

용량성 부하 구동을 위한 단권변압기를 사용한 에너지 회수 회로

백중복, 박중후, 조보형
서울대학교 전기, 컴퓨터공학부

a Energy Recovery Circuit using auto-transformer for the Driving of Capacitive Load

J. B Baek, J. H. Park and B. H. Cho

School of Electrical Engineering and Computer Science
Seoul National University

ABSTRACT

용량성 부하를 사용하는 응용사례가 늘어남에 따라 에너지 회수 회로의 중요성 또한 더욱 부각되고 있다. 특히, 고전압 구동의 경우 에너지 회수를 하지 않을 경우 손실이 크게 발생하며 충방전시 돌입 전류로 인한 노이즈 문제 또한 발생하게 된다. 본 논문에서는 단권변압기를 사용한 새로운 형태의 에너지 회수 회로를 제안한다.

제안한 회로는 모든 스위치가 동일한 전압, 전류 스트레스를 받으며 항상 스위치를 통해 흐르는 전류가 대칭적으로 분배되기 때문에 도통 손실을 줄일 수 있으며 단권변압기를 통하여 용량성 부하가 연결되기 때문에 영전압 실패시 발생 할 수 있는 돌입 전류로 인한 전자파 발생 및 도통, 스위칭 손실을 막을 수 있다는 장점을 갖는다. 이에 대한 이론적 해석과 시뮬레이션과 용량성 부하를 이용한 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

디스플레이 산업의 발전에 따라 용량성 부하를 사용하는 응용사례가 늘어나고 있다. 이러한 용량성 부하의 경우 충방전하는 동안 변위 전류가 흐르게 되며 부하에 걸리는 전압의 기울기에 따라 소자의 스트레스 증가로 소자 손상의 위험이 있으며 용량성 부하에 저장된 에너지를 회수하지 않은 경우 모두 손실로 되어 회로의 효율이 급격하게 줄어드는 문제점이 있다. 따라서 용량성 부하의 경우 에너지 회수 회로의 중요성은 더욱 커지게 되며 현재까지 많은 연구가 진행 중이다.^[1]

일례로서, 평판디스플레이 기술의 일환으로 최근에 개발된 무수은 면광원의 경우 유해물질인 수은을 포함하지 않는 친환경적 특성과 대면적화의 용이성과 평판형의 구조적 특성 등의 장점으로 백라이트 및 조명 분야의 새로운 대체 수단으로 떠오르고 있다.^[2] 이러한 무수은 면광원 램프 역시 용량성 부하로 고전압을 인가하여 플라즈마 방전을 하는 방식으로 돌입전류 및 에너지 회수 문제가 효율에 중요한 영향을 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 사용되는 방법으로 웨버타입의 공진회로를 사용할 수 있다.^[3] 하지만 웨버회로의 경우 단방향 정류다이오드의 사용이 요구된다. 또한 온 저항과 전압 강하 등으로 인하여 영전압 스위칭이 실패하여 돌입전류의 가능성이 있다는 단점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 해결하기

위하여 본 논문은 단권변압기를 사용한 에너지 회수 가능한 인버터 회로를 제안한다. 제안한 회로는 단권변압기를 통하여 부하에 전력이 전달되며 그림 1에서 보는 바와 같이 대칭적인 구조를 갖고 있다. 따라서 특성상 모든 스위치가 동일한 전압, 전류 스트레스를 받게 되며 기존의 웨버회로와 달리 단방향 다이오드가 필요하지 않아 불필요한 소자를 줄일 수 있다. 또한 대칭적인 구조로 인하여 부하의 전력 소모 구동 시 전류가 분배되어 도통하기 때문에 도통 손실이 줄어드는 장점을 갖는다. 전류가 줄어들면 손실 뿐 아니라 스위치나 라인의 전압 강하도 줄어드는 장점을 가질 수도 있다. 또한 기존의 경우 스위치와 부하가 직접 연결되어 돌입전류의 영향에 치명적이었지만 제안한 회로의 경우 부하와 스위치 소자 사이에 변압기의 존재로 필터역할을 하여 돌입 전류로 인한 전자파 발생 및 도통, 스위칭 손실을 줄일 수 있다는 장점 또한 갖는다. 본 논문에서는 위와 같이 제안한 방식의 동작원리를 기술하고 시뮬레이션 및 용량성 부하를 이용한 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 단권변압기를 이용한 에너지 회수 회로

그림 1은 단권변압기를 사용한 에너지 회수가 가능한 인버터 회로를 보여준다. 제안한 회로는 교류 구동을 위해 용량성 부하 양쪽으로 대칭적으로 스위치가 있으며 부하와 스위치 사이에 단권변압기를 연결하였다. 이 때 전류의 평형을 위해 양쪽의 권선비가 1:1 인 변압기를 적용하였다.

단권변압기의 누설인덕턴스와 용량성 부하가 공진하면서 부하를 충방전시키며 에너지 회수를 가능하게 한다. 충전을 위해

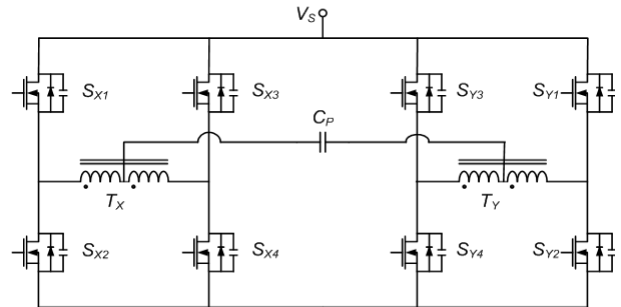


그림 1 단권변압기를 사용한 구동회로
Fig. 1 a driving circuit using auto-transformer

위쪽의 스위치를 턴 온 하였을 경우 단권변압기의 특징으로 전치 턴 온을 가능하게 한다. 방전의 경우도 마찬가지로 아래쪽의 스위치를 턴 온 하였을 경우 부하에 남아있는 전하가 변압기의 양쪽을 통해 흐르게 되어 스위치를 통하여 흐르는 도통전류가 반으로 줄어 도통 손실이 줄어들게 되며 반대편 스위치는 영전압 스위치 턴 온이 되어 스위칭 손실을 줄일 수 있다는 장점을 갖게 된다. 전류가 반으로 줄어들게 되면 기생저항으로 인한 전압강하를 줄일 수 있다는 장점 또한 얻을 수 있다. 게다가 부하와 전원 사이에 변압기의 존재로 돌입 전류로 인한 전자파 발생 및 도통, 스위칭 손실을 줄일 수 있다는 특징을 가진다.

2.2 모드 해석

그림 2는 제안한 회로의 구동파형을 나타낸다. 동작 모드는 그림에서 알 수 있듯이 8개의 모드로 나누어지며 반주기 동안 대칭적 동작을 나타내므로 반주기 동안의 모드에 대해서만 해석한다. 스위칭 동작은 영전압, 영전류 스위칭을 위해서 달라질 수 있다. 그림 3에 각 모드별 전류 흐름 및 도통 스위치에 대해 도시하였으며 모드별 해석에 앞서 다음과 같이 가정한다.

- 변압기의 권선비는 1:1 이다.
- 누설인덕턴스는 L, 자화인덕턴스는 L_m 으로 정의한다.

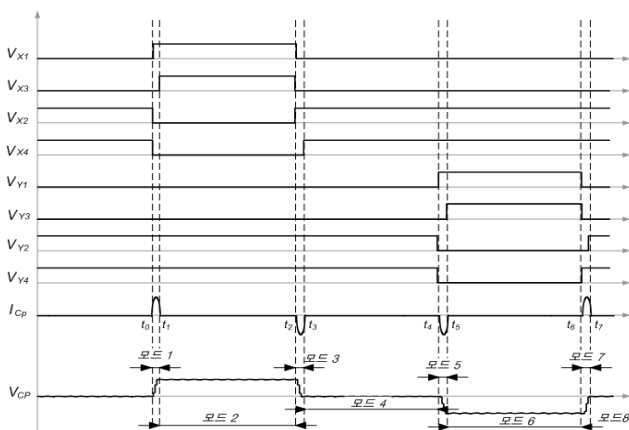


그림 2 제안한 회로의 구동파형
Fig. 2 a driving waveform of proposed circuit

모드 1[t0 - t1] : 모드 1 이전 상태에서 부하의 전압은 0V이고 X와 Y 모두 아래쪽의 스위치는 온 상태이며 전류는 흐르지 않는다고 가정한다. 또한 Y보드에 있는 변압기의 탭의 전압은 0V를 유지한다. 그리고 Y보드의 위쪽 스위치 어느 하나를 턴 온한다. 이 때 턴 온한 스위치를 통하여 부하로 전류가 흐르게 되며 단권변압기의 특성상 대각선에 있는 스위치의 다이오드를 통하여서도 전류가 흐르게 된다. 예를 들어 Sx1을 턴 온하였을 경우 Sx4의 다이오드를 통하여 전류가 흐르며 이 때 스위치를 통하여 온하여 스위치를 통하여 전류를 흘릴 수도 있다. 따라서 부하로 흐르는 전류는 Sx1과 Sx4를 통하여 흐르는 전류의 합이 되며 권선비를 1:1로 하였을 경우 전류가 균등하게 나누어져 흐르게 되며 따라서 도통손실을 줄일 수 있다. 이 때 Sx4는 영전압 스위칭이 가능한 조건이다. 그림 3(a)에서 자세히 알 수 있듯이 턴 온하는 스위치의 선택에 의해 전류의 방향이 결정된다. 이와 같이 흐르는 전류는 변압기의 누설인덕턴스와 용량성 부하가 공진하면서 부하에 인가되는 전압이 Vs까지 상승하게 되어 다음 모드에서 Sx3를 영전압 스위칭 할 수 있는 조건

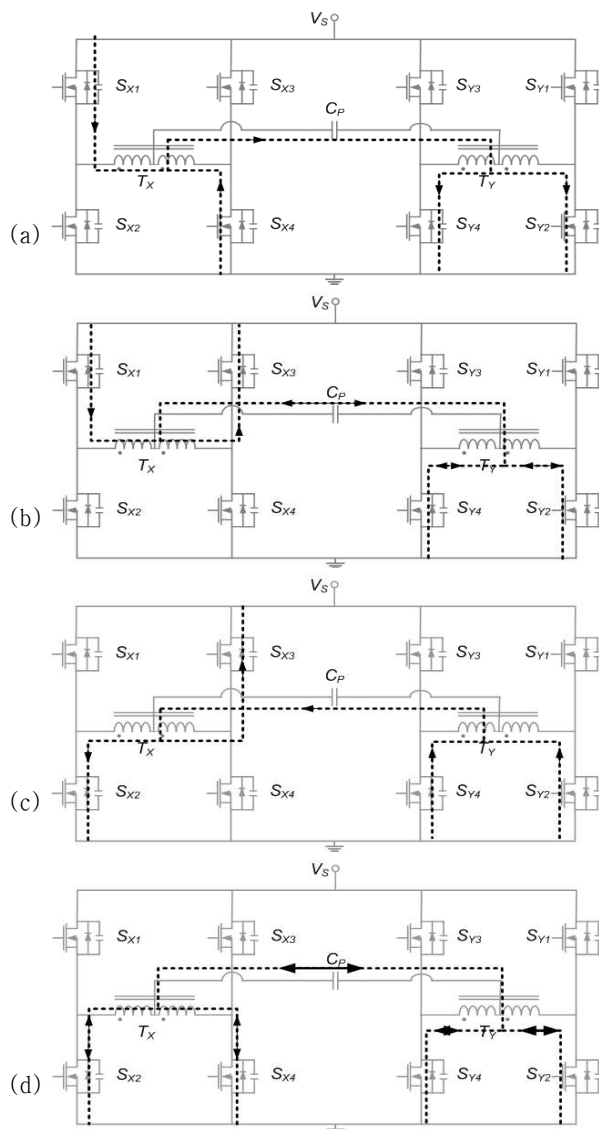


그림 3 구간별 동작 (a) 모드1 (b) 모드2 (c) 모드 3 (d) 모드4
Fig. 3 diagrams (a) mode 1 (b) mode 2 (c) mode 3 (d) mode 4

을 만족하게 된다. 또한 공진과 동시에 자화인덕턴스에 식 (1)과 같이 일정한 전압이 인가되면서 전류가 선형적으로 증가하는 성분이 포함되며 다음 방전 유지구간 동안 공진 에너지원으로 작용한다.

$$V_L = m \frac{V_C}{2} \left(1 - \frac{L}{2L_m} \right) \quad (1)$$

$$V_C = \frac{V_S}{2} (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$$I_C = \frac{V_S}{2L_m} (1 - \cos \theta) + \frac{V_S}{2\omega L} \sin \theta \quad (3)$$

여기서 $\theta = \omega t$, $\omega = \frac{1}{\sqrt{L C}}$

모드 2[t1 - t2] : 이전 모드에서 공진에 의해 전류가 감소하면서 Sx4는 영전류 스위칭 오프가 가능해지며 Vcp의 전압이 Vs까지 상승하게 되면 모드가 시작된다. Vs전압에 도달하면 Sx3는 다이오드가 도통되면서 영전압 스위칭 온이 가능하게 된다. 이 모드에서는 부하의 전압을 유지시켜주는 구간으로 이상적일 경우 Y보드의 스위치가 그라운드를 잡고 있으며 X보드의 스위

치가 V_s 를 유지하여 패널은 V_s 를 유지하게 된다. 하지만 그림 3(b)에서 보여지듯 자화인덕턴스에 저장된 공진에너지원이 누설인덕턴스의 영향으로 X보드에서는 전류가 단방향으로 공진하게 되며 Y보드는 양방향으로 공진하면서 실질적으로 부하의 전압은 미세하게 공진한다. 실제 기생 저항이 있을 경우 공진 에너지원은 감쇄하게 되며 패널의 경우 이 구간에서 발광을 유지하게 된다.

$$V_c p = \frac{V T}{2Lm} \cos \theta \quad (-t) \quad (5)$$

$$I_c p = \frac{V T}{2Lm} (1 - \cos \theta) \quad (-t) \quad (6)$$

모드 3[t2 - t3] : 패널의 방전이 끝나고 용량성 부하에 남아있는 에너지를 회수하는 구간이다. 모드 1에서 충전하는 과정과 유사하며 다른 점은 아래쪽의 스위치를 턴 온하여 방전하는 것이다. Y보드는 계속하여 영전압을 유지하고 있으며 아래쪽 스위치 Sx2를 턴 온하면 단권변압기에 의해 부하에 남아있던 전하가 Sx2와 Sx3 스위치로 나누어져 흐르게 된다. 따라서 에너지 회수가 가능해지며 마찬가지로 전류가 분배되어 흘러 전류 스트레스가 줄어들게 되어 도통 손실을 줄일 수 있다는 장점을 갖게 된다. 전류의 방향과 도통되는 경로는 턴 온하는 스위치에 의해 결정되며 그림 3(c)를 통하여 그 전류의 흐름을 자세히 알 수 있다. 전류의 흐름과 동시에 부하의 전압이 0V까지 하강하게 되면 다음 모드에서 Sx3는 영전류 스위칭 오프가 가능해지며 동시에 Sx4는 영전압 스위칭 할 수 있는 조건을 가질 수 있게 된다. 인가되는 전압 전류 식은 모드 1과 대칭적이다.

모드 4[t3 - t4] : 이전 모드에서 공진에 의해 전류가 감소하면서 Sx3는 영전류 스위칭 오프가 가능해지며 Vcp의 전압이 0V까지 하강하면서 모드가 시작된다. 용량성 부하의 전압이 0V에 도달하면 Sx4는 다이오드가 도통되면서 영전압 스위칭 온이 가능하게 된다. 이 모드는 휴지기로써 부하 양단에 전압을 0V로 유지시켜주는 구간으로 이상적인 경우 X와 Y보드의 스위치가 그라운드를 잡고 있어 0V를 유지한다. 실질적으로는 누설인덕턴스의 영향으로 작은 리플이 생길 수 있을 가능성이 있다.

3. 실험결과

3.1 모의 실험

제한한 단권변압기를 사용한 에너지 회수 회로를 검증하기 위하여 PSIM을 이용해 시뮬레이션 하였다. 입력전압(V_s)은 200[V]이고 용량성 부하는 1[nF]으로 단권변압기의 누설인덕턴스는 5[uH]로 하여 스위칭 주파수 20[kHz]에서 검증하였다.

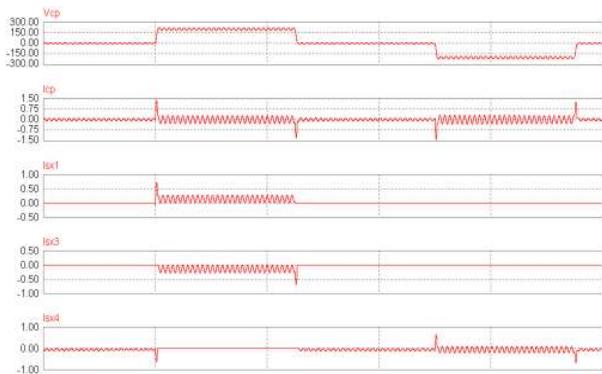


그림 4 용량성 부하의 시뮬레이션 결과

Fig. 4 simulation results of capacitive load

그림 4는 부하에 인가되는 전압과 전류파형을 보여주고 있

다. 모드 해석에서 살펴보았듯이 충전구간 동안 용량성 부하와 단권변압기의 누설인덕턴스가 공진을 하면서 V_s 에 도달하는 것을 보여주고 있으며 공진 주기가 해석한 것과 같음을 알 수 있다. 또한 그림 4는 스위치를 통하여 흐르는 전류 파형을 보여준다. 충전구간 동안 두 스위치를 통해 흐르는 전류의 합이 부하로 흘러 들어감을 알 수 있으며 방전 유지 구간 동안 저장된 공진에너지가 누설인덕턴스에 의해 전류와 전압이 공진하고 있음을 보여주고 있다. 또한 시뮬레이션 파형에서 알 수 있듯이 전류의 방향이 단방향이 되고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 용량성 부하 실험

그림 5는 스위칭 주파수를 20kHz, 입력전압(V_s)을 100[V], 용량성 부하는 88[nF]으로 단권변압기의 누설인덕턴스는 1.4[uH]로 설계하여 실험한 전압 및 전류 파형을 보여준다. 모드해석을 통해 알아 본 것과 같은 결과로 공진을 하면서 전압이 상승하는 구간이 보이며 부하에 흐르는 전류와 스위치를 통해 흐르는 전류를 비교해 본 결과 전류가 분배되어 흐름을 확인할 수 있었다.

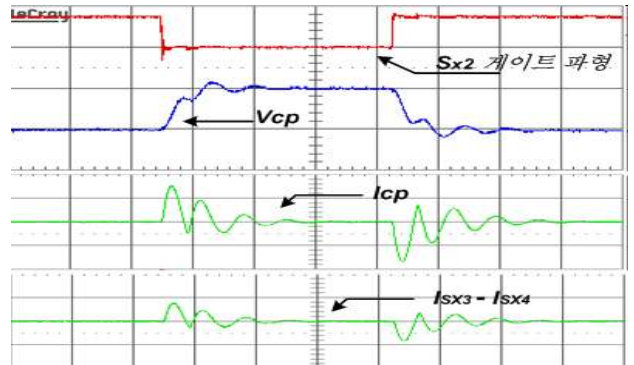


그림 5 전압 전류 실험파형 (500ms/div, 100V/div, 10A/div)

Fig. 5 experimental results (500ms/div, 100V/div, 10A/div)

4. 결론

본 논문은 단권변압기를 이용한 에너지 회수 가능한 인버터 회로를 제안하였다. 시뮬레이션과 용량성 부하를 이용한 실험을 통하여 타당성을 검증하였으며, 단권변압기의 특징을 이용하여 스위치를 도통하는 전류의 분배로 도통손실을 줄일 수 있는 장점과 더불어 인버팅 동작시 영전압 스위칭과 영전류 스위칭을 통하여 스위칭 손실을 줄이면서 효율을 높이며 에너지 회수가 가능하다는 특징 또한 갖게 되었다.

참고 문헌

- [1] 백중복, 박종후, 조보형, "면광원 구동회로의 새로운 점등 방법에 대한 연구", proceedings of the KIEE EMECS Annual Spring Conference 2008, pp. 116-118, 2008.
- [2] Ju kwang Lee, Byungjoo Oh, Jaechul Jung, and Ki-Woong Whang, "High luminous efficiency Mercury-free flat light source for LCD BLU," IMID 05 Digest, pp. 1161- 1164, 2005.
- [3] L. F. Webber and M. B. Wood, "Energy recovery sustain circuit for the AC plasma display", SID Symposium Digest, pp. 92-95, 1987.