

다단 맥류 스위칭을 이용한 교류-직류 변환의 성능분석

Performance Analysis of the AC-DC Transformation Method using Multi-level Pulsating Current and Selection Switch

이재생*

Jae-Seang Lee

Abstract

In this paper, I have proposed that the 1st and 2nd AC-DC transformation methods using multi-level pulsating currents and selection switches. Through making the rectified voltage of the proposed AC-DC translation which is similar to reference voltage by selecting from multi-level pulsating currents, the proposed translation has dramatically reduced the ripple voltage. I have compared the performance of the DC voltage, the ripple voltage and the peak to peak voltage of the proposed method with the conventional method. The simulation results show that the proposed 2nd method has the better performance than the 1st method in the point of average DC voltage drop and peak to peak voltage increase.

Keywords : AC-DC Transformation, Multi-level Pulsating Current, Selection Switch

1. 서론

교류를 직류로 변환하는 변환기 기술은 지금까지 많은 응용분야에 적용 되어 왔다. 현재는 전력 스위치 소자의 발달로 인하여 정지형 전력변환기의 응용이 활발해졌다. 교류를 직류로 변환하는 전력 변환기는 작게는 정류기에서 시작하여 고속 스위칭 기술 등 다양한 기술형태로 발전해왔다^[1]. 전력 변환 용량이 대용량화 될수록 기술적 난이도를 보이고 있고 최근 종합적인 에너지원의 개발에 관심이 많아지고 있기 때문에 대용량의 AC/DC 변환장치의 필요성이 증가한다

^[2]. 교류를 직류로 변환하기 위해 통상 정류회로와 필터를 사용하는 것이 일반적이다. 또한 교류를 직류로 변환하는 과정에서 리플 전압이 발생하게 되는데, 낮은 부하(전력)인 경우에는 작은 필터회로를 사용하더라도 리플전압이 적어 좋은 특성을 기대할 수 있지만 높은 부하(전력)인 경우에는 작은 필터회로는 리플 전압이 커지므로 부하가 커짐에 따라 필터회로도 크게 하는 것이 필요하다^[3]. 본 논문에서는 다단 탭 변압기의 여러 레벨의 교류를 정류하여 여러 레벨의 맥류로 변환하고 그중 한 맥류를 선택하여 필터를 통해 출력함으로써 직류에 가까운 정류 전압 파형을 얻고, 그 출력을 필터 처리하여 리플 특성이 우수한 직류 출력을 얻는 방법을 제안하고, 기존과 제안 방식의 직류 출력전압, 리플전압, Peak to Peak 리플 전압 특성을 비교하였다.

† 2010년 4월 29일 접수~2010년 7월 23일 게재승인

* 국방과학연구소 2기술연구본부 TICN체계실(ADD)

책임저자 : 이재생(isaaclee@add.re.kr)

2. 기존 교류-직류 변환

기존의 교류-직류 변환 회로는 단순히 교류를 다이오드를 통해 맥류로 만들고 콘덴서에 충전함으로써 직류에 가까운 전압파형을 만들어 낸다. 그러나 콘덴서를 이용하더라도 부하전류가 증가하면 콘덴서에 충전되었던 전류가 빠르게 방전하여 리플전압이 증가하고 직류품질이 떨어진다. 대용량 콘덴서를 사용하는 것이 큰 부하 전류를 감당하는데 사용될 수 있으나 역시 리플전압이 존재하며 전원회로가 커진다.

Fig. 1은 기존 교류-직류 변환 회로의 기본적인 예를 나타내며, Fig. 2는 교류-직류 회로의 정류 전압과 부하 전류 흐름에 따른 직류 출력 전압의 파형을 나타낸다.

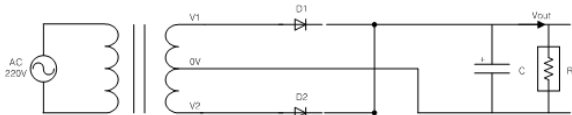


Fig. 1. 기존 교류-직류 변환회로

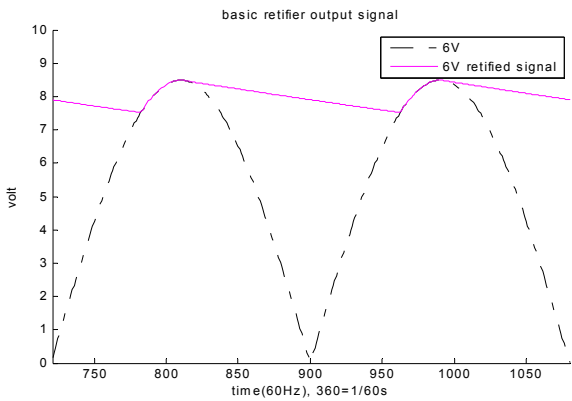


Fig. 2. 기존 교류-직류 변환회로 출력(부하율 10%)

종래 기술에 의한 정류회로는 맥류파형을 직류로 만드는 과정에서 맥류의 크기의 변화가 크기 때문에 리플 전압이 커져, 직류출력의 품질이 떨어지고, 이를 보상하기 위해 대용량 콘덴서로 필터를 취해줌으로써 리플 전압을 낮출 수 있다. 그러나 부하(전력)가 증가하게 되면 콘덴서에 충전되었던 전하가 빨리 방전하면서 다시 리플전압이 증가하여 직류 품질이 떨어진다. 리플 전압이 높은 것은 정류 파형과 직류 파형의 모습이 다른 것에 기인하며, 정류 파형을 직류파형에

유사하게 만들어 줄 수 있다면 리플 전압을 낮출 수 있을 것이며 이 정류 전압을 필터 할 콘덴서 용량도 낮출 수 있고, 부하가 증가하더라도 직류 출력의 품질 저하가 적어질 수 있을 것이다^[4].

3. 다단 맥류 스위칭 교류-직류 변환

가. 제안 1 동작원리

제안 1의 교류-직류 변환방식은 교류를 직류로 변환시킬 때 다단 탭 변환기에서 대략 배수관계를 갖는 다단 교류전압이 출력되도록 하고, 이 교류 전압을 각각 정류하여 얻은 다단 맥류 파형에서, 기준전압에 가까운 맥류 파형 하나를 골라 출력하면 기준 직류 전압에 가까운 정류 파형이 출력된다. 이를 위해, 다단 맥류 파형에서 기준전압에 가까운 맥류를 판단하는 수단과 다단맥류 파형 중 1개를 선택하는 수단이 필요하다. 또한 회로를 작동시키기 위한 보조전원회로 기준전압 발생 회로 및 정류전압 출력을 필터 하는 수단이 필요하다.

제안의 교류-직류 변환기는 Fig. 3과 같이 다단 탭 변환기, 다단 정류기 회로부와 다단 비교기 회로부, 다단 스위칭 회로부, 보조전원 회로, 기준전압 발생회로, 필터로 구성된다.

정류기 회로부는 다수의 정류 회로를 사용하는 구조이다. 변압기는 코일의 감은정도에 따라 교류 전압을 감압시켜 원하는 교류를 만들어 낼 수 있다. 이렇게 만들어진 교류를 다수의 정류회로를 이용하여 맥류로 변환 시킨다. Fig. 4에서는 예로서 220V의 교류를 220V, 110V, 50V, 24V, 12V, 9V, 6V의 맥류로 변환시켰다.

교류전압이 다단 탭 변환기로 입력되어, 여러 레벨의 교류전압으로 변환되고, 각각의 교류 전압은 다단 정류기 회로를 거쳐 맥류로 변환된다. 각각의 맥류 전압은 다단 비교기로 입력되어, 기준전압에 가까운 맥류를 판단하여 선택 제어 신호가 출력되도록 한다. 다단 맥류전압과 선택 제어 신호는 다단 스위칭 회로로 입력되어, 다단 맥류전압 중 기준 직류 전압에 가장 가까운 맥류가 선택되어 출력되도록 한다. 출력된 정류 파형은 기준 직류 전압에 가까운 파형이며 이 출력 전압을 필터 회로를 통해 부하 측으로 출력한다. 다단비교기 회로와 다단 스위칭회로를 작동시키기 위해 보조전원회로와 기준 전압회로가 사용되었다.

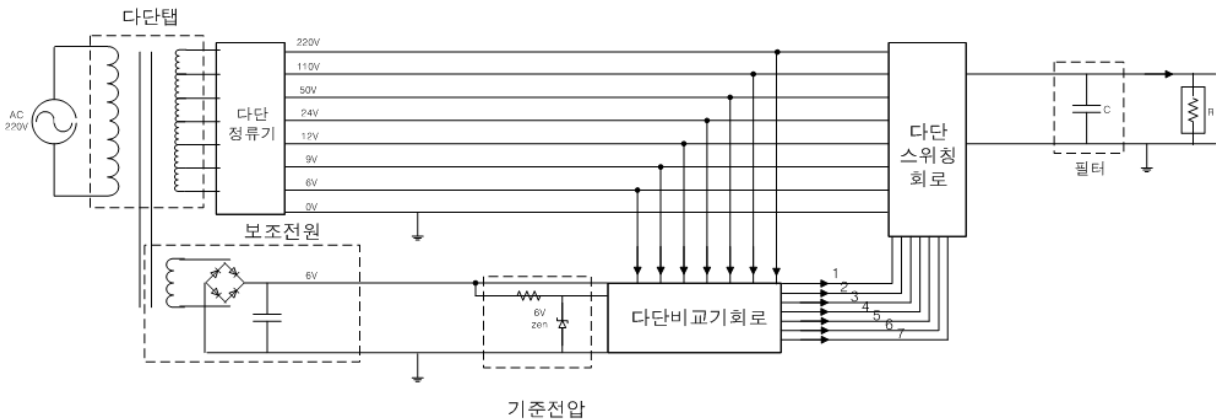


Fig. 3. 다단맥류 스위칭 교류-직류 변환기 구성

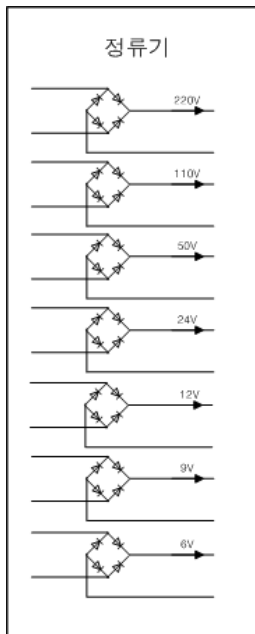


Fig. 4. 다단 정류기

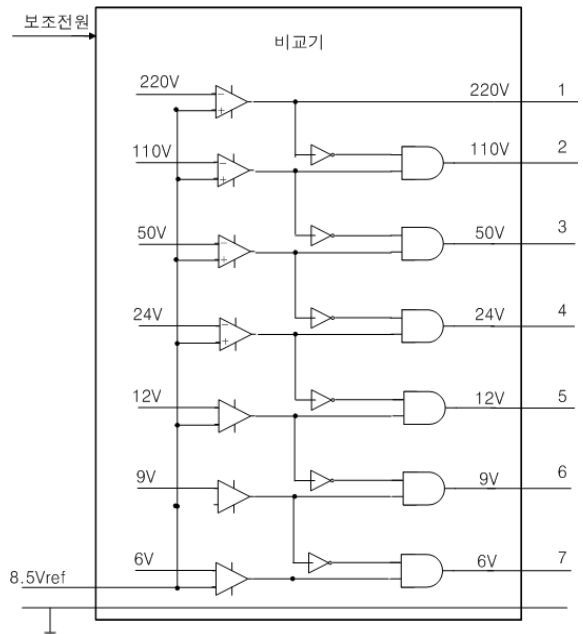


Fig. 5. 다단 비교기 회로

다단 비교기 회로부에서는 다수의 맥류를 입력받아 각각의 맥류가 비교 기준이 되는 전압과 비교하여 ‘기준 직류 전압에 가장 가까운지 비교결과 신호’를 출력으로 내보내게 된다. 비교를 위해서 다수의 비교기와 인버터와 AND게이트를 이용하여 다단 비교기 회로를 구성한다. Fig. 5의 예에서 기준전압은 8.5V를 사용하였고 220V 맥류는 기준전압과 함께 첫 번째 비교기에 입력되어 8.5V 이하인 경우 비교 결과로 High를 출력하고 이외의 경우 Low를 출력한다. 110V 맥류

는 기준전압과 함께 두 번째 비교기에 입력되어, 220V 맥류가 8.5V 이상이고 110V 맥류가 8.5V 이하인 경우 비교 결과로 High를 출력하고 이외의 경우 Low를 출력한다. 전50V 맥류는 기준전압과 함께 세 번째 비교기에 입력되어 110V 맥류가 8.5V 이상이고 50V 맥류가 8.5V 이하인 경우는 비교결과로 High를 출력하고 이외의 경우 Low를 출력한다. 25V 맥류는 기준전압과 함께 네 번째 비교기에 입력되어 50V 맥류가 8.5V 이상이고 25V 맥류가 8.5V이하인 경우는 비교결과로 High

를 출력하고 이외의 경우는 Low를 출력한다. 12V 맥류는 기준전압과 함께 다섯 번째 비교기에 입력되어 25V맥류가 8.5V이상이고 12V맥류가 8.5V 이하인 경우는 비교결과로 High를 출력하고 이외의 경우 Low를 출력한다. 9V 맥류는 기준전압과 함께 여섯 번째 비교기에 입력되어 12V 맥류가 8.5V 이상이고 9V 맥류가 8.5V 이하인 경우는 비교결과로 High를 출력하고 이외의 경우 Low를 출력한다. 6V 맥류는 기준전압과 함께 일곱 번째 비교기에 입력되어 9V 맥류가 8.5V 이상이고 6V 맥류가 8.5V 이하인 경우는 비교결과로 High를 출력하고 이외의 경우 Low를 출력한다. 비교기회로부터의 선택제어 출력신호는 Fig. 6과 같은 파형을 갖는다.

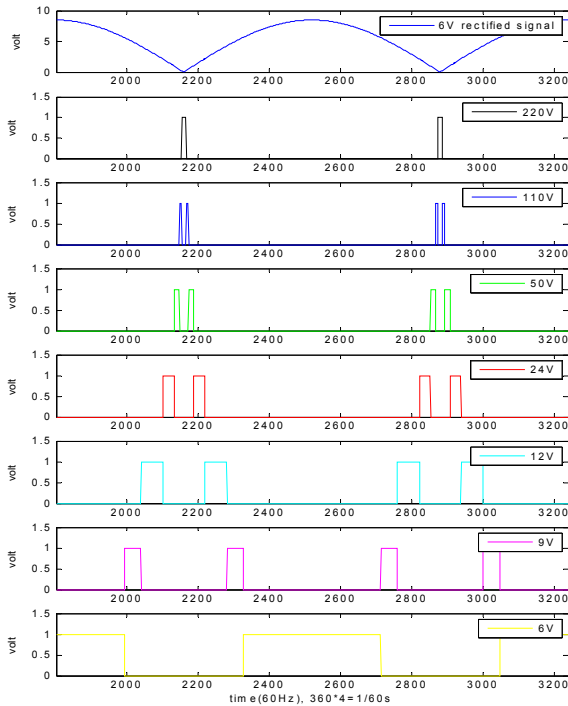


Fig. 6. 다단 맥류 선택 제어 신호

다단 스위칭 선택기회로부터는 다수의 스위칭소자를 이용하여 스위칭 회로를 구성한다. 다단 비교기회로부터 출력된 ‘기준 직류 전압에 가장 가까운지 비교 결과 신호중 High에 해당하는 맥류전압을 선택하여 통과시킨다. 다음 Fig. 7에는 여러 레벨의 맥류 전압과 그 중 선택된 정류출력의 예를 나타낸다. 위상각 $0^\circ \sim 1^\circ$ 에서는 220V의 맥류가 선택되며 $2^\circ \sim 3^\circ$ 에서

는 110V의 맥류가 선택된다. $4^\circ \sim 6^\circ$ 에서는 50V가 $7^\circ \sim 14^\circ$ 에서는 24V가, $15^\circ \sim 30^\circ$ 에서는 12V가, $31^\circ \sim 41^\circ$ 에서는 9V가 선택되고, $42^\circ \sim 138^\circ$ 에서는 6V의 맥류가 선택된다. 다시 $139^\circ \sim 149^\circ$ 에서는 9V가 선택되고, $150^\circ \sim 165^\circ$ 에서는 12V가 선택되고, $166^\circ \sim 173^\circ$ 에서는 25V가 선택되고, $174^\circ \sim 176^\circ$ 에서는 50V가 선택되고, $177^\circ \sim 178^\circ$ 에서는 110V가 선택되고, $179^\circ \sim 180^\circ$ 에서는 220V의 맥류가 선택된다.

다단 스위칭회로부에서의 출력신호를 Fig. 7에 나타내었다. 제안의 회로는 기존의 교류-직류 정류회로의 맥류보다 더 직류에 가까운 맥류를 얻게 되어 Fig. 7과 같이 출력파형을 얻을 수 있게 된다.

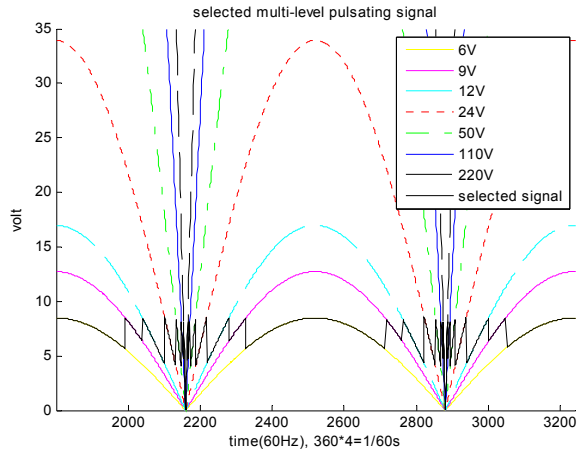


Fig. 7. 제안 1 다단 맥류 선택 파형

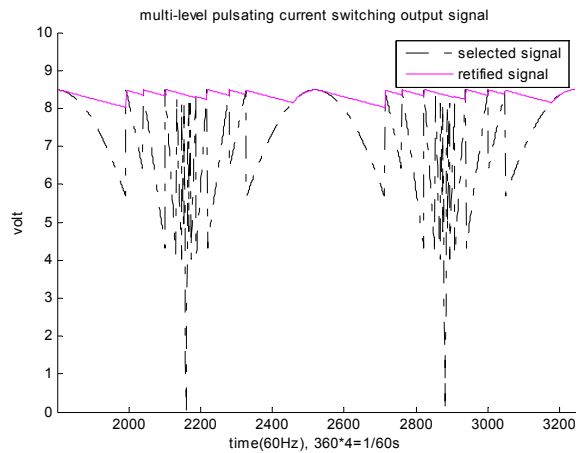


Fig. 8. 제안 1 다단 맥류 선택 스위칭 교류-직류 변환 필터출력(부하율 10%)

마지막으로 다단스위칭 회로를 통한 정류신호는 필터를 통해 직류에 가깝게 변환되며, 방전 특성을 고려한 전압파형은 Fig. 8에 도시되었다. Fig. 2의 기존 전류 회로의 방전특성을 고려한 전압파형과 Fig. 8의 제안회로의 전압 파형을 비교할 때 제안한 회로는 리플 전압이 낮아 성능이 우수함을 알 수 있다.

나. 제안 2 동작원리

앞에서 제안한 방식은 대략 배수 관계의 여러 맥류 중 기준전압에 가까운 맥류를 선택함으로써 리플 전압을 줄일 수 있도록 해준다. Fig. 8과 같이 앞에서 제안한 방식의 필터 출력과 Fig. 2에서의 기존 회로의 출력을 비교해 보면 기존방식의 리플전압이 크며, 제안방식에서 다른 맥류를 선택하여 리플전압이 작다.

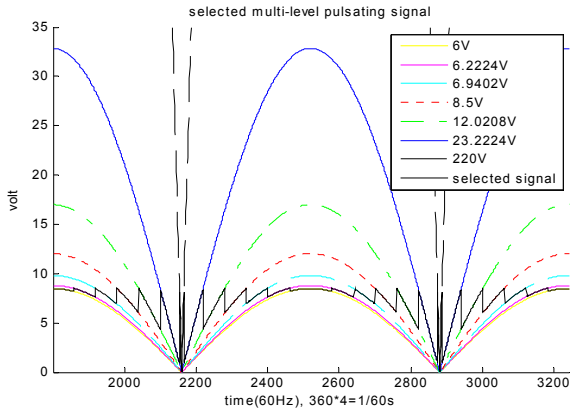


Fig. 9. 제안 2 다단 맥류 선택파형

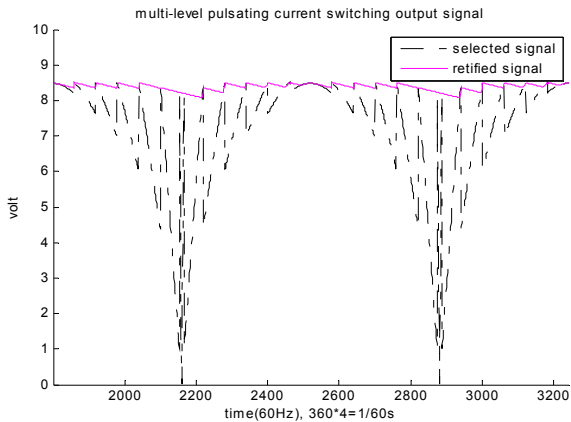


Fig. 10. 제안 2 다단 맥류 선택 스위칭 교류-직류 변환 필터출력(부하율 10%)

앞에서의 경우에는 다양한 크기의 전압 방식의 예로서 220V, 110V, 50V, 24V, 12V, 9V, 6V를 이용하였다. 그 결과, 필터에는 불균등 위상간격으로 기준전압에 도달하는 전압이 입력되었다. 이 맥류전압의 크기를 다단 맥류 선택 파형이 등 간격 위상차를 두고서 선택이 될 수 있도록 전압을 정한다면 필터에는 주기적으로 기준전압에 도달하는 전압이 입력될 것이고 리플전압이 작아질 것이다. Fig. 9는 입력 전압을 220V, 23.2224V, 12.0208V, 8.5V, 6.9402V, 6.2224V, 6V로 했을 때 제안 2의 다단 맥류 선택파형을 보여준다. Fig. 10은 다단 맥류 선택 스위칭 교류-직류 변환 필터출력을 나타낸 것이다. 제안 2의 방식은 제안 1방식보다 균등 위상간격으로 다단맥류가 선택됨을 볼 수 있다.

4. 시뮬레이션

가. RC 회로의 방전 전압 파형 모델링

일반적으로 RC회로의 방전 전압(V_{out})은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{out} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

여기서 R 은 부하저항 임피던스, C 는 필터 커패시터 용량, t 는 시간이며 RC 는 시정수이다. 이 결과를 이용하여 디지털로 시뮬레이션 하기 위한 블록도는 Fig. 11과 같다. 즉, 이전의 출력 전압을 sample 주기 시간인 1 step 만큼이 지연되어 1-K 배로 곱해진 출력과 입력 맥류 전압(V_{in})이 비교된 후 큰 전압이 선택되어 출력된다.

여기서 K 는 전압저하율이며, 전압저하율은 $K = \Delta t / RC$ 로 표현된다. 예를 들어, AC 주파수 60Hz이며, 위상각 1°당 4회 sampling하는 경우, 샘플주기 시간 Δt 는

$$\Delta t = \frac{1}{60} \cdot \frac{1}{360} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{10640} \text{ sec}$$

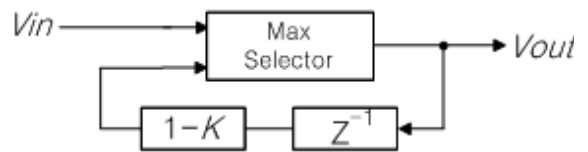


Fig. 11. 필터 출력 전압

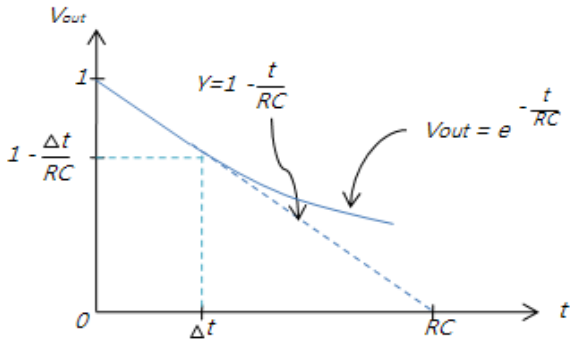


Fig. 12. RC 필터에 의한 방전 전압 파형 그래프

이다. 필터에 의한 방전 전압의 변화는 Fig. 12와 같이 지수 적으로 감소 할 것이고, 본 시뮬레이션에서는 한 스텝 마다 일정한 전압 강하율 만큼 감소한 것으로 하였다.

만일 시정수 $RC=1/106.4$ 이라 가정하면 전압 잔류율은 $1-K=1-\Delta t/RC=1-106.4\Delta t=0.99$ 가 된다.

부하 단자 전압을 일정하다고 가정할 때, 부하전력 $P=V^2/R$ 이므로 부하 저항 R 과 부하율은 서로 반비례 관계를 갖는다.

본 시뮬레이션에서는 부하(전력) 10% 일 때의 전압 강하율 K 를 0.0003으로 하고 이에 따라 전압 잔류율을 0.9997로 하였고 부하가 10% 씩 증가할 때마다 K 값이 0.0003의 배수로 증가하는 것으로 하였다.

Table 1은 부하율 10%, 50%, 100%일 때 K , RC 의 관계를 나타낸다.

Table 1. 부하율과 시정수의 관계

부하율	K	RC
10%	0.0003	0.3133
50%	0.0015	0.0627
100%	0.0030	0.0313

나. 시뮬레이션 결과 비교

다음 Fig. 13, 14, 15는 부하(전력)이 50%, 100% 일 때의 기존회로, 제안 1방식, 제안 2방식의 필터 출력 전압을 나타낸 것이다.

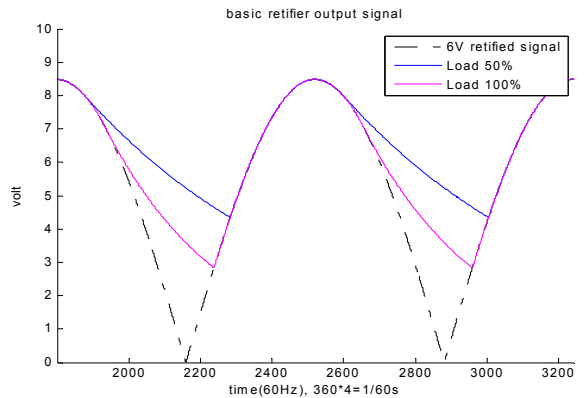


Fig. 13. 기존회로 출력(부하율 50%, 100%)

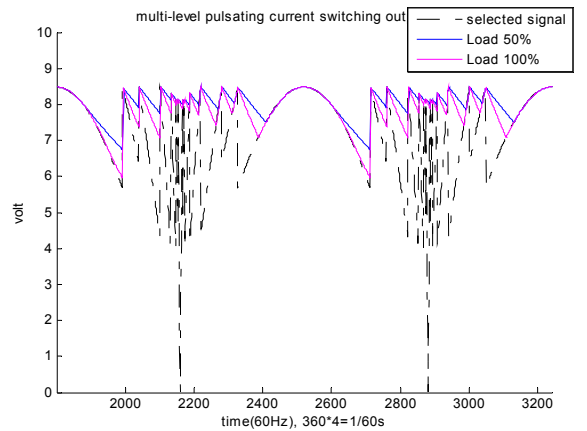


Fig. 14. 제안 1 다단맥류 선택 스위칭 교류-직류 변환 필터출력(부하율 50%, 100%)

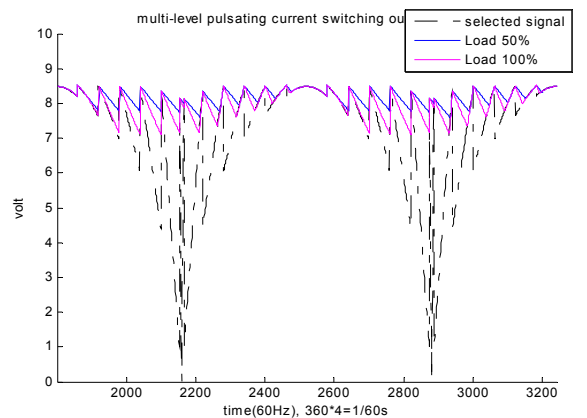


Fig. 15. 제안 2 다단맥류 선택 스위칭 교류-직류 변환 필터출력(부하율 50%, 100%)

기존 회로는 부하(전력)이 커짐에 따라 Fig. 13과 같이 리플전압이 큰 것으로 나타난다. 이에 비해 제안 1, 2의 경우 Fig. 14, 15와 같이 부하(전력)이 크더라도 단자전압이 너무 낮아지기 전에 원하는 직류값에 근접한 다른 맥류가 선택되어 콘덴서를 충전하기 때문에 기존 방식에 비해서 리플전압이 현저히 줄어들게 된다. 제안 1과 제안 2의 그래프를 비교해 보면, 제안 2는 맥류를 선택하는 시간을 등간격 위상에서 선택을 하기 때문에 제안 1에 비해서 고르게 선택이 되어서 리플전압이 작게 일어나게 됨을 확인 할 수 있다.

다음 Fig. 16, 17, 18, 19는 기존 방식, 제안 1방식, 제안 2방식에서의 부하(전력)에 따른 평균 전압, 정규화된 출력전압, 평균 리플전압, Peak to Peak 전압을 보여준다.

우선 평균 DC 전압을 살펴보면, Fig. 16, 17에서 부하(전력)이 10%와 100%인 경우 평균 DC 전압은 기존 방식은 약 7.8V에서 6.0V로 약 23%의 전압이 저하된다. 제안 1방식은 8.3V에서 7.9V로 약 4.8%의 전압이 저하되고, 제안 2방식은 8.4V에서 8.0V로 약 4.7%의 전압이 저하되어 제안 1, 2방식의 경우가 기존 방식보다 부하가 증가하더라도 직류전압저하가 작게 나타남을 확인할 수 있다.

리플전압을 살펴보면, Fig. 18, 19에서 부하(전력)이 10%와 100%인 경우 기존방식은 0.42V에서 1.9V로서 평균 DC 전압대비 각각 5.4%, 32%의 리플율을 보인다. 제안 1방식의 리플전압은 0.1V에서 0.5V이며, 평균 DC 전압대비 각각 1.3%, 6.6%의 리플율을 보인다. 제안 2방식의 리플전압은 0.1V에서 0.4V이며 평균 DC 전압 대비 각각 1.2%, 4.4%의 리플율을 보인다. 따라서 기존 방식은 부하가 증가함에 따라 리플전압이 급속히 커지지만 이에 비해 제안 1, 2방식은 모두 부하가 증가하더라도 리플전압이 크게 증가하지 않아 고른 성능을 보인다. 특히 제안 2방식은 제안1보다도 리플전압 증가가 가장 작다.

Peak to Peak 전압을 살펴보면, Fig. 20에서 부하(전력)이 10%와 100%인 경우 기존방식은 1.4V, 5.6V를 보인다. 제안 1방식은 0.47V, 2.56V를 갖는다. 제안 2방식은 0.47V, 1.4V를 갖는다. 따라서 기존 방식은 부하가 증가함에 따라 Peak to Peak 전압이 크게 나타나고 이에 비해 제안 1, 2방식은 모두 부하가 증가하더라도 Peak to Peak 전압증가가 크지 않아 고른 성능을 보인다. 특히 제안 2방식의 경우가 가장 작은 Peak to Peak 전압을 보인다.

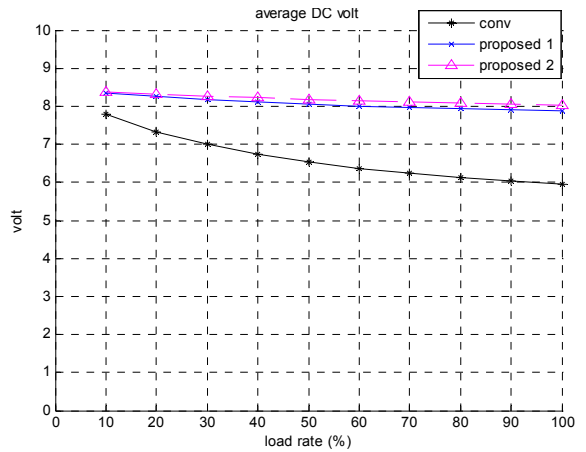


Fig. 16. 부하에 따른 평균전압

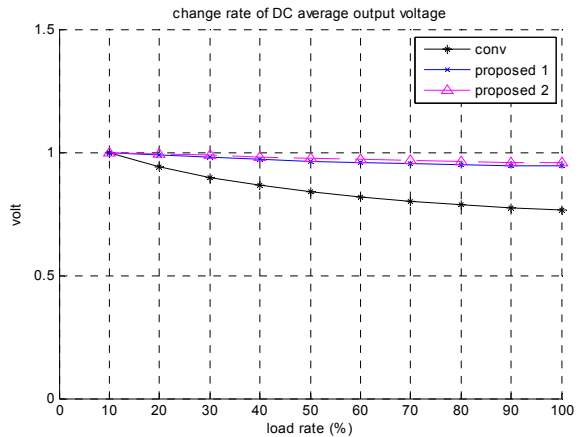


Fig. 17. 정규화된 출력전압

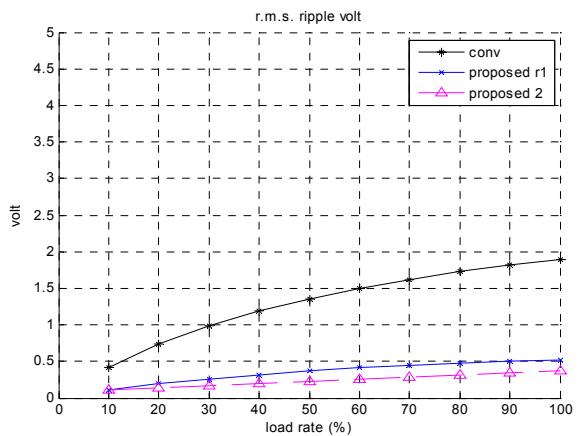


Fig. 18. 부하에 따른 실효 리플전압

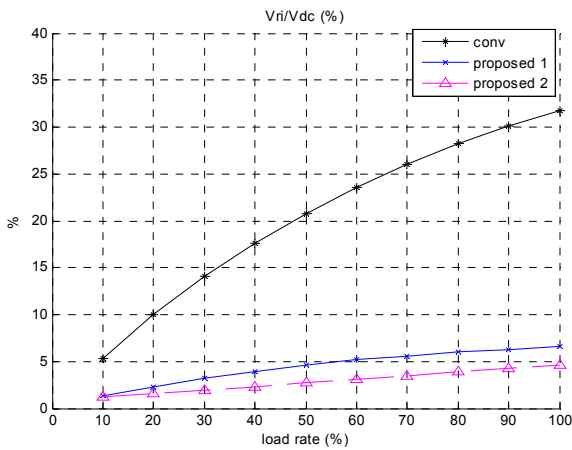


Fig. 19. 부하에 따른 평균 DC 전압 대비 실효 리플률(%)

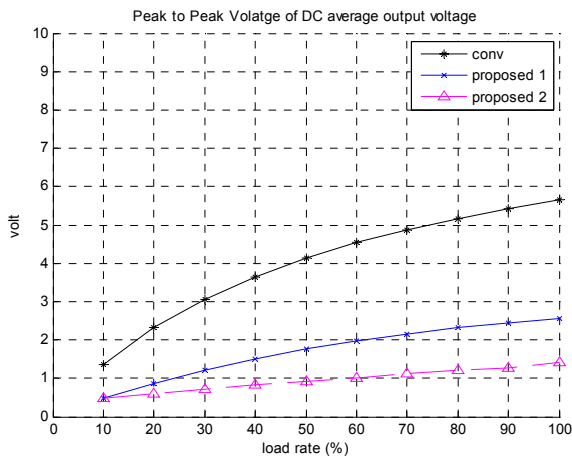


Fig. 20. 부하에 따른 Peak to Peak 전압

5. 결론

본 논문을 통해 다단 맥류 선택 스위칭을 이용한 교류-직류 변환방식이 제안되었다. 제안 1방식은 다단탭 변환기에서 대략 배수 관계를 갖는 다단 교류전압이 출력 되도록 하여 기준전압에 가까운 맥류파형을 출력되도록 하고, 제안 2방식은 맥류 선택 파형이 등간격을 두고서 선택이 될 수 있도록 교류전압을 정하여 필터에 주기적으로 기준전압에 도달하는 전압이 입력되게 한다. 제안한 변환방식 1, 2 모두 기존 방식보다 부하증가에 따른 평균 DC 전압의 저하가 적고, 리플

전압이 현저히 줄어들어 작은 Peak to Peak 전압을 보이는 것을 확인하여 성능이 우수함이 확인되었고, 제안 2의 방식은 1의 방식보다 좀 더 적은 평균 DC 전압저하, Peak to Peak 전압 증가를 보여, 보다 안정적인 성능을 갖는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 기술을 이용하면 여러 교류의 맥류 중 원하는 직류 값에 가까운 맥류를 선택함으로써 직류에 가까운 정류전압을 얻을 수 있어서 동일한 리플전압 성능을 얻기 위해 기존의 방식보다 적은용량의 필터 사용 가능하며, 대용량 부하에서도 우수한 성능을 나타낸다. 또한 리플 전압 발생을 원천적으로 줄이기 때문에 교류-직류 변환 효율을 높일 수 있다.

제안한 교류-직류 변환방식은 그 회로구성의 복잡함, 제어 회로에 소모되는 전력 등을 고려할 때 부하가 낮은 경우에는 오히려 효율이 나빠질 수 있다. 그러나 부하가 증가하는 경우 제어 회로의 소모 전력이 상대적으로 작은 값이 될 수 있고 따라서 효율과 출력 전압의 품질이 높아지는 것을 기대할 수 있다.

교류 직류 변환 효율은 통상 60~70% 정도이나, 본 논문에서 제안한 다단 맥류 스위칭을 이용한 교류 직류 변환방식은 교류 직류 변환 효율을 획기적으로 높일 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] R. W. Menzies, "Advanced Static Compensation Using a Multilevel Gto Thyristor Inverter", IEEE'94 Tran Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 732~738, April 1995.
- [2] Bakari Mwinyiwiwa, "Multimodular Multilevel Converters with Input/Output", IEEE Tran Vol. 33, No. 5, pp. 1214~1219, Sep. 1997.
- [3] 이성민, 김태식, 김환우 "다단 맥류 스위칭을 이용한 교류-직류 변환", 대한전자공학회 학술심포지움, pp. 73~74, 2009. 12.
- [4] 이성민, 정재수, 이창해, 이재생, "다단 맥류와 선택 스위치를 이용한 교류-직류 변환기술", 특허청 출원, 출원번호 10-2010-0009978, 2009. 12.
- [5] 이성민, 이재생, "다단 맥류와 선택 스위치를 이용한 교류-직류 변환기술 및 시뮬레이션", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 2046~2049, 2010. 6.