

대화면 LCD TV용 CCFL 병렬 구동에 관한 연구

張榮洙^{*}, 尹 鉅^{**}, 權基鉉^{***}, 韓翔圭^{****}, 洪成洙[§], 司空石鎭^{§§}, 盧政煜[†]

A Study on the CCFL Parallel Driving Circuit for the large LCD TV

Young-Su Jang, Seok Yoon, Gie-Hyoun Kweon,
Sang-kyoo Han, Sung-soo Hong, Suk-chin Sakong and Chung-wook Roh

요 약

현재 LCD 인버터의 경쟁력을 키우기 위해 인버터 하나로 다수의 램프를 병렬 구동하는 방식이 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 병렬 구동방식 중 Jin Balance와 O2Micro 방식에 대해 이론적으로 분석하고, 특히 각각의 램프 전류 편차를 일정하게 유지하기 위한 자화 인덕턴스 값의 설계에 대하여 설명하였다. 위의 결과를 이용하여 새로운 전류 평형 방식을 제안하고 수학적으로 분석하였으며, 모의실험을 통해 제안 방식의 정확성을 검증하였다.

ABSTRACT

To enhance the competitive edge of the material cost, various techniques lowering the material cost of inverter to drive Cold Cathode Fluorescent Lamp (CCFL) have been developed. In this paper, the theoretical analysis has been done for the existing techniques such as Jin Balance and O2Micro technique. Especially, How to design the value of magnetizing inductance to meet the specification of the lamp current tolerance between lamps has been disclosed. Based on this result, two kinds of hybrid type balancing techniques have been proposed and analyzed mathematically. Also, the accuracy of the proposed techniques has been verified through Pspice simulation.

Key Words : inverter, CCFL parallel driving circuit

1. 서 론

최근 대화면 LCD시장이 확대되면서, TFT-LCD의 발전과 함께 핵심부품인 Backlight의 발전도 동시에 진행되었다. TFT-LCD의 크기가 점차 늘어나고 또한 휘도의 증가 요청이 꾸준히 요구되고 있어 Backlight

의 중요성이 커지고 있다. 또한 점점 대화면화 되고 있는 LCD TV의 시장 규모를 키우기 위해 제품의 가격을 낮추어야 한다. 이를 위해 인버터의 원가절감이 필수이고 이에 여러 개의 램프를 동시 점등할 수 있는 병렬 구동방식들이 연구 개발되고 있다. 본 논문에서는 기존 병렬 구동방식 중 Jin Balance와 O2Micro 방식에 대해 이론적으로 분석하였고, 새로운 전류 평형 방식을 제안하고 수학적으로 분석하였다.

2. Backlight 구동 시스템

2.1 CCFL Backlight 구동 개요

CCFL Backlight를 구동하기 위한 구동시스템을 블록선도로 그림 1에 나타내었다.

[†] 교신저자 : 정회원, 국민대 전자정보통신공학부 조교수

E-mail : drno@kookmin.ac.kr

^{*} 정회원, 국민대 전자공학과 석사과정

^{**} 정회원, 국민대 전자공학과 석사졸업

^{***} 정회원, 삼성전기(주) P&M 사업부 선임연구원

^{****} 정회원, 국민대 전자정보통신공학부 전임강사

[§] 정회원, 국민대 전자정보통신공학부 부교수

^{§§} 정회원, 국민대 전자정보통신공학부 교수

접수일자 : 2006. 7. 28

1차 심사 : 2006. 8. 17

심사완료 : 2006. 9. 11

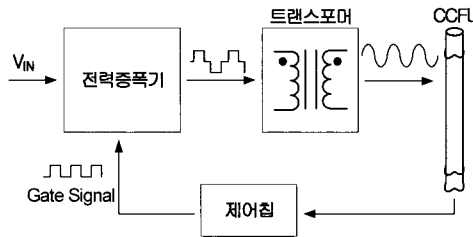


그림 1 CCFL Backlight 블록선도
Fig. 1 Block diagram of CCFL Backlight

CCFL을 구동하기 위한 구동시스템(인버터)은 그림 1과 같이 전력 증폭기, 램프에 인가되는 전압을 상승시키기 위한 트랜스포머 및 램프의 전류를 제어하기 위한 제어칩(Control Chip)으로 구성된다.

전력 증폭기의 경우 효율을 극대화하고 EMI 성능을 고려하여 소프트 스위칭 방식의 일종인 Zero Voltage Switching (ZVS)을 채택한 풀 브릿지 형태가 가장 많이 사용되고 있다.

제어칩은 현재 미국 O2Micro와 대만 Bitek의 IC가 많이 사용되고 있으며, 두 회사 모두 풀 브릿지 형태의 전력 증폭기를 위한 ZVS를 적용하기에 알맞다.

현재까지 LCD 패널의 광원으로 가장 많이 사용되고 있는 것은 Cold Cathode Fluorescent Lamp(CCFL)이다. CCFL은 전기적으로 가변 저항의 성질을 가지고 있다. 점등(Burning) 전에는 수 [MΩ] 이상의 저항을 보이다가 점등이 된 후에는 수 백 [kΩ] 정도의 저항을 나타낸다. 따라서, 일반적으로 점등을 위한 전압(Striking Voltage)이 점등 상태의 전압(Burning Voltage)보다 2~3배 높아야 한다. CCFL에 인가되는 전압은 정현파(Sinusoidal Wave) 형태가 좋은 것으로 알려져 있고 그 이유는 다음과 같다.

- 입력 전력 대비 휘도를 나타내는 광 효율이 우수하다.
- 램프의 수명이 길어진다.
- EMI 성능이 좋다.

하지만, 전력 증폭기의 출력은 구형파이므로, 이를 정현파로 만들기 위해서는 인덕터와 캐패시터로 구성된 LC 필터가 필요하다. 이에 필요한 인덕터는 트랜스포머의 누설 인덕턴스를 이용하고, 캐패시터는 트랜스포머의 기생 캐패시턴스 및 시스템 내에 존재하는 기생 캐패시턴스를 이용하거나 필요시 트랜스포머 2차 측에 병렬로 캐패시터를 달아주기도 한다.

2.2 CCFL Backlight 구동 시스템 기술 동향

대화면 LCD 패널의 경우 화면 휘도의 강도 필요성에 의해 LCD 패널의 크기에 따라 다수개의 램프가 사

용되고 있다. 또한, 램프에서 나오는 빛의 효율적인 이용을 위해, 패널의 바로 밑에 균일한 간격으로 띄어 배치시키는 직하형 방식을 채택하고 있다. 이 경우, 각 램프 밝기의 균일성이 BLU(Back Light Unit)의 성능을 좌우하는 핵심 요소 중의 하나이다. 램프의 휘도는 점등 상태에서 램프에 흐르는 전류의 RMS 값에 의해 결정되기 때문에 램프 휘도의 균일성을 유지하기 위해서는 각 램프 전류의 RMS 값이 같아야 한다.

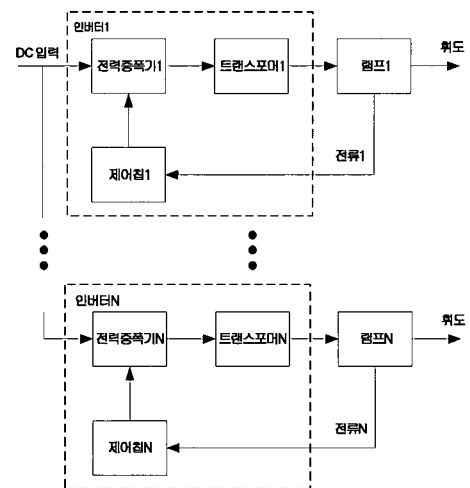


그림 2 다수개의 인버터를 적용한 구동 방식
Fig. 2 Driving circuit based on multi inverter

이와 같이 각 램프의 휘도를 균일하게 하기 위해서 각 램프의 전류를 개별적으로 제어하는 것이 필요하다. 이로 인해, 그림 2와 같이 각 램프에 전력증폭기와 트랜스포머로 구성된 인버터와 이를 제어하기 위한 제어 칩이 별도로 필요하게 되어 원가상승의 요인으로 작용한다. 인버터의 가격을 획기적으로 저감하면서 휘도의 균일성을 보장하기 위해서는 그림 3과 같이 1개의 인버터에 다수개의 램프를 병렬로 구동하는 것을

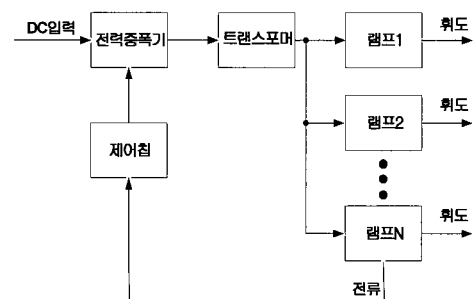


그림 3 한 개의 인버터를 사용한 구동 방식
Fig. 3 Driving method based on single Inverter

생각할 수가 있다. 이 경우, 트랜스포머 1개만을 사용하기 때문에, 램프 1개만의 전류를 제어하더라도 각 램프 전류의 편차를 최소한으로 줄일 수 있어 휘도의 균일성을 획기적으로 높일 수 있다. 그러나 다수개의 램프를 모두 동시에 점등시키는 것이 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 이는 다수개의 램프 중에 먼저 어느 1개가 점등되면, 등가 병렬저항이 먼저 점등된 1개의 저항으로 나타나게 된다. 이 경우, 램프에 인가되는 전압이 낮아져서 점등되지 못한 나머지 램프들은 점등을 위한 충분한 전압을 받지 못하게 되어 점등이 되지 않은 상태로 머물러 있게 되는 것이다.

이상의 단점들을 해결하기 위해, 전류 평형 트랜스포머(Current Balance Transformer)를 삽입하여 다등 점등 및 램프전류 평형을 맞추는 기술이 근래에 활발히 연구되고 있다.

3. 기존 특허 병렬 구동 회로

3.1 O2Micro社의 다등 점등 회로

3.1.1 회로도

O2Micro사에서 제안한 다등 점등 회로는 그림 4에 나타내었다.^[1] T1은 고압 트랜스포머이고, T2는 전류 평형 트랜스포머이다. 이 회로는 인접한 램프와 램프를 전류 평형 트랜스포머로 자기 결합시켜 다등 점등 및 램프 전류 평형을 가능하게 하였다.

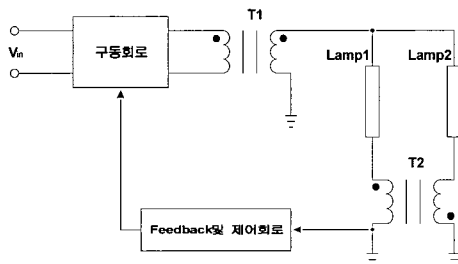


그림 4 O2Micro사 다등 점등 회로
Fig. 4 Multi lighting circuit of O2Micro

3.1.2 전류 평형 원리

전류 평형 원리를 증명하는데 Current Balun의 원리를 이용하였다.^[2]

2개의 램프를 사용한 그림 4의 회로도에서 트랜스포머 T1의 2차측에 인가된 전압을 V_s 라고 가정하고, CCFL은 전기적으로 저항으로 모델링 되므로 Burning 상태의 램프를 저항 R 로 정의하였다. T1의 2차측 회로를 그림 5에 등가적으로 표현하였다.

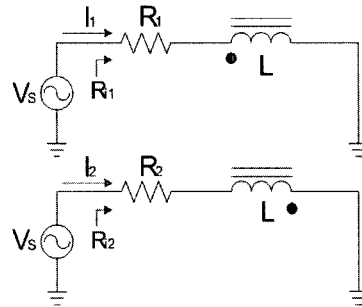


그림 5 O2Micro사의 인버터 2차측 등가회로
Fig. 5 Secondary equivalent circuit of O2Micro

위 등가회로에서 I_1 과 I_2 에 관한 식을 구하여 보면 아래 식 (1), (2)와 같다.

$$V_s = I_1 R_1 + j\omega L I_1 - j\omega L I_2 \quad (1)$$

$$V_s = I_2 R_2 + j\omega L I_2 - j\omega L I_1 \quad (2)$$

식 (1), (2)를 연립하여 I_1 과 I_2 를 구하면 아래 식 (3), (4)와 같다.

$$I_1 = V_s \times \frac{1}{R_1} \times \frac{1 + 2j\omega L/R_2}{1 + j\omega L(R_1 + R_2)/R_1 R_2} \quad (3)$$

$$I_2 = V_s \times \frac{1}{R_2} \times \frac{1 + 2j\omega L/R_1}{1 + j\omega L(R_1 + R_2)/R_1 R_2} \quad (4)$$

I_1 과 I_2 가 동일하기 위해서는 $\omega L \gg 0$ 조건을 만족해야만 한다. ω 는 동작 주파수로 고정되어 있으므로 위의 조건을 만족하기 위해서는 L 값이 커져야만 각 램프 단의 입력 임피던스($=R_i$)가 R_1 , R_2 저항의 평균값으로 수렴하여 I_1 과 I_2 의 전류 평형이 이루어짐을 알 수 있다.

만약, $f=50[\text{kHz}]$, $R_1=100[\text{k}\Omega]$ 이라고 가정하면 I_1 과 I_2 의 전류평형이 이루어지기 위해서 L 값이 $1.6[\text{H}]$ 이상의 큰 값이 필요하게 되므로, 적절한 L 값을 사용하여 I_1 과 I_2 가 일정한 오차 범위 내에 존재하도록 하고자 한다.

R_1 과 R_2 가 10[%] 오차일 때 I_1 과 I_2 의 오차를 3[%] 이내로 만들고자 한다.

$$R_1=100[\text{k}\Omega], R_2=90[\text{k}\Omega], f=50[\text{kHz}]$$

위 조건을 식 (3), (4)에 대입하여 계산해 보면 $L=242[\text{mH}]$ 일 때 I_1 과 I_2 가 3[%] 오차를 갖는다.

3.1.3 모의실험 및 실험을 통한 검증

3.1.2에서 증명하고 계산한 내용을 Pspice 시뮬레이션을 통하여 검증해 보았다. 그림 6은 O2Micro사 다등 점등 회로의 모의 실험 결과를 나타내고 있다.

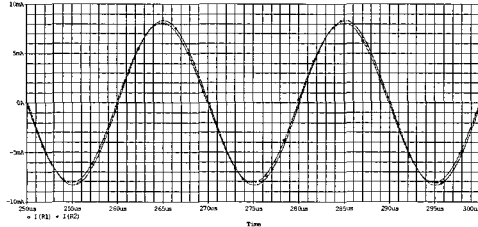


그림 6 O2Micro사 방식의 램프전류 파형 (모의실험)
Fig. 6 Lamp current waveform of O2Micro (simulation)

그림 6에서 보면 I_1 의 peak값은 8.098[mA]이고, I_2 의 peak값은 8.341[mA]이므로 %오차가 3[%]임을 알 수 있다. 그림 5에서 전류 평형 트랜스포머는 이상적인 트랜스포머로 가정하고 식 (1), (2)를 구하였다. 모의 실험에서도 Coupling factor(k)=1로 하여 이상적인 트랜스포머로 모의 실험하였다.

그림 7은 모의 실험 조건과 동일한 상태에서 실험을 통해 측정한 램프 전류 파형이다. 각 램프에 흐르는 전류 값을 측정한 결과 I_1 의 RMS값은 5.59[mA]이고, I_2 의 RMS값은 5.74[mA]로 %오차가 3[%]임을 알 수 있다. 이로써 수식으로부터 구한 결과와 모의 실험 결과 및 실험 결과가 동일함을 입증하여 수식의 정확성을 검증하였다.

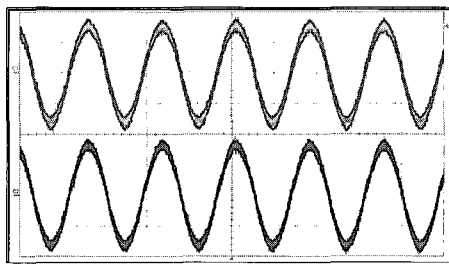


그림 7 O2Micro사 방식의 램프전류 파형 (실험)
Fig. 7 Lamp current waveform of O2Micro (experimentation)

3.2 Jin Balance 다등 점등 회로

3.2.1 회로도

Jin Balance 다등 점등 회로는 그림 8에 나타내었다.^[3] T1은 고압 트랜스포머이고, T2와 T3는 전류평형 트랜스포머이다. 각 전류 평형 트랜스포머의 2차측을 직렬로 연결시켜 놓은 구조이다. 그림 8과 그림 4의

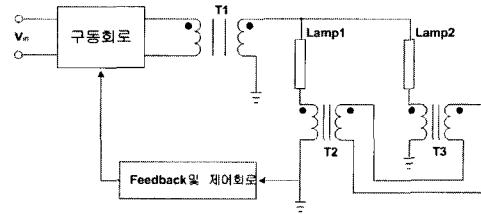


그림 8 Jin Balance 다등 점등 회로
Fig. 8 Multi lighting circuit of Jin Balance

O2Micro사 다등 점등 회로를 비교해보면 전류 평형 트랜스포머를 사용하는 방식의 차이점을 알 수 있다.

3.2.2 전류 평형 원리

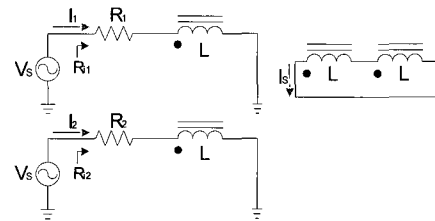


그림 9 Jin Balance 인버터 2차측 등가회로
Fig. 9 Secondary equivalent circuit of Jin Balance

2개의 램프를 사용한 그림 8의 회로에서 트랜스포머 T1의 2차측에 인가된 전압을 V_s 라고 가정하고, CCFL은 전기적으로 저항으로 모델링 되므로 Burning 상태의 램프를 저항 R 로 정의하였다. T1의 2차측 회로를 그림 9에 등가적으로 표현하였다.

위 등가회로에서 I_1 과 I_2 에 관한 식을 구하여 보면 아래 식 (5),(6),(7)과 같다.

$$V_s = I_1 R_1 + j\omega L I_1 + j\omega L I_s \quad (5)$$

$$V_s = I_2 R_2 + j\omega L I_2 + j\omega L I_s \quad (6)$$

$$j\omega L I_s + j\omega L I_1 + j\omega L I_s + j\omega L I_2 = 0 \quad (7)$$

식 (5), (6), (7)을 연립하여 I_1 과 I_2 를 구하면 아래 식 (8), (9)와 같다.

$$I_1 = V_s \times \frac{1}{R_1} \times \frac{1 + 2j\omega L/R_2}{1 + j\omega L(R_1 + R_2)/R_1 R_2} \quad (8)$$

$$I_2 = V_s \times \frac{1}{R_2} \times \frac{1 + 2j\omega L/R_1}{1 + j\omega L(R_1 + R_2)/R_1 R_2} \quad (9)$$

O2Micro 방식에서의 해석과 같이 I_1 과 I_2 가 동일하기 위해서는 $\omega L \gg 0$ 조건을 만족해야만 한다.

만약, $f=50[\text{kHz}]$, $R_1=100[\text{k}\Omega]$ 이라고 가정하면 I_1 과 I_2 의 전류평형이 이루어지기 위해서 L 값이 $3.2[\text{H}]$ 이상의 큰 값이 필요하게 되므로, 적절한 L 값을 사용하여 I_1 과 I_2 가 일정한 오차 범위 내에 존재하도록 하고자 한다.

R_1 과 R_2 가 10[%] 오차일 때 I_1 과 I_2 의 오차를 3[%] 이내로 만들고자 한다.

$R_1=100[\text{k}\Omega]$, $R_2=90[\text{k}\Omega]$, $f=50[\text{kHz}]$

위 조건을 식 (3),(4)에 대입하여 계산해 보면 $L=484[\text{mH}]$ 일 때 I_1 과 I_2 가 3[%] 오차를 갖는다.

3.2.3 모의실험을 통한 검증

3.2.2에서 증명하고 계산한 내용을 Pspice 시뮬레이션을 통하여 검증해 보았다. 그림 10은 Jin Balance 다등 점등 회로의 모의 실험 결과를 나타내고 있다.

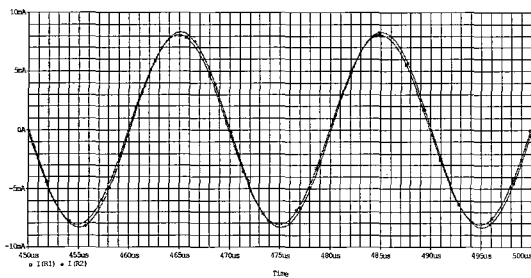


그림 10 Jin Balance 방식의 램프전류 파형 (모의실험)
Fig. 10 Lamp current waveform of Jin Balance (simulation)

그림 10에서 보면 I_1 의 peak값은 $8.098[\text{mA}]$ 이고, I_2 의 peak값은 $8.341[\text{mA}]$ 이므로 %오차가 3[%]임을 알 수 있다.

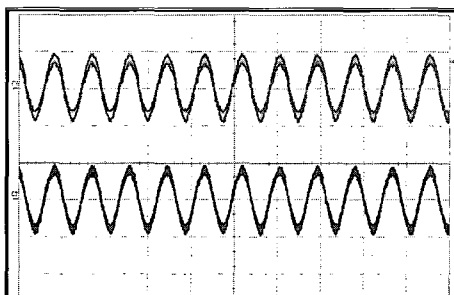


그림 11 Jin Balance 방식의 램프전류 파형 (실험)
Fig. 11 Lamp current waveform of Jin Balance(experimentation)

그림 11은 모의 실험 조건과 동일한 상태에서 실험을 통해 측정된 램프 전류 파형이다. 각 램프에 흐르는 전류 값을 측정한 결과 I_1 의 RMS값은 $5.43[\text{mA}]$ 이고, I_2 의 RMS값은 $5.53[\text{mA}]$ 로 %오차가 3[%]이내임을 알 수 있다. 이로써 수식으로부터 구한 결과와 모의 실험 결과 및 실험 결과가 동일함을 입증하여 수식의 정확성을 검증하였다

4. 제안 특화 병렬 구동 회로

4.1 Hybrid Type I 다등 점등 회로

4.1.1 회로도

Hybrid Type I 다등 점등 회로는 그림 12에 나타내었다. T1은 고압 트랜스포머이고, T2, T3, T4, T5는 전류 평형 트랜스포머이다.

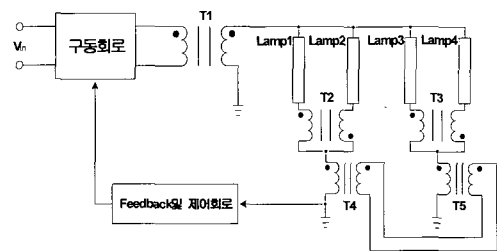


그림 12 Hybrid Type I 다등 점등 회로
Fig. 12 Multi lighting circuit of Hybrid Type I

4.1.2 전류 평형 원리

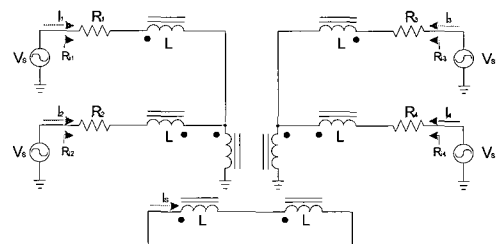


그림 13 Hybrid Type I 인버터 2차측 등가 회로
Fig. 13 Secondary equivalent circuit of Hybrid Type I

4개의 램프를 사용한 그림 12의 회로도에서 T1의 2차측에 인가된 전압을 V_s 라고 가정하고, CCFL은 전기적으로 저항으로 모델링 되므로 Burning 상태의 램프를 저항 R 로 정의하였다. T1의 2차측 회로를 그림 13에 등가적으로 표현하였다. 위 등가회로에서 I_1 , I_2 , I_3 , I_4 에 관한 식을 구하여 보면 아래 식 (10),(11),(12),(13), (14)와 같다.

$$V_s = I_1 R_1 + j\omega L I_1 - j\omega L I_2 + j\omega L(I_1 + I_2) + j\omega L I_s \quad (10)$$

$$V_s = I_2 R_2 + j\omega L I_2 - j\omega L I_1 + j\omega L(I_1 + I_2) + j\omega L I_s \quad (11)$$

$$V_s = I_3 R_3 + j\omega L I_3 - j\omega L I_4 + j\omega L(I_3 + I_4) + j\omega L I_s \quad (12)$$

$$V_s = I_4 R_4 + j\omega L I_4 - j\omega L I_3 + j\omega L(I_3 + I_4) + j\omega L I_s \quad (13)$$

$$j\omega L I_s + j\omega L(I_1 + I_2) + j\omega L I_s + j\omega L(I_3 + I_4) = 0 \quad (14)$$

식 (10), (11), (12), (13), (14)을 연립하여 I_1, I_2, I_3, I_4 를 구하면 아래 식 (15), (16), (17), (18)과 같다.

$$I_1 = 2V_s \times \frac{C_1 + D_1}{A + j\omega L B} \quad (15)$$

$$I_2 = 2V_s \times \frac{C_2 + D_2}{A + j\omega L B} \quad (16)$$

$$I_3 = 2V_s \times \frac{C_3 + D_3}{A + j\omega L B} \quad (17)$$

$$I_4 = 2V_s \times \frac{C_4 + D_4}{A + j\omega L B} \quad (18)$$

$$A = 2R_1 R_2 R_3 R_4 - 4\omega^2 L^2 \{R_1(R_2 + R_3 + R_4) + R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4\}$$

$$B = 3\{R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)\} - 4\omega^2 L^2(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

$$C_1 = R_2 R_3 R_4 - 4\omega^2 L^2(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$C_2 = R_1 R_3 R_4 - 4\omega^2 L^2(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$C_3 = R_1 R_2 R_4 - 4\omega^2 L^2(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$C_4 = R_1 R_2 R_3 - 4\omega^2 L^2(R_2 + R_3 + R_4)$$

$$D_1 = j2\omega L \{R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4 - 4\omega^2 L^2\}$$

$$D_2 = j2\omega L \{R_1(R_3 + R_4) + R_3 R_4 - 4\omega^2 L^2\}$$

$$D_3 = j2\omega L \{R_1(R_2 + R_4) + R_2 R_4 - 4\omega^2 L^2\}$$

$$D_4 = j2\omega L \{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3 - 4\omega^2 L^2\}$$

기존 다등 점등 방식에서의 해석과 같이 I_1, I_2, I_3, I_4 가 동일하기 위해서는 $\omega L \gg 0$ 조건을 만족해야만 한다.

만약, $f=50[\text{kHz}]$, $R_1=100[\text{k}\Omega]$, $R_2, R_3=100[\text{k}\Omega]$, $R_4=90[\text{k}\Omega]$ 이라고 가정하면 I_1, I_2, I_3, I_4 의 전류평형이

이루어지기 위해서 L 값이 $4.6[\text{H}]$ 이상의 큰 값이 필요하게 되므로, 적절한 L 값을 사용하여 I_1, I_2, I_3, I_4 가 일정한 오차 범위 내에 존재하도록 하고자 한다.

R_1, R_2, R_3, R_4 가 10[%] 오차일 때 I_1, I_2, I_3, I_4 의 오차를 3[%] 이내로 만들려고 한다.

$R_1=100[\text{k}\Omega]$, $R_2, R_3=100[\text{k}\Omega]$, $R_4=90[\text{k}\Omega]$, $f=50[\text{kHz}]$

위 조건을 식 (15), (16), (17), (18)에 대입하여 계산해보면 $L=242[\text{mH}]$ 일 때 I_1, I_2, I_3, I_4 가 3[%] 오차를 갖는다.

4.1.3 모의 실험을 통한 검증

4.1.2에서 증명하고 계산한 내용을 모의 실험을 통하여 검증해 보았다. 그림 14는 Hybrid Type I 다등 점등 회로의 모의 실험 결과를 나타내고 있다.

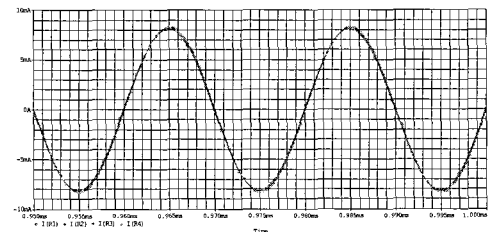


그림 14 Hybrid Type I 방식의 램프전류 파형
Fig. 14 Lamp current waveform of Hybrid Type I

그림 14에서 보면 I_1 의 peak값은 $8.093[\text{mA}]$ 이고, I_2, I_3 의 peak값은 $8.215[\text{mA}]$, I_4 의 peak값은 $8.336[\text{mA}]$ 이므로 %오차가 3[%]임을 알 수 있다. 수식으로부터 구한 결과와 모의 실험 결과가 동일함을 입증하여 수식의 정확성을 검증하였다.

4.2 Hybrid Type II 다등 점등 회로

4.2.1 회로도

Hybrid Type II 다등 점등 회로는 그림 15에 나타내었다. T1은 고압 트랜스포머이고, T2, T3, T4, T5는 전류 평형 트랜스포머이다.

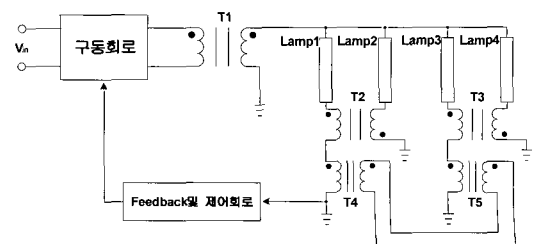


그림 15 Hybrid Type II 다등 점등 회로
Fig. 15 Multi lighting circuit of Hybrid Type II

4.2.2 전류 평형 원리

4개의 램프를 사용한 그림 15의 회로도에서 T1의 2차측에 인가된 전압을 V_s 라고 가정하고, CCFL은 전기적으로 저항으로 모델링 되므로 Burning 상태의 램프를 저항 R 로 정의하였다. T1의 2차측 회로를 그림 16에 등가적으로 표현하였다.

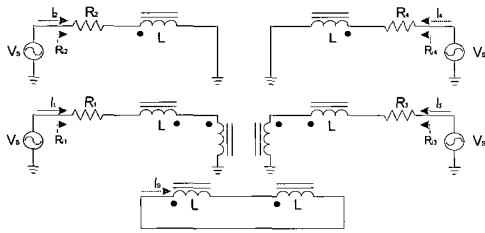


그림 16 Hybrid TypeII 인버터 2차측 등가 회로
Fig. 16 Secondary equivalent circuit of Hybrid TypeII

위 등가회로에서 I_1, I_2, I_3, I_4 에 관한 식을 구하여 보면 아래 식 (19), (20), (21), (22), (23)과 같다.

$$V_s = R_1 I_1 + j2\omega L I_1 - j\omega L I_2 + j\omega L I_s \quad (19)$$

$$V_s = R_2 I_2 + j\omega L I_2 - j\omega L I_1 \quad (20)$$

$$V_s = R_3 I_3 + j2\omega L I_3 - j\omega L I_4 + j\omega L I_s \quad (21)$$

$$V_s = R_4 I_4 + j\omega L I_4 - j\omega L I_3 \quad (22)$$

$$j2\omega L I_s + j\omega L I_1 + j\omega L I_2 = 0 \quad (23)$$

식 (19), (20), (21), (22), (23)을 연립하여 I_1, I_2, I_3, I_4 를 구하면 아래 식 (24), (25), (26), (27)과 같다.

$$I_1 = \frac{(C_{11} - \omega^2 L^2 C_{12} + 4\omega^4 L^4) + j\omega L(D_{11} - \omega^2 L^2 D_{12})}{(A_{11} - \omega^2 L^2 A_{12} + \omega^4 L^4 A_{13}) + j\omega L(B_{11} - \omega^2 L^2 B_{12})} \times V_s \quad (24)$$

$$A_{11} = 2R_1 R_2^2 R_3 R_4$$

$$A_{12} = 2R_1 R_2 (2R_3 + 3R_4) + 2R_3 R_4 (R_1 + 2R_2) + R_2^2 (R_1 + 3R_3 + 4R_4)$$

$$A_{13} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$B_{11} = R_2 \{R_1 R_2 (2R_3 + 3R_4) + R_3 R_4 (4R_1 + 3R_2)\}$$

$$B_{12} = R_1 (2R_2 + 2R_3 + 3R_4) + R_2 (R_2 + 4R_3 + 5R_4) + R_3 R_4$$

$$C_{11} = 2R_2^2 R_3 R_4$$

$$C_{12} = R_2 (3R_2 + 6R_3 + 11R_4) + 4R_3 R_4$$

$$D_{11} = 2R_2 (R_2 R_3 + 2R_2 R_4 + 3R_3 R_4)$$

$$D_{12} = 7R_2 + 4R_3 + 7R_4$$

$$I_2 = \frac{(C_{21} - \omega^2 L^2 C_{22} + \omega^4 L^4 C_{23}) + j\omega L(D_{21} - \omega^2 L^2 D_{22} + 4\omega^4 L^4)}{(A_{21} - \omega^2 L^2 A_{22} + \omega^4 L^4 A_{23}) + j\omega L(B_{21} - \omega^2 L^2 B_{22} + \omega^4 L^4 B_{23})} \times V_s \quad (25)$$

$$A_{21} = 2R_1 R_2^3 R_3 R_4$$

$$A_{22} = 2R_1 R_2^2 (2R_3 + 6R_4) + 2R_3 R_4 R_2 (3R_1 + 2R_2) + R_2^2 \{R_2 (R_1 + 3R_3 + 4R_4) + R_3 (2R_1 + 3R_4)\}$$

$$A_{23} = R_1 (2R_2 + 2R_3 + 3R_4) + R_2 (R_1 + 2R_2 + 5R_3 + 6R_4) + R_3 R_4$$

$$B_{21} = R_2^2 \{R_1 R_2 (2R_3 + 3R_4) + 3R_3 R_4 (2R_1 + R_2)\}$$

$$B_{23} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$B_{22} = R_1 R_2 (3R_2 + 6R_3 + 9R_4) + R_3 R_4 (2R_1 + 5R_2) + R_2^2 (R_2 + 7R_3 + 9R_4)$$

$$C_{21} = 2R_1 R_2^2 R_3 R_4$$

$$C_{23} = R_1 + 8R_2 + 5R_3 + 8R_4$$

$$C_{22} = 2R_1 R_2 (2R_3 + 3R_4) + 3R_3 R_4 (R_1 + 4R_2) + R_2^2 (R_1 + 5R_3 + 8R_4)$$

$$D_{21} = R_2 \{R_1 R_2 (2R_3 + 3R_4) + R_3 R_4 (4R_1 + 5R_2)\}$$

$$D_{22} = R_1 (2R_2 + 2R_3 + 3R_4) + R_2 (4R_2 + 10R_3 + 16R_4) + 5R_3 R_4$$

$$I_3 = \frac{(C_{31} - \omega^2 L^2 C_{32} + 4\omega^4 L^4) + j\omega L(D_{31} - \omega^2 L^2 D_{32})}{(A_{31} - \omega^2 L^2 A_{32} + \omega^4 L^4 A_{33}) + j\omega L(B_{31} - \omega^2 L^2 B_{32})} \times V_s \quad (26)$$

$$A_{31} = 2R_1 R_2 R_3 R_4^2$$

$$A_{32} = 2R_1 R_2 (R_3 + 2R_4) + 2R_3 R_4 (2R_1 + 3R_2) + R_4^2 (3R_1 + 4R_2 + R_3)$$

$$A_{33} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$B_{31} = R_4 \{R_1 R_2 (4R_3 + 3R_4) + R_3 R_4 (2R_1 + 3R_2)\}$$

$$B_{32} = R_3 (2R_1 + 3R_2 + 2R_4) + R_4 (4R_1 + 5R_2 + R_4) + R_1 R_2$$

$$C_{31} = 2R_1 R_2 R_4^2$$

$$C_{32} = R_4 (6R_1 + 11R_2 + 3R_4) + 4R_1 R_2$$

$$D_{31} = 2R_4 (3R_1 R_2 + R_1 R_4 + 2R_2 R_4)$$

$$D_{32} = 4R_1 + 7R_2 + 7R_4$$

$$I_4 = \frac{(C_{41} - \omega^2 L^2 C_{42} + \omega^4 L^4 C_{43}) + j\omega L(D_{41} - \omega^2 L^2 D_{42} + 4\omega^4 L^4)}{(A_{41} - \omega^2 L^2 A_{42} + \omega^4 L^4 A_{43}) + j\omega L(B_{41} - \omega^2 L^2 B_{42} + \omega^4 L^4 B_{43})} \times V_s \quad (27)$$

$$A_{41} = 2R_1 R_2 R_3 R_4^3$$

$$A_{42} = 2R_3 R_4^2 (2R_1 + 6R_2) + 2R_1 R_2 R_4 (3R_3 + 2R_4) + R_4^2 \{R_4 (3R_1 + 4R_2 + R_3) + R_1 (3R_2 + 2R_3)\}$$

$$A_{43} = R_3 (2R_1 + 3R_2 + 2R_4) + R_4 (5R_1 + 6R_2 + R_3 + 2R_4) + R_1 R_2$$

$$B_{41} = R_4^2 \{3R_1 R_2 (2R_3 + R_4) + R_3 R_4 (2R_1 + 3R_2)\}$$

$$B_{42} = R_1 R_2 (2R_3 + 5R_4) + R_3 R_4 (6R_1 + 9R_2 + 3R_4) + R_4^2 (7R_1 + 9R_2 + R_4)$$

$$B_{43} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$C_{41} = 2R_1 R_2 R_3 R_4^2$$

$$C_{42} = 3R_1 R_2 (R_3 + 4R_4) + 2R_3 R_4 (2R_1 + 3R_2) + R_4^2 (R_3 + 5R_1 + 8R_2)$$

$$C_{43} = 5R_1 + 8R_2 + R_3 + 8R_4$$

$$D_{41} = R_4 \{R_1 R_2 (4R_3 + 5R_4) + R_3 R_4 (2R_1 + 3R_2)\}$$

$$D_{42} = R_3 (2R_1 + 3R_2 + 2R_4) + R_4 (10R_1 + 16R_2 + 4R_4) + 5R_1 R_2$$

기존 다등 점등 방식 및 Hybrid Type I에서의 해석과 같이 I_1, I_2, I_3, I_4 가 동일하기 위해서는 $\omega L \gg 0$ 조건을 만족해야만 한다.

만약, $f=50[\text{kHz}]$, $R_1=100[\text{k}\Omega]$, $R_2, R_3=100[\text{k}\Omega]$, $R_4=90[\text{k}\Omega]$ 이라고 가정하면 I_1, I_2, I_3, I_4 의 전류평형이 이루어지기 위해서 L 값이 $16[\text{H}]$ 이상의 큰 값이 필요하게 되므로, 적정한 L 값을 사용하여 I_1, I_2, I_3, I_4 가 일정한 오차 범위 내에 존재하도록 하고자 한다.

R_1, R_2, R_3, R_4 가 10[%] 오차일 때 I_1, I_2, I_3, I_4 의 오차를 3[%] 이내로 만들고자 한다.

$$R_1=100[\text{k}\Omega], R_2, R_3=100[\text{k}\Omega], R_4=90[\text{k}\Omega], f=50[\text{kHz}]$$

위 조건을 식 (15), (16), (17), (18)에 대입하여 계산해 보면 $L=654[\text{mH}]$ 일 때 I_1, I_2, I_3, I_4 가 3[%] 오차를 갖는다.

4.2.3 모의 실험을 통한 검증

4.2.2에서 증명하고 계산한 내용을 모의 실험을 통하여 검증해 보았다. 그림 17은 Hybrid Type II 다등 점등 회로의 모의 실험 결과를 나타내고 있다.

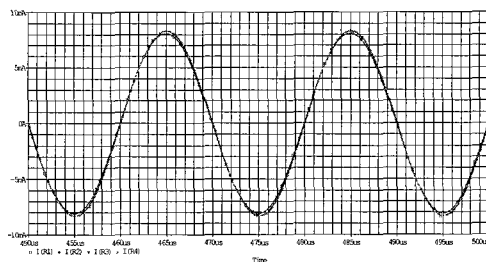


그림 17 Hybrid Type II 방식의 인버터 램프전류 파형
Fig. 17 Lamp current waveform of Hybrid Type II

그림 17에서 보면 I_1 의 peak값은 $8.093[\text{mA}]$ 이고, I_2, I_3 의 peak값은 $8.215[\text{mA}]$, I_4 의 peak값은 $8.336[\text{mA}]$ 이므로 %오차가 3[%]임을 알 수 있다. 수식으로부터 구한 결과와 모의 실험 결과가 동일함을 입증하여 수식의 정확성을 검증하였다.

4.3 Hybrid Type I, II 및

기존 다등 점등 회로 방식 비교

Hybrid Type I은 기존의 Jin Balance 방식과 거의 동등한 전류 평형 특성을 가진다. 다만, 상위 계층의 트랜스포머에 인가되는 전류는 기존에 비해 2배로 증가하여, 트랜스 도통 손실이 커져 부피 및 크기가 증가해야 하는 단점이 있다.

Hybrid Type II에서 트랜스포머에 인가되는 전류는 Jin Balance 방식과 동일하나, 동일한 전류 평형 특성을 유지하기 위해서는 각 트랜스포머의 L 값이 Jin Balance 방식에서 필요한 L 값에 비해 2배 이상이 필요하다. 이를 위해 권선 수가 커져야 하므로 트랜스포머의 부피가 증가하게 된다.

하지만 기존 방식에서 벗어나 새로운 방식을 제안하고 이를 통하여 전류 평형을 이룰 수 있는 점은 제안된 Hybrid Type I, II의 장점이라 할 수 있다.

표 1은 각 방식의 특성을 비교한 표이다.

표 1 전류 평형 방식 비교

Table 1 Comparison of current balancing method

방식명	트랜스포머 전류스트레스	필요 인덕턴스	트랜스포머 부피 및 크기	전류평형오차
Jin Balance	1	$2L$	>100	Good
O2Micro	1	L	100	Good
Hybrid I	N	$2L$	>100	Good
Hybrid II	1	$>2L$	>100	Good

5. 결 론

본 논문에서는 전류 평형 트랜스포머를 이용한 다등 점등 회로의 전류 평형이 이루어지는 원리를 수학적으로 증명하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 전류 평형 트랜스포머의 자화인덕턴스 크기에 따라 전류 평형의 편차가 결정된다. 자화인덕턴스의 크기는 전류 평형 트랜스포머의 부피와 관련이 있으므로 동일한 전류 편차를 내기 위해 자화인덕턴스 값이 작을수록 경쟁력을 확보할 수 있다.

본 논문에서 새롭게 제안한 Hybrid type I, II에도 전류 평형 트랜스포머를 이용하였다. 제안한 방식에 대해서도 수학적으로 증명하여 전류 평형이 이루어짐을 보였다. 전류 평형 트랜스포머를 이용한 다등 점등 방식에서 전류 평형 특성은 자화인덕턴스 값의 영향을 많이 받는다. 램프의 전기적인 특성(Impedance), 동작 주파수(Burning Frequency)에 따라 자화인덕턴스 값

의 크기가 달라진다. 램프의 특성과 동작 주파수에 따라 적절한 전류 편차를 가질 수 있는 자화인덕턴스 값을 구할 수 있게 되어 전류 평형 트랜스포머의 최적화된 설계가 가능하게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] Sheng Tai Lee, "Circuit structure for driving a plurality of Cold Cathode Fluorescent Lamps" U.S. Patent 6 781 325 B2, Aug. 24, 2004.
- [2] Kenneth L. Kaiser, "Electromagnetic Compatibility Handbook (II)" pp17-8~17-10.
- [3] "Microsemi Integrated Products" Microsemi Corporation Proprietary & Confidential Information.

저 자 소 개



장영수(張榮洙)

1978년 10월 17일생. 2004년 대전대 공과대학 전자공학과 졸업. 2003년~2005년 (주)필룩스 인버터개발팀 연구원. 2006년~현재 국민대 대학원 전자공학과 석사과정.



윤 석(尹 錫)

1978년 5월 25일생. 2004년 국민대 공과대학 전자정보통신공학부 졸업. 2006년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사).



권기현(權基鉉)

1975년 1월 12일생. 1998년 서남대 전기공학과 졸업. 2000년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2001년~2003년 한국과학기술원 학생연구원. 2003년~현재 삼성전기 선임연구원.



한상규(韓翔圭)

1973년 12월 13일생. 1999년 2월 부산대 전기공학과 졸업. 2001년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(석사). 2005년 2월 동 대학원 전자전산학과 졸업(공학박사). 2005년 3월~2005년 8월 한국과학기술원 정보전자연구소 박사 후 연구원. 2005년 9월~현재 국민대

전자정보통신공학부 전임강사.



홍성수(洪成洙)

1961년 1월 25일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1984년~1999년 현대전자(주) 정보통신 연구소 책임연구원. 1999년~현재 국민대 전자정보통신공학부 부교수.



사공석진(司空石鎭)

1951년 3월 23일생. 1976년 고려대 전자공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1977년~1981년 모토로라코리아 응용전자연구실 선임연구원. 1990년~1991년 스위스 ETH초빙교수. 1989년~1992년 스위스 HTS 객원연구원. 1982년~현재 국민대 전자정보통신공학부 교수.



노정욱(盧政煜)

1971년 9월 10일생. 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 2000년~2004년 삼성전자(주) 영상디스플레이 사업부 책임 연구원. 2004년~현재 국민대 전자정보통신공학부 조교수.