轉換器方面，以我們初步的研究成果為基礎，進一步探討 DC/DC 轉換器的動態特性，諸如標準的 buck、boost 及 resonant 轉換器、估測系統不會產生渾沌現象的輸入電壓之容許變動範圍、設計避免渾沌現象發生的控制法則與實際電路、研究如何使系統直流輸出值不會隨著輸入電壓及負載電阻變化而變動的控制法則；(2) 在 AC/DC 轉換器方面，我們將研究單相與三相 AC/DC 轉換器的動態分析與初步的控制法則設計。本計畫將針對不同應用中，研究負載與輸入電壓變化對切換式直流轉換器動態特性的影響，研發其可行的關鍵性技術，以改進切換式電源供應器之性能，提升國內電力電子之技術層面，促使國內的產業升級，增進產學合作的機會，提昇我國的工業水準。關鍵詞：切換式轉換器、渾沌現象、分叉理論、諧波、資料取樣方法、諧波平衡

Abstract

It is known that the chaotic behavior could appear in switching-type DC-DC converters, which could not be eliminated by the traditional approach. As the need of network type electrical power system increases, the analysis and control of chaotic behavior become very important issues in converter design. In this

project, we will employ the sampled-data approach and harmonic balance method to study the nonlinear dynamic and control of switching-type DC converter with respect to the large variation of input voltage and output power load. Moreover, we will also cover the study of AC-DC converters. The proposed works include (i) the study of the dynamic behavior of DC-DC converters: buck, boost and resonant type; (ii) an estimate of the allowed variation range of input supplied voltage and the output power loads without the occurrence of chaotic behavior; (iii) the design of the control laws and the required circuits for the elimination of chaotic behavior in DC-DC converters; (iv) the design of the control laws for guaranteeing the required DC output value of DC-DC converters disregard of input voltage and load change; (v) the study of the nonlinear dynamical behavior and control laws of general single-phase AC-DC converters; (vi) a study of an example three-phase AC-DC converter proposed by Prof. Pan.

Keywords: switching-type converter, chaos, bifurcation theory, harmonics, sampled-data method, harmonic balance

二、計畫緣由與目的

1、背景說明及計畫重要性

由許多的研究報告發現，渾沌 (chaos) 現象廣泛地出現在非線性系統的動態特性上，渾沌是一種有界的 (bounded)、非週期的 (aperiodic)、類似雜訊的 (noise-like) 振盪現象；當渾沌現象發生時，系統的特性是無法預測的隨機行為，以致無法有效地加以控制進而得到理想的輸出特性。過去，在數學及物理的領域中，渾沌理論一直被大量地研究與討論，且已有相當的研究成果，而最近開始被廣泛地研究及應用於工程領域中，例如在切換式電力電子系統，即發現許多存在渾沌現象的電路，但通常不受重視而被忽略，以致影響整個系統的性能。所以，於電力電子領域中，為了充分瞭解電路的動態特性進而提昇其性能，渾沌現象的分析

與控制是一個相當值得研究的課題。

近年來，在許多簡單的非線性電子電路中已經發現與驗證渾沌現象的存在，其中，當輸入電壓或負載有較大變化時，切換式電力電子轉換器 (switching-type converter) 普遍均存在此種特性。而此種非線性的特性通常造成電路不可預期的不穩定性，這些不穩定性包含

“分叉現象” (bifurcations)、“渾沌現象”

(chaos) 及“次諧波現象” (subharmonics)。切換式轉換器由於電流諧波的產生與系統阻抗相互作用的影響，在電力電子系統中造成了輸出電壓的失真，降低系統性能，所以，如何分析、設計、控制與穩定化是改進切換式轉換器性能的重要課題。

在一般的切換式電力電子系統中，由於其工作模式的輸入電壓與負載的變化不大，所以，於設計切換式轉換器時，對於電路中所產生的高頻諧波 (harmonics) 雜訊可利用一個低通率波器加以消除，以得到良好的輸出波形。然而，就新一代的網路型電力系統的架構 (例如 Prof. F.C. Lee 所參與的美國海軍研究計畫) 而言，除了電力供應源及負載外，整個電力系統是由一些所謂的 PEBB (Power Electronic Building Block) 以並聯或串聯的網路方式連接而成。每一個 PEBB 皆假設其具有內建濾波器、半導體切換式電路及智慧型穩定控制器。這些 PEBB 可能為 DC-to-DC、AC-to-DC、DC-to-AC 或 AC-to-AC 之電力轉換器，這些轉換器皆可為電力電子切換式轉換器，在這類系統中，轉換器的輸入電壓與負載的變化範圍將變大且不易估測，可能使系統產生不穩定輸出電壓，甚至導致“渾沌現象”的發生，如此，系統將產生各種頻率的渾沌信號 (chaotic signal)，這種信號無法利用各種濾波器來加以消除，而使系統產生不穩定的非線性動態特性，所以，電力電子系統的非線性諧波與渾沌現象的分析與控制將成為未來研發的一個重要研究課題。

在本計畫中，我們由系統的模型出發，以渾沌理論 (chaos theory) 與分叉理論 (bifurcation theory) 來探討系統

可能出現的非線性、不穩定的動態特性，以改善系統特性，提昇電路性能。同時，我們亦研究負載變化 (load change) 對直流輸出及系統暫態性能的影響，以改進系統效能，提高電路的穩定性。藉由本計畫對於輸入電壓與負載變化對切換式轉換器動態特性的影響分析與研究，希望能對未來相關產業關鍵性技術的研發，奠定良好的基礎。

2、研究目的

在本計畫中，我們探討單一切換式轉換器對於輸入電壓及負載有較大變化之非線性動態特性與系統性能之影響。由於未來的電力電子網路型系統中，切換式轉換器的輸入電壓可能遭遇較大的變化範圍，使系統可能產生不穩定輸出電壓，甚至導致“渾沌現象”的發生，以致系統產生不穩定的動態特性。就我們的瞭解國內並未有專家學者與產業界從事類似的研究，經與電力電子推動小組成員討論，此方面之研究屬於前瞻性尖端科技的研發符合推動小組的規畫目標。所以，在本計畫中，我們的研究目標可分為下列兩個方向：(1) 在 DC/DC 轉換器方面，以我們初步的研究成果為基礎，進一步探討 DC/DC 轉換器的動態特性，諸如標準的 buck、boost 及 resonant 轉換器、估測系統不會產生渾沌現象的輸入電壓之容許變動範圍、設計避免渾沌現象發生的控制法則與實際電路、研究如何使系統直流輸出值不會隨著輸入電壓及負載電阻變化而變動的控制法則；(2) 在 AC/DC 轉換器方面，我們將依據潘晴財教授 1997 年所提出的三相模型，研究單相與三相 AC/DC 轉換器的動態分析與初步的控制法則設計。

三、 結果與討論

在 DC/DC 轉換器方面，我們獲得如下的成果：

(一) 模擬演算法的改進，我們改進[1]中的模擬演算法，運用 MATLAB 設計模擬程式。避免求解複雜非線性方程式使計算過程減少以降低其誤差，並增加每一模擬時間間隔的連續性，亦即在其中不用固定參數的

式子計算下一時間的各變數值而仍以狀態方程式持續下一時間的計算，對於狀態轉換臨界點，我們捨棄[1]中的牛頓法求解，而改以二分法逼近求解，如此可減少運算次數增加精確度並有效簡化演算法提高運算速度。由已知的模擬結果看出可精確地預測次諧波、分叉及渾沌現象，並較 Pspice 正確及愈快收斂。如圖一為 MATLAB 所模擬出的 buck 轉換器當輸入電壓改變時所發生的渾沌波形。

(二) 改良轉換器模型及分析分法，並依此進行分析發展控制方法。一般的切換式轉換器我們能以圖二來表示，其中

$h(t)$ ：斜坡函數

V_c, V_s, V_o ：偏移電壓、電源直流電壓、輸出電壓

S_1, S_2 ：“開”和“關”的動態函數

$clock$ ：於電流模式 (current mode) 使用的同步時序。

於連續導通模式下，系統在“開”或“關”的狀態方程式為

$$S_1: \dot{x} = A_1x + B_1u$$

(1)

$$S_2: \dot{x} = A_2x + B_2u$$

(2) 就 DC/DC 轉換器而言，若斜坡函數的週期為

T ，則此轉換器存在週期 T 之週期函數的條件為：

(i) 電流模式：

$$Cx(kT+d) = h(kT+d) + V_c$$

(3)

$$\dot{x} = A_1x + B_1V_s \text{ for } t \in [kT, kT+d]$$

(4)

$$\dot{x} = A_2x + B_2V_s \text{ for } t \in [kT+d, (k+1)T]$$

(5)

(ii) 電壓模式：

$$Cx(kT+d) = h(kT+d) + V_c$$

(6)

$$Cx(kT) = h(kT) + V_c$$

(7)

$$Cx(t) > h(t) + V_c \text{ for } t \in (kT, kT+d)$$

$$(8) \quad Cx(t) < h(t) + V_c$$

for $t \in (kT+d, (k+1)T)$

$$(9) \quad \dot{x} = A_1 x + B_1 V_s \text{ for } t \in [kT, kT+d)$$

$$(10) \quad \dot{x} = A_2 x + B_2 V_s \text{ for } t \in [kT+d, (k+1)T)$$

(11) 其中， $kT+d$ 為切換時， $k=0,1,2,\dots$ ，且假設轉換器每週期切換一次。DC/DC 轉換器離散系統模式能以下列方程式來表示

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= f(x_n, V_{sn}, d_n) \\ &= e^{A_2(T-d_n)} (e^{A_1 d_n} x_n + \int_0^{d_n} e^{A_1(d_n-\sigma)} d\sigma B_1 V_{sn}) \\ &\quad + \int_{d_n}^T e^{A_2(T-\sigma)} d\sigma B_2 V_{sn} \end{aligned}$$

(12)

且其限制方程式為

$$\begin{aligned} g(x_n, V_{sn}, V_c, d_n) &= C(e^{A_1 d_n} x_n \\ &\quad + \int_0^{d_n} e^{A_1(d_n-\sigma)} d\sigma B_1 V_{sn}) - h(d_n) - V_c = 0 \end{aligned}$$

(13) 其中，下標 n 表示第 n 個時間間隔。利用分叉理論，我們可以分析系統 (12) 是否存在週期解及其穩定特性，另外，我們也應用狀態迴授 (state feedback) 的控制法則，以 V_c 為控制變數，另外也可使用動態 $h(t)$ 來確保週期解之穩定。我們利用取樣系統模式在轉換器固定操作頻率或變動操作頻率下，應用靜態輸出迴授或動態輸出迴授設計控制器，並設計狀態觀察器確定狀態可觀察。例如若轉換器操作在變動頻率，我們使用 d_n 及 T_n 為控制變數，則其取樣動態及線性化動態如下：

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= f(x_n, V_{sn}, d_n, T_n) \\ &= e^{A_2(T_n-d_n)} (e^{A_1 d_n} x_n + \int_0^{d_n} e^{A_1(d_n-\sigma)} d\sigma B_1 V_{sn}) \\ &\quad + \int_0^{T_n-d_n} e^{A_2 \sigma} d\sigma B_2 V_{sn} \end{aligned}$$

(14)

$$\approx \hat{A}_d \hat{x}_n + \hat{B}_v \hat{V}_{sn} + \begin{bmatrix} \hat{B}_d & \hat{B}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d}_n \\ \hat{T}_n \end{bmatrix}$$

(15)

再設計其狀態迴授控制。

(三) 我們針對 1998 年 CHENG[2] 所提出的零電流切換交換電容轉換器 (高效率、高電力密度 (power density)、低 EMI 效應) 修正其模型，考慮負載、元件內阻效應及切換時間，利用動態數學分析而非傳統狀態平均法推導其零電流切換條件及電壓轉換數學式，為了調整 (regulate) 其輸出電壓，依據動態分析結果提出類似 [3] 之 live-time 控制法以取代傳統 PWM。圖三為 β (live-time ratio)、負載與倍壓式零電流切換交換電容轉換器平均輸出電壓的關係圖。

(四) 在 AC/DC 轉換器方面，如圖四一 boost 功率因數修正系統，輸出電壓和輸入電流的動態分別可由可變結構方程式 (16) 和 (17) 所支配。

$$L \dot{i}_s = e_s(t) - i_s R - (2S_a^+ - 1)v_o$$

(16)

$$C \dot{v}_o = (2S_a^+ - 1)i_s - i_o$$

(17)

而 S_a^+ 是用來表示 boost 開關的開關狀態， $S_a^+ = 1$ 表示開關 T_a^+ 是導通， $S_a^+ = 0$ 則為不通。則系統方程式可變為標準奇異擾動形式，其中 $\varepsilon = \frac{I_o L}{V_o C}$

$$\varepsilon \dot{i}_s = \frac{I_o}{C} \left[\frac{e_s(t)}{V_o} - \frac{i_s R}{V_o} - \frac{v_o}{V_o} (2S_a^+ - 1) \right]$$

(18)

$$\dot{v}_o = \frac{I_o}{C} \left[\frac{i_s}{I_o} (2S_a^+ - 1) - \frac{i_o}{I_o} \right]$$

(19)

我們可利用時間等級 (time-scale) 分離 [4] 來簡化如圖四單相交流對直流切換式功率因數修正器 (AC/DC switching-type power factor corrector) 之控制器的設計。故單相交流對直流切換式功率因數修

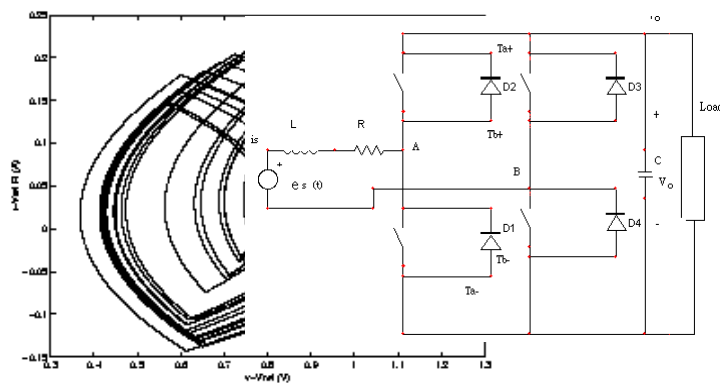
正器可將電流迴路控制器及電壓迴路控制器分開設計。

四、 計畫成果自評

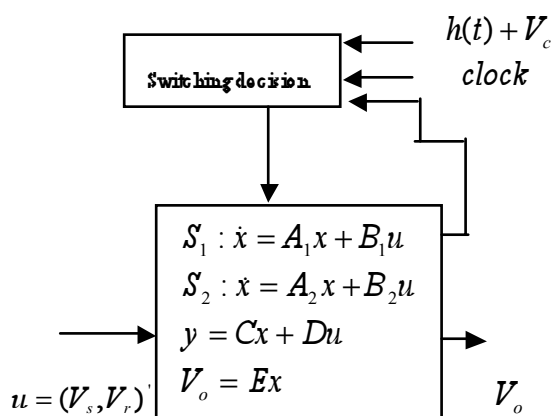
本計畫的主要目的是探討負載與輸入電壓變化對切換式直流轉換器動態性能影響之分析與控制器之研發。就計畫而言，我們已達到預期的成果。部份成果成為研究生碩士論文[5]並投稿於 IEEE PESC 2000 [6]及 2000 自動控制研討會[7]。

五、 參考文獻

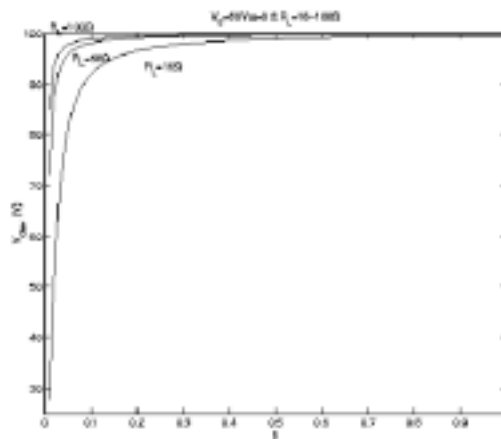
- [1] D.C. Hamill, J.H.B. Deane and D.J. Jefferies, "Modeling of chaotic dc-dc converters by iterated nonlinear mappings", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, No.1, January 1992, pp 25-36.
- [2] K.W.E. Cheng, "New generation of switched capacitor converters", IEEE PESC 1998, Vol. 2, 1998, pp. 1529-1535.
- [3] T. Suetsugu, "Novel PWM control method of switched capacitor DC-DC converter", Proc. 1998 IEEE ISCAS, Vol. 6, 1998, pp. 454-457.
- [4] S. Wall and R. Jackson, "Fast controller design for practical power-factor correction system", 1993 IEEE-IAS Rec, pp. 1027-1032.
- [5] Y.C. Lin, Analysis of Resonant Switched Capacitor DC-DC Converters, M.D. Thesis, Dept. of Electrical and Control Engineering, National Chiao-Tung Univ., 1999.
- [6] D.C. Liaw and Y.C. Lin, "Analysis of A Resonant Switched Capacitor DC-DC Converters", submit to IEEE PESC 2000.
- [7] 廖德誠及林益成, "共振式交換電容直流對直流電源轉換器之分析", 投稿於 2000 自動控制研討會。



圖一



圖二



圖四