

具有分流控制器之多通道家畜致昏器的實現

吳文誌¹ 范淑媛¹ 曾聖有² 張耿魁¹

¹吳鳳科技大學 電機工程系

²長庚大學 電機工程系

摘要：本論文提出具有分流及多通道特性的智慧型人道致昏器。本系統包含驅動致昏系統的交錯式降昇壓轉換器(interleaved buckboost converter)、產生致昏電壓的全橋式轉換器(full bridge inverter)、產生擾動電壓促進皮膚阻抗崩潰的半橋式轉換器(half bridge inverter)及提供致昏系統各通道均等電流的分流控制器。因此可藉由降低宰殺過程中家畜的緊張感以提升家畜肉質。本論文製作一個具有 $\pm 160V$ 致昏電壓，輸出功率 320W 的多通道家畜致昏系統以驗證其效能，實驗結果顯示本論文所提出的致昏系統相較於沒有分流機制的系統可以增加 10% 的昏迷效果，因此得以改善肉質。使用本論文所提出的方法可以較少的元件需求得到較佳的效能，使得多通道家畜致昏器系統更加輕薄短小。

關鍵詞：家畜致昏器、單電容截止緩衝器、半橋式轉換器、全橋式轉換器。

Abstract : This paper presents an intelligent humane stunner for a multi-channel poultry stunning system with current sharing features. This proposed system consists of an interleaved buckboost converter for driving the stunning system, a full bridge inverter for generating the stunning voltage, a half bridge inverter for generating dither voltages to expedite the breakdown of skin impedance, and a current sharing controller for providing uniform current to each channel of the stunning system. Hence, the slaughtering quantities of poultry can be increased, and also can reduce poultry stress and improve carcass quality during stunning interval. In this paper, a multi-channel poultry stunning system with $\pm 160V$ stunning voltage and 320W output power is implemented for verifying its performance. Experimental results shown that the proposed stunning system can raise 10% more coma effectiveness over the one without current sharing algorithm, thus improve carcass quality. Hence, with this approach, fewer components are needed to achieve the better performance, resulting in a multi-channel poultry stunning system with lighter weight and smaller size.

壹、前言

以人道角度而言，必須讓被宰殺的家畜失去知覺直到因放血而使大腦完全失去反應為止[1]。人道宰殺常用的兩種方法為：二氧化碳(CO₂)和手動電擊致昏[2]。因為二氧化碳致昏法有較多的限制且成本較高，因此電擊法是最經濟有效的家畜致昏方式[3]。



藉由電氣方法產生具有僵直和陣攣兩階段特性的癲癇發作使家畜失去知覺，可使其在宰殺過程中沒有疼痛的感覺。造成癲癇的程度取決於電流的大小與通過大腦的面積。以鵝為例，致昏電流在大約 300mA ~ 350mA 時需持續至少 6 秒[4]。欲產生指定的電量，習慣上必須先將已整流過的交流電或直流電以功率開關轉換為方波，再以低頻昇壓變壓器提升電壓。此外，如圖 1(a)的傳統致昏器僅使用兩個電極，此法容易造成骨折和瘀血使肉質變差。為解決此問題，有人提出具有 PWM 控制和擾動電壓產生器的直流/直流轉換器以驅動多電極的致昏系統[5, 6]。此種轉換器可以適當地限制電流準位，調整輸出電壓及在宰殺過程降低家畜的緊張。文獻[4]提出如圖 1(b)所示的六電極致昏系統。考量控制的複雜度和電路架構，本論文提出如圖 1(c)所示的四電極架構致昏系統。

為加速家畜的宰殺數量因此需要一個多通道的家畜致昏系統。但是家畜的昏迷效果取決於流經家畜大腦的電流量，所以分流控制器對多通道的家畜致昏系統而言是相當重要的角色，它提供各通道均等電流使家畜肉質更佳且更為人道。為達到這個目的，本論文提出一種具有分流控制器的智慧型多通道人道致昏系統，如圖 2 所示。本系統包含驅動致昏系統的交錯式降昇壓轉換器(interleaved buck-boost converter)、產生致昏電壓的全橋式轉換器(full bridge inverter)、產生擾動電壓的半橋式轉換器(half bridge inverter)及提供致昏系統各通道均等電流的分流控制器。相較於六電極架構的致昏系統，本論文所提出的四電極架構致昏系統具有尺寸小、重量輕、成本低廉及高轉換效率的優點。

貳、家畜致昏的基本原理

以電擊方式致昏家畜所設定的電擊參數對昏迷效果有很大的影響。為決定所需電擊參數，以下將簡述家畜的阻抗特性和家畜致昏的機制。

A. 家畜的阻抗特性

在致昏家畜的方法中，癲癇發作的程度與流過家畜大腦的電流值有高度的關聯性。施加於家畜上的電壓必須大到足夠擊穿家畜的皮膚以產生致昏電流。比較家畜與人類的組織，除了數值不同之外，他們的電氣特性及等效電路相當類似。因此可利用人類皮膚的特性對家畜致昏的機制作定性分析。研究人類皮膚的電氣特性已經超過一個世紀且通常以圖 3 的阻抗頻譜(impedance spectra)來表示其特性[7]。很多研究者都採用如圖 4 所示的等效電路來表示皮膚的電氣特性，主要是由電阻 R_S 與電阻 R_{SC} 及電容 C_{SC} 的並聯電路串聯所組成。實驗證實皮膚電容和電阻兩者都與接觸面積大小有關。由圖 5 之皮膚阻抗與電壓的關係圖顯示皮膚阻抗與外加電壓成反比[9]。

B. 家畜致昏的機制

一般而言，神經元(neurons)主要分成細胞體(soma)、軸索(axon)及樹狀突(dendrite)三部份。刺激信號是由位於真皮(dermis)或皮下層(subcutaneous layer)的感知接收器所偵測。如圖 6 所示，當感知接收器(sensory receiver)接收到刺激信號時，會將刺激信號轉換成神經脈衝。其傳遞方向為依次從一神經元到另一神經元，直到神經脈衝傳送到大腦的接收器。神經元彼此之間是由一系列的突觸(synapse)相連結。亦即，突觸可



以扮演轉換器的角色，將電的刺激訊號轉換成化學信號或反過來將化學信號轉換成電的刺激訊號。

為解釋電氣致昏與抑制神經脈衝傳遞兩者之間的關係，以圖 7 所示的等效電路說明脈衝信號在神經元之間的傳遞。因為突觸扮演轉換器的角色，可以視為開關 Q_1 。當致昏電壓 E_I 施加於家畜上，其皮膚阻抗 Z_0 進入崩潰狀態，電流 I_1 將會通過家畜的身體。在致昏的過程，如果電流 I_1 足夠大，將會在突觸後的細胞膜感應高電壓 V_1 使開關 Q_1 動作。當開關 Q_1 動作後，會使神經脈衝信號旁路。因此，神經系統會失去傳遞神經脈衝的能力。另一方面，神經脈衝可以經過傳遞阻抗為 R_I 的神經元到達大腦的感知接收器 B_1 。如上所述，電氣致昏可以阻斷神經脈衝的傳遞。

參、致昏器系統的操作原理

如圖 2 所示，本論文所提出的致昏器系統包含有交錯式降昇壓轉換器、擾動電壓產生器、全橋式轉換器及分流控制器。交錯式降昇壓轉換器包含有單電容器截止緩衝器(single-capacitor turn-off snubbers)和耦合電感，可用來提高轉換效率[5]。以半橋式轉換器所實現的擾動電壓產生器用於產生使家畜皮膚阻抗崩潰的擾動電壓 V_d 。使用文獻[10]所提出的同步開關技術整合交錯式降昇壓轉換器及半橋式轉換器的開關。全橋式轉換器將轉換器的直流輸出電壓 V_{DC} 轉換為致昏電壓 V_o 。

因為在各通道的家畜阻抗不同，分流控制器可用於解決多通道家畜致昏系統的電流不平衡問題。圖 8 所示為雙通道分流控制器的詳細電路圖。分流控制器是由諧振電路和變壓器所組成，藉由高頻諧振電壓的耦合，高頻擾動電壓 V_d 可產生高頻諧振擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 。將利用圖 9 所示的等效電路說明本論文所提具有四電極架構分流控制器的操作原理。根據圖 10 所示操作模式等效電路及圖 11 所示的主要波形，本論文所提致昏系統在整個致昏過程的操作原理簡述如下：

操作模式 1[圖 10(a); $t_0 < t < t_1$]

在 t_0 之前，致昏電壓 V_o 等於零，由於開關 R_{A11} 、 R_{A12} 、 R_{A21} 及 R_{A22} 開路，使得擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 也等於零。在 $t = t_0$ 時，致昏電壓 V_o 施加於電極 A_1B_1 與 A_2B_2 之間且導通開關 R_{A11} 、 R_{A12} 、 R_{A21} 及 R_{A22} 。因為致昏電壓 V_o 低於家畜皮膚的崩潰電壓，無法感應足以達到致昏效果的致昏電流。此時，加在電極 A_1C_1 與 B_1D_1 間之擾動電壓 V_{dc11} 及 V_{dd11} 和加在電極 A_2C_2 與之 B_2D_2 間之擾動電壓 V_{dc12} 及 V_{dd12} ，因為諧振效應振幅從零上升到最大值。同時擾動電流 I_{dc11} 、 I_{dc12} 、 I_{dd11} 及 I_{dd12} 也從零上升到一特定值，流經由高阻抗的皮膚 C_{SC} 和低阻抗的家畜組織 R_S 所形成的電流迴路。

操作模式 2[圖 10(b); $t_1 < t < t_2$]

在 $t = t_1$ 時，開關 R_{A11} 、 R_{A12} 、 R_{A21} 及 R_{A22} 持續保持導通，在這段期間，家畜皮膚阻抗隨著擾動電流的逐漸增加而逐漸崩潰。當擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 降至最小值而且擾動電流 I_{dc11} 、 I_{dc12} 、 I_{dd11} 及 I_{dd12} 上升到穩定值時，因為家畜皮膚阻抗值降低，造成致昏電流 I_o 流經家畜身體的內部組織，並且逐漸增加到足夠使家畜致昏的值。

操作模式 3[圖 10(c); $t_2 < t < t_3$]



在 $t = t_2$ 時，皮膚阻抗完全崩潰，因此皮膚阻抗 C_{SC} 和 R_S 近乎零，所以跨在家畜身體內部組織的電壓幾乎等於擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 。在這種情況下，擾動電壓和擾動電流可維持在穩定值，而且致昏電流可穩定地維持在足以使家畜致昏的值。

操作模式 4 [圖 10(d); $t_3 < t < t_4$]

在 $t = t_3$ 時，開關 R_{A11} 、 R_{A12} 、 R_{A21} 及 R_{A22} 斷開，造成跨在電極 A_1C_1 與 B_1D_1 之間以及電極 A_2C_2 與 B_2D_2 之間的電壓變成零，流通的電流亦為零。此時，擾動電壓和致昏電壓可視為串聯連接。另一方面，由於開關 R_{A11} 、 R_{A12} 、 R_{A21} 及 R_{A22} 斷開，擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 會些微增加。在這種情況下，如果在兩個通道的家畜阻抗值相等，且跨在電極 C_1D_1 與 C_2D_2 的電壓均等於致昏電壓 V_o ，則流通的電流相等。但是如果在兩個通道的家畜阻抗值不相等，則擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 會因而改變。這個改變會造成跨在電極 C_1D_1 與 C_2D_2 的電壓分別等於 $V_o + V_{dc11} - V_{dd11}$ 以及 $V_o + V_{dc12} - V_{dd12}$ ，因此達到分流的特性。在結束時間 t_4 時，關斷致昏電壓 V_o 與擾動電壓，完成整個家畜致昏過程。

肆、分流控制器的設計

如圖 8 所示，本論文所提雙通道分流電路是由串聯諧振並聯負載電路和變壓器 T_{r11} and T_{r12} 所組成。依據文獻[6]，此諧振電路的品質因素 Q 必須大到足以在皮膚阻抗崩潰之前可得到高輸入輸出轉換增益值。以下將推導本論文所提分流控制器之設計。

將以圖 12 所示的等效電路分析本論文所提雙通道分流控制器。如圖 12 所，通道 1 和通道 2 的致昏電壓 V_{RS11} 及 V_{RS12} 可分別表示為

$$V_{RS11} = V_o - V_{dc11} + V_{dd11} \quad (1)$$

及

$$V_{RS12} = V_o - V_{dc12} + V_{dd12} \quad (2)$$

R_{S11} 及 R_{S12} 分別表示在通道 1 和通道 2 家畜的皮膚崩潰阻抗， V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 為擾動電壓。

將依據圖 2 所示智慧型多通道人道致昏系統所繪製的擾動電壓等效電路，如圖 13 所示，推導擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} 、 V_{dd11} 及 V_{dd12} 的振幅。在此 R_{ST1} 表示通道 1 和通道 2 在二次側的負載阻抗 R_{S11} 及 R_{S12} 轉換到一次側的並聯組合，可表示為

$$R_{ST1} = R_{ST2} = \left(\frac{R_{S11}}{N^2} // \frac{R_{S12}}{N^2} \right) = \frac{R_{S11}R_{S12}}{N^2(R_{S11} + R_{S12})} \quad (3)$$

其中 N 為變壓器 T_{r11} 的匝數比。

如果圖 8 所示串聯諧振並聯負載電路的諧振電感器 (L_1 和 L_2)、諧振電容器 (C_1 和



C_2)及負載阻抗(R_{ST1} 和 R_{ST2})均相等，根據圖 13 可推導其輸入輸出轉移函數如下式所示

$$\left| \frac{V_{dc}(t)}{V_s(t)} \right| = \left| \frac{V_{dd}(t)}{V_s(t)} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\omega_s}{\omega_o Q_p} \right)^2}} \quad (4)$$

其中 $V_{dc}(t) = V_{dc11}/N$ 、 $V_{dd}(t) = V_{dd11}/N$ 、 $Q_p = R_{ST1}/\sqrt{L_1 C_1}$ 或 $R_{ST2}/\sqrt{L_2 C_2}$ 、 $\omega_o = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ 或 $1/\sqrt{L_2 C_2}$ 、 $\omega_s (= 2\pi f_s)$ 為切換頻率的角速度。電壓 $V_s(t)$ 表示將振幅為 $\pm V_d/2$ 的方波轉換成基本弦波的振幅。由方程式(4)可知擾動電壓 $V_{dc}(t)$ 和 $V_{dd}(t)$ 只受諧振電感器和諧振電容器的影響。因此，若各通道所使用的諧振電感器和諧振電容器相同便可得到等值的擾動電壓。

由圖 12 亦可看出當通道 1 和通道 2 的皮膚阻抗平衡時，在分流電路的擾動電壓不會影響致昏電壓。但若當通道 1 和通道 2 的皮膚阻抗不平衡時，擾動電壓可用來達到分流的特性。再者，圖 8 的變壓器 T_{r11} 和 T_{r12} 可以如圖 14 所示的 π 型電路等效，其中電流 I_{z1} 和 I_{z2} 可分別表示為

$$I_{z1} = I_{C1D1} - I_{Z3} \quad (5)$$

及

$$I_{z2} = I_{C2D2} - I_{Z3} \quad (6)$$

另一方面，電流 I_{z1} 和 I_{z2} 也可分別表示為

$$I_{z1} = \frac{V_o - V_{RS11}}{Z_1} \quad (7)$$

及

$$I_{z2} = \frac{V_o - V_{RS12}}{Z_2} \quad (8)$$

將(5)及(6)式分別代入(7)及(8)式可得

$$V_o = I_{C1D1}(Z_1 + R_{s11}) - Z_1 I_{Z3} \quad (9)$$

及

$$V_o = I_{C2D2}(Z_2 + R_{s12}) - Z_2 I_{Z3} \quad (10)$$

其中電流 I_{Z3} 可表示為

$$I_{Z3} = \frac{I_{C2D2} R_{s12} - I_{C1D1} R_{s11}}{Z_3} \quad (11)$$

當本文所提雙通道分流系統操作在分流的條件時， $I_{C1D1} = I_{C2D2}$ 且 $Z_1 = Z_2$ 。將(11)式代入(9)及(10)式可得到以下的關係式



$$Z_3 = -2Z_1 \quad (12)$$

由(12)式可知當互感之阻抗 Z_3 等於 $-2Z_1$ 時，本文所提出的致昏系統可達到分流特性。

伍、量測結果

為了驗證本文所提致昏系統的效能，製作一個具有下述規格的原型機器：

A. 致昏器

- 輸入電壓 V_i ：24 V_{ac}
- 致昏頻率 f_{S1} ：400 Hz
- 輸出電壓 V_{AB} ：160 V_{ac}
- 最大輸出電流 $I_{o(max)}$ ：2 A
- 最大輸出功率 $P_{o(max)}$ ：320 W

B. 擾動電壓產生器與分流控制器

- 輸入電壓 V_i ：12 V_{dc}
- 切換頻率 f_{S2} ：50 kHz
- 擾動電壓 V_{dc11} 、 V_{dc12} ：20 ~ 200 V_{ac}
- 擾動電壓 V_{dd11} 、 V_{dd12} ：20 ~ 200 V_{ac}
- 最大輸出功率 $P_{o(max)}$ ：20 W

根據家畜皮膚阻抗的特性，在皮膚阻抗崩潰之前其值甚大(約數百 $k\Omega$)，而在崩潰之後其值甚小(約 300 Ω 至 500 Ω 之間)。為驗證本文所提致昏系統的分流特性，崩潰之前的皮膚阻抗 R_{SC} 設定為 50 $k\Omega$ ，而崩潰之後的皮膚阻抗 R_{S11} 及 R_{S12} 設定為 300 Ω 及 500 Ω 。在加入 $\pm 160V/400Hz$ 的方波致昏電壓 V_o 到雙通道致昏系統之後，量測所得的輸出電壓 V_{RS11} 、 V_{RS12} 及輸出電流 I_{C1D1} 、 I_{C2D2} 的波形如圖 15 所示。圖 15(a)所示為不具有分流控制器的波形；而圖 15(b)所示則為具有本文所提分流控制器的波形。由圖 15 可知，具有本文所提分流控制器的系統，兩個通道的輸出電流 I_{C1D1} 、 I_{C2D2} 相等。

從實際致昏火雞之實驗結果得知，在提供 $\pm 160VAC/400Hz$ 致昏電壓及 280mA 致昏電流 4 秒鐘後，其昏迷狀況可持續約 30 秒。圖 16 所顯示的是火雞致昏實驗期間，通道 1 的輸出電壓 V_{RS11} 和輸出電流 I_{C1D1} 以及通道 2 輸出電壓 V_{RS12} 和輸出電流 I_{C2D2} 的波形。如圖 16 所示，在皮膚阻抗崩潰之後，兩個通道的輸出電流是相等的。

由圖 15 及 16 所示可知，致昏電壓產生器可產生致昏電壓供給分流控制器使得每個致昏通道得到相等的電流。因此，本文所提致昏器可以大幅減輕尺寸重量和提高所宰殺之家畜的肉質。

陸、結論

本論文首先回顧利用電氣方式致昏家畜的昏迷機制，接著說明本文所提之雙通道分流控制器的操作與設計原理。最後製作一個具有雙通道分流控制器之家畜致昏系統驗證所提之分流特性。致昏過程的測量結果顯示，在皮膚阻抗崩潰之後兩個通道的致昏電流仍可保持均等。最後，以兩隻火雞實際測試家畜致昏系統，測試結果與模擬測



試結果相同。因此，本論文所提出的多通道家畜致昏器系統具有分流的特性。

參考文獻

- [1] A. Velarde, *et al.*, “Effect of Electrical Stunning on Meat and Carcass Quality in Lambs,” *Trans. on Meat Science*, 2003, pp. 35—38.
- [2] H. A. Channon, A. M. Payne and R. D. Warner, “Comparison of CO₂ Stunning with Manual Electrical Stunning (50Hz) of Pig on Carcass and Meat Quality,” *Trans. on Meat Science*, 2002, pp.63—68.
- [3] A. Velarde, *et al.*, “Effect of Electrical Stunning on Meat and Carcass Quality in Lambs,” *Trans. on Meat Science*, 2003, pp. 35—38.
- [4] S.-Y. Tseng, C.-T. Hsieh, and Y.-H. Su, “Active clamp flyback converter with current sharing scheme for multi-channel poultry stunning applications,” *Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference*, 2008, pp. 1989 – 1903.
- [5] S-Y. Tseng, Y.-H. Su, J.-Z. Shiang, C.-M. Yang, and S.-Y. Fan, “Interleaved buck-boost converter with single-capacitor turn-off snubber using coupled inductor for stunning poultry applications,” *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1964 – 1970.
- [6] S.-Y. Tseng, C.-T. Hsieh, and H.-C. Lin, ”Active clamp interleaved forward converter with single-capacitor turn-off snubber for stunning poultry applications,” *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 450 – 456.
- [7] M. R. Prausnitz, “The Effects of Electric Current Applied to Skin: A Review for Transdermal Drug Delivery,” *Proceedings of the Advanced Drug Delivery Reviews*, Vol. 18, 1996, pp. 395-425.
- [8] U. Pliquet, R. Langer and J. C. Weaver, “Changes in the Passive Electrical Properties of Human Stratum Corneum Due to Electroporation,” *Trans. On Biophysica Acta*, 1995, pp.111-121.
- [9] M. R. Prausnitz, “A Practical Assessment of Transdermal Drug Delivery by Skin Electroporation,” *Proceedings of the Advanced Drug Delivery Reviews*, Vol. 35, 1999, pp. 61-7.
- [10] T.-F. Wu, *et al.*, “Unified Approach to Developing Single-Stage Power Converters,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 211 – 223.

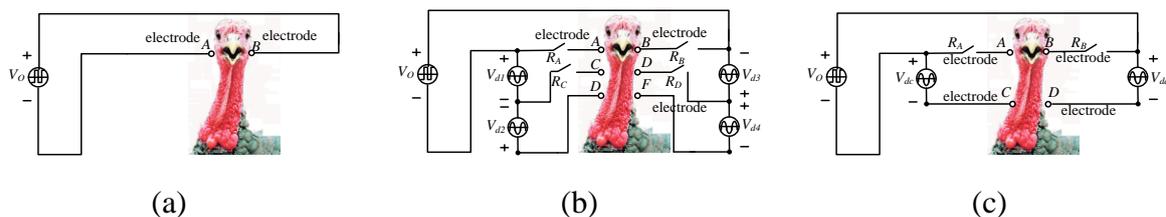


圖 1. 致昏系統，(a) 具有傳統式兩個電極的架構，(b) 具有六個電極的架構，(c) 具有四個電極的架構

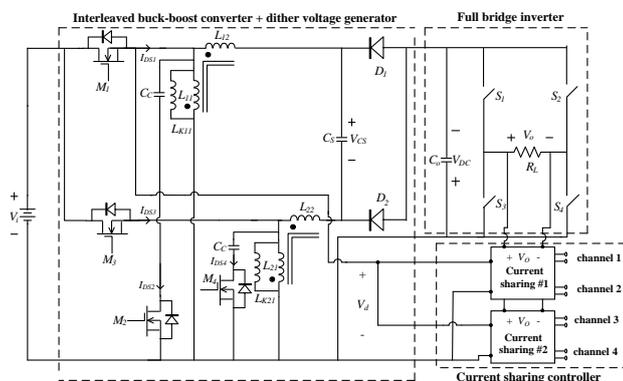


圖 2. 本論文所提出的智慧型通通道人道致昏系統電路圖

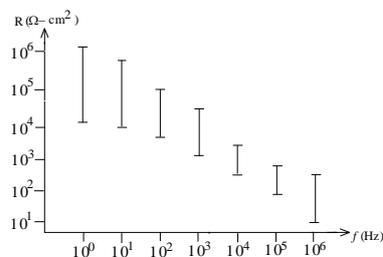


圖 3. 皮膚阻抗範圍與頻率的關係圖

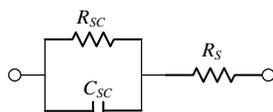


圖 4. 皮膚阻抗的等效電路圖

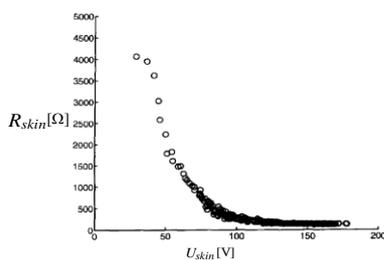


圖 5. 家畜皮膚阻抗與外加電壓的關係圖



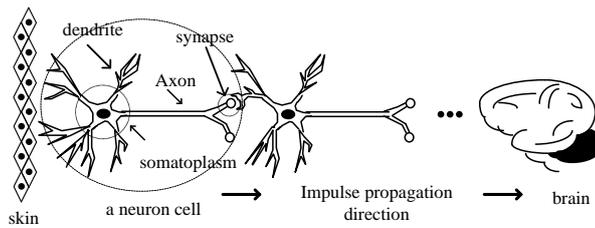


圖 6. 神經元的信號傳輸方式

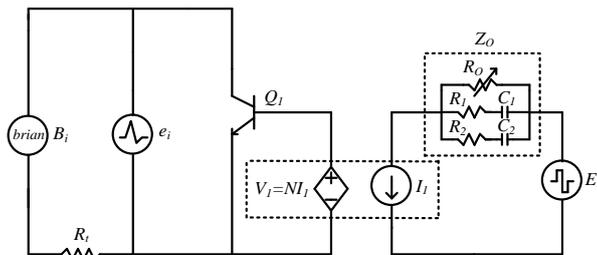


圖 7. 描述神經元之間脈衝信號傳遞的等效電路圖

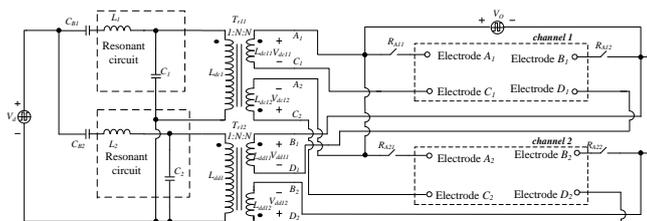


圖 8. 本論文所提分流控制器的電路圖

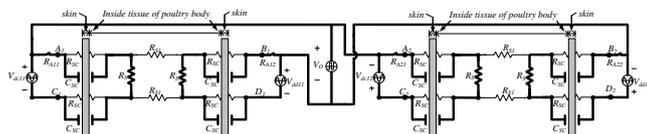


圖 9. 四電極架構的等效電路圖



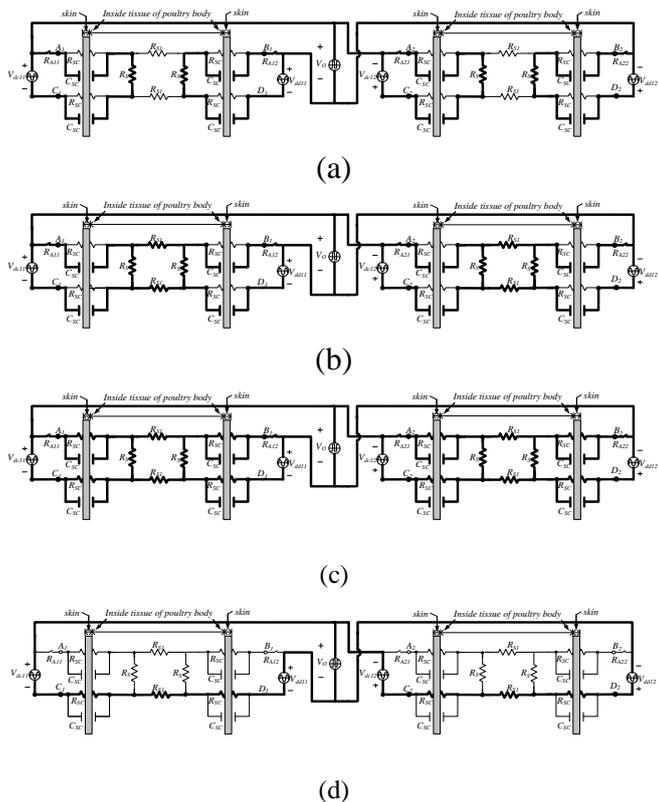


圖 10. 本論文所提致昏系統在整個致昏過程工作模式的等效電路圖

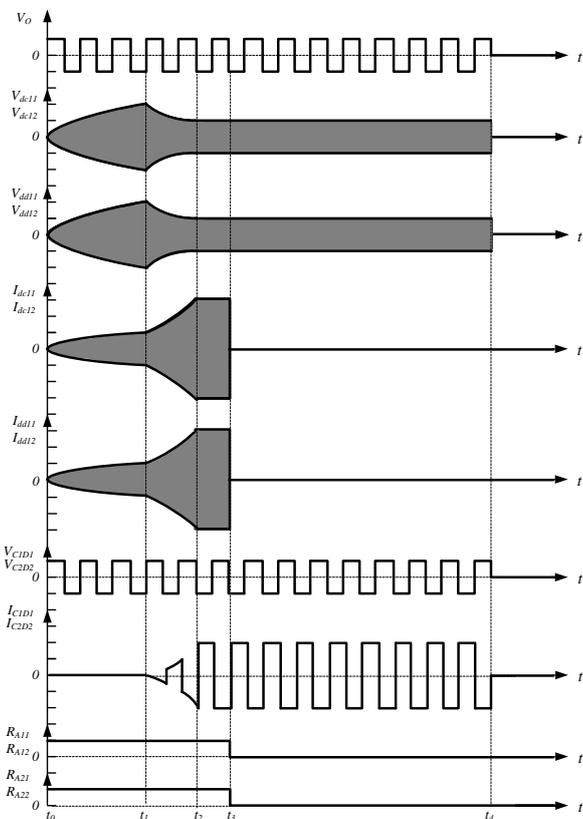


圖 11. 本論文所提致昏系統在整個致昏過程的主要波形



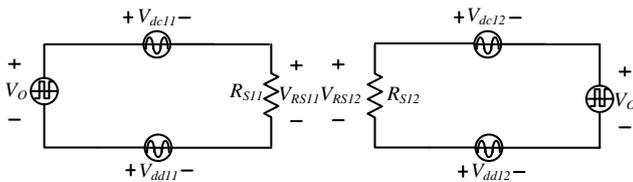


圖 12. 本論文所提雙通道分流控制器的等效電路圖

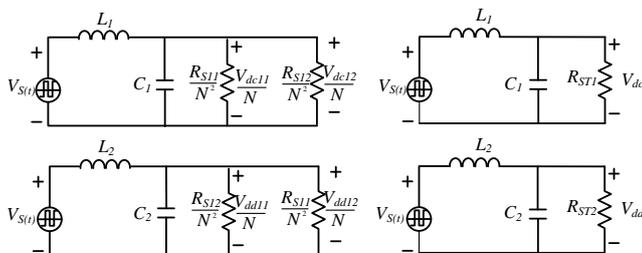


圖 13. 雙通道分流控制器擾動電壓的等效電路圖

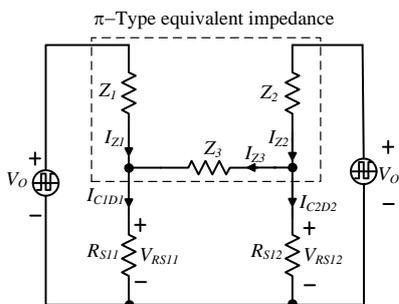


圖 14. 雙通道致昏系統的π型等效電路圖

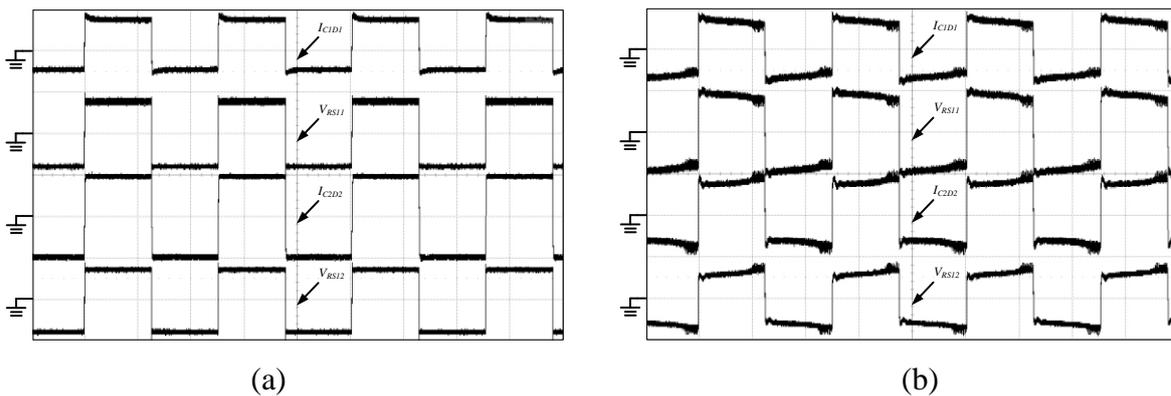
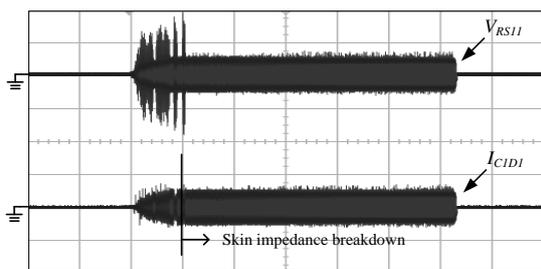


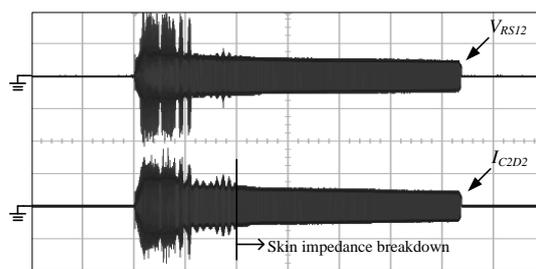
圖 15. 雙通道致昏系統輸出電壓 V_{RS11} 、 V_{RS12} 及輸出電流 I_{C1D1} 、 I_{C2D2} 的量測波形，
(a) 沒有分流控制器，(b)有分流控制器





(V_{RS11} : 200 V/div , I_{C1D1} : 500 mA/div , time : 1 s/div)

(a)



(V_{RS12} : 200 V/div , I_{C2D2} : 500 mA/div , time : 1 s/div)

(b)

圖 16. 火雞致昏過程的量測波形，(a) 通道 1 的輸出電壓 V_{RS11} 及輸出電流 I_{C1D1} ，(b) 通道 2 的輸出電壓 V_{RS12} 及輸出電流 I_{C2D2}

