



계통연계 인버터의 고조파 저감을 위한 개선된 불연속 전압 변조 방식

1. 소개

전기 에너지에 대한 수요확산에 따라 ESS (Energy Storage System), 신재생 에너지, 전기자동차 충전전기 등의 여러 전력 변환시스템에 계통연계 인버터가 사용되며, 부피 저감과 효율 향상에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 불연속 전압 변조 방식은 전류가 가장 큰 일정 구간 동안 스위칭을 하지 않는 스위칭 방법으로 인버터의 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 계통연계 인버터의 효율을 향상 시키기 위해 60도 불연속 변조 방식이 많이 사용된다. 인버터를 계통과 연계하기 위해서 계통연계 필터가 필요하다. L-필터는 구성이 간단 하지만 대용량 시스템에서 요구되는 전류 품질을 만족하기 위해 큰 인덕턴스를 가진 L-필터가 필요하다. 인덕턴스가 큰 필터를 사용하면 부피가 클 뿐만 아니라 가격이 높고 동특성이 낮은 단점이 있다. 따라서, L-필터 대신 LCL-필터를 사용하면, 인덕턴스가 작아지기 때문에 필터의 크기를 줄일 수 있어 가격을 줄이고 동특성을 향상 시킬 수 있다. LCL-필터는 LC 공진에 의한 공진 주파수를 갖기 때문에 시스템 안정도에 악영향을 미칠 수 있어 이를 고려한 필터 및 제어기 설계가 필요하다. 일반적으로 LCL-필터의 공진 주파수는 스위칭 주파수의 1/2 이하가 되게 필터를 설계한다. 불연속 전압 변조를 사용하면 인버터 출력단에 많은 고조파 전압이 넓은 주파수 대역에 발생하고, 공진 주파수 대역에 고조파 전압이 분포할 경우 계통 전류가 공진하는 문제가 발생한다. 전류 공진 문제는 전력 품질

질을 하락시키고 소음, EMI 등의 문제를 발생시킨다.

본 연구에서는 LCL-필터를 사용하는 계통연계 인버터의 전류 품질 향상을 위한 개선된 불연속 전압 변조 방식을 제안한다. 제안하는 방법은 6차 고조파를 전압 변조 신호에 주입하여 전압 변조 신호의 불연속적인 변화를 연속적으로 만들어 인버터 출력단에 발생하는 고조파 전압을 줄이고 계통 전류의 공진 문제를 방지할 수 있다.

2. 시스템 구성

계통연계 시스템은 NPC-타입 3-레벨 인버터, LCL-필터, 직류단 전압으로 구성되고 그림 1과 같다. 양방향 전력 전달을 위해 인버터는 직류단 전압과 전류 제어를 수행한다. LCL-필터는 두 인덕터와 상 당 병렬로 연결된 커패시터로 구성된다. 이 경우 LCL-필터에 의해 공진 주파수 대역이 형성되고 공진 주파수는 다음과 같다.

$$f_{resonant} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}} \quad (1)$$

LCL-필터의 전달 함수는 다음과 같다. 여기서 $Z_{LC}^2 = 1/L_T C_f$, $\omega_{res}^2 = L_T Z_{LC}^2 / L_i$, $L_T = L_i + L_2$ 이다.

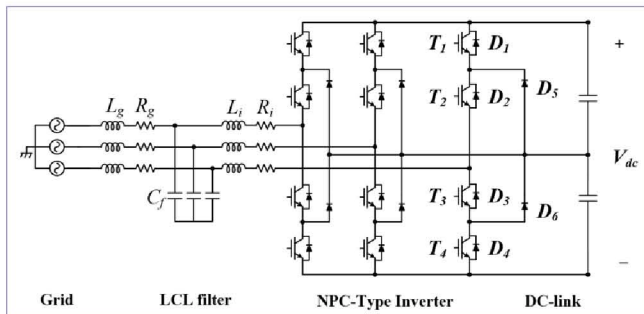


그림 1 계통연계 시스템의 구성

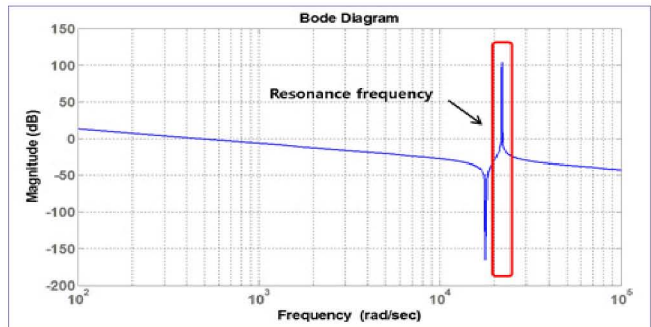


그림 2 계통연계 시스템의 구성

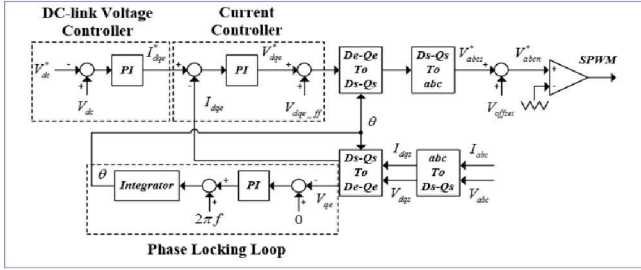


그림 3 계통연계 시스템의 제어기 구성

$$G(s) = \frac{i(s)}{v(s)} = \frac{1}{L_i s} \frac{s^2 + R_d C_f Z_{LC}^2 s + Z_{LC}^2}{s^2 + R_d C_f \omega_{res}^2 s + \omega_{res}^2} \quad (2)$$

그림 2는 식 (2)에 대한 보드 선도를 나타내고 공진 주파수에서 LCL-필터의 이득이 큰 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 인버터 출력 전압의 고조파가 공진 주파수 대역에 존재하면 출력 전류가 공진하고 이는 시스템을 불안정하게 만드는 요소로 작용할 수 있다.

계통연계 시스템의 제어기를 그림 3과 같이 구성하였다. 인버터를 제어하기 위해 이중 제어루프 방식을 사용한다. 직류단 전압 제어기가 상위 제어기로 사용되고 전류 제어기가 하위 제어기로 사용된다. PLL을 통해 추종한 계통의 위상은 동기좌표변환에 사용되고 벡터제어를 통해 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어할 수 있다. 불연속 전압 변조 방식은 오프셋 전압을 통해 구현할 수 있고 이는 상 전압 지령과 직류단 전압을 통해 구할 수 있다.

3. 기존의 불연속 전압 변조 방식

스위칭 손실을 줄이고 인버터의 효율을 향상 시키기 위해 많은 불연속 전압 변조 방식들이 연구되었지만 그 중 60도 불연속 전압 방식이 널리 사용되고 그림 4는 전압 변조 신호를 나타낸다.

PWM을 위해 삼각파와 비교되는 전압 변조 신호는 극 전압 지령으로 상 전압 지령과 오프셋 전압의 합으로 나타낼 수 있다. 이 방식은 60도마다 한 상의 전압 반도체가 스위칭을 하지 않으며 이 구간은 상 전압 지령의 최댓값과 최솟값의 크기 비교를 통해 결정된다.

$$\begin{aligned} V_{as}^* &= \sin(\omega t) \\ V_{bs}^* &= \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{cs}^* &= \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (3)$$

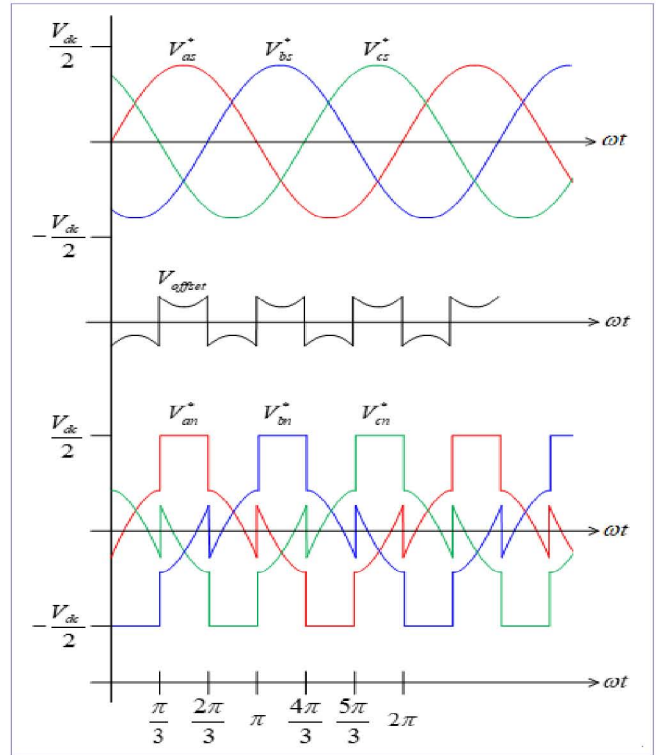


그림 4 60도 불연속 전압 변조 방식의 전압 변조 신호

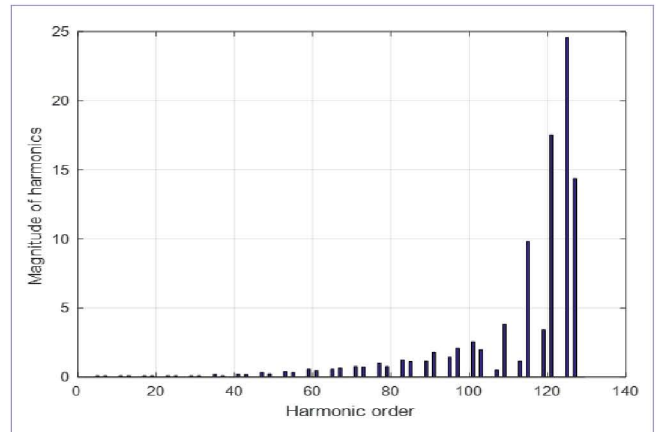


그림 5 60도 불연속 전압 변조 방식 사용 시 고조파 전압의 분포

$$V_{offset} = \begin{pmatrix} V_{dc}/2 - V_{max} & |V_{max}| > |V_{min}| \\ -V_{dc}/2 - V_{min} & |V_{max}| < |V_{min}| \end{pmatrix} \quad (4)$$

그림 4에서 볼 수 있듯이 극 전압 지령은 상 전압 지령이 가장 큰 60도마다 직류단 전압으로 고정되고 이때 지령 전압은 직류단 전압으로 급변하게 된다. 지령 전압이 불연속적으로 변하는 순간에 인버터 출력단에 많은 고조파 전압이 발생하고 전류 공진 문제의 원인이 된다. 실험 조건에서 고조파 전압의 분포는 그림 5와 같다.

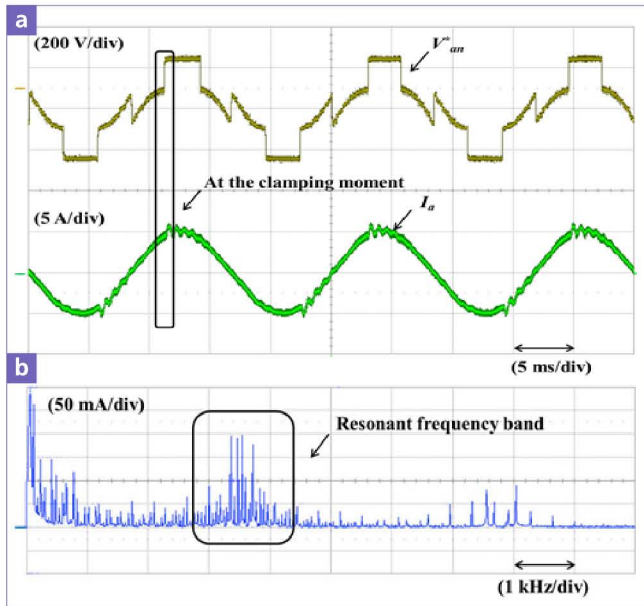


그림 6 60도 불연속 전압 변조 방식 실험 결과

60도 불연속 전압 변조 방식을 사용하면 스위칭 주파수 대역의 고조파가 가장 크지만 고조파 전압이 스위칭 주파수의 1/2 배 이하까지 넓게 분포한다. 이때 LCL-필터의 공진 주파수 대역인 60차 수 부근에 고조파 전압이 존재하고 계통 전류가 공진한다. 따라서, 전압 변조 신호가 불연속적으로 변하는 60도 마다 전류가 공진하는 문제가 발생한다.

전류의 공진 문제를 분석하고 제안하는 불연속 전압 변조 방식을 검증하기 위해 3kW 시제품을 개발하여 실험을 수행하였다. 전원의 선간 전압은 220Vrms, 60Hz이고 직류단 전압은 450V이다. 인버터 측 인덕턴스는 1.4mH, 계통 측 인덕턴스는 0.7mH이고 필터 커패시터는 4.4uF이다. 직류단 커패시터는 6800uF, 스위칭 주파수는 7.8kHz이고 LCL-필터에 의한 공진 주파수는 3495Hz이다.

그림 6은 60도 불연속 전압 변조 방식의 실험 결과이다. 그림 6(a)는 시간 영역에서의 파형을 나타내고 여기서 볼 수 있듯이 극 전압 지령은 60도 마다 불연속적으로 변하게 되고 이때 전류가 공진하는 것을 볼 수 있다. 그림 6(b)는 주파수 영역에서의 전류를 보여준다. 계통 전류에 많은 고조파가 존재하지만 특히 공진 주파수 대역의 고조파가 큰 것을 볼 수 있다.

4. 제안하는 불연속 전압 변조 방식

본 연구에서는 전류 공진 문제를 해결하기 위해 오프셋 전압에 6차 고조파를 주입하고 그 방법은 그림 7과 같다. 기존의 60도 불연속 전압 방식의 전압 변조 신호가 직류단 전압으로 고

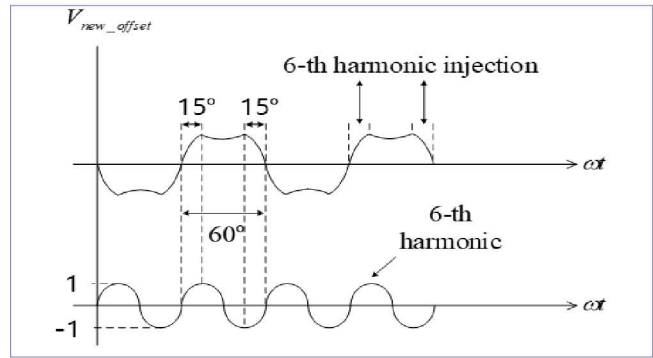


그림 7 60도 불연속 전압 변조 방식 사용 시 고조파 전압의 분포

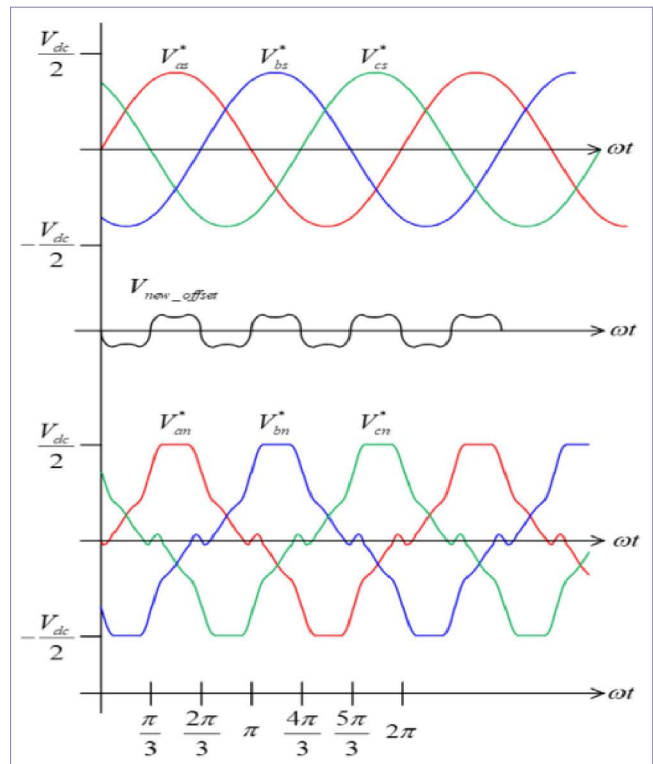


그림 8 60도 불연속 전압 변조 방식의 전압 변조 신호

정되는 60도 구간 중 앞의 15와 뒤의 15도에 6차 고조파를 주입한다. 나머지 30도 구간에서 제안하는 오프셋은 기존의 오프셋과 동일하며 이 구간에서 전압 변조 신호는 직류단 전압으로 고정된다.

제안하는 불연속 전압 변조 방식은 오프셋 전압의 변형을 통해 전압 변조 신호를 연속적으로 변화시키고 인버터에서 발생하는 고조파 전압을 줄일 수 있다. 따라서, 적절한 6차 고조파 주입을 통해 오프셋 전압을 연속적으로 만드는 것이 중요하다. 오프셋 전압의 반 주기와 6차 고조파의 한 주기가 같기 때문에 60도 마다 적절한 6차 고조파 주입이 가능하다. 크기가 1인 6차 고조파를 고려할 때, 앞의 15도 구간이 끝나는 시점은 6차 고조파의 1/4 주기로 크기가 1이 된다. 같은 방법으로 뒤의

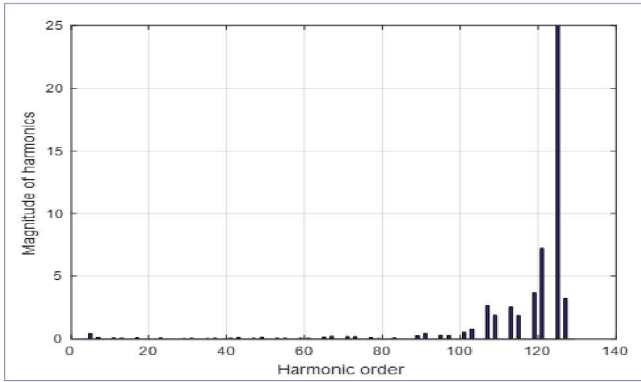


그림 9 제안하는 불연속 전압 변조 방식 사용 시 고조파 전압의 분포

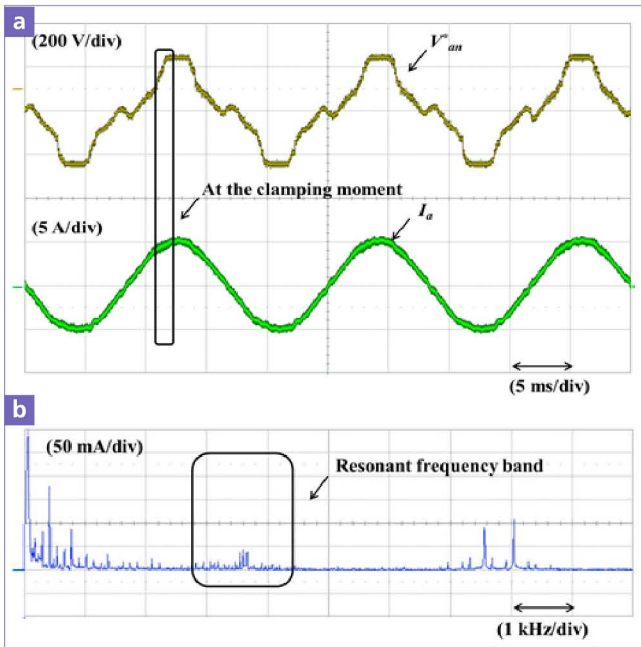


그림 10 제안하는 불연속 전압 변조 방식 실험 결과

15도가 시작되는 시점은 6차 고조파의 3/4 주기로 크기가 -1이 된다. 따라서 위에서 언급한 두 시점에서 6차 고조파의 크기와 기존의 오프셋 전압의 크기가 같아야 하기 때문에 두 구간에서 크기가 1인 6차 고조파와 기존의 오프셋 전압을 곱하여 제안하는 불연속 전압 변조 방식의 오프셋 전압을 만들 수 있다. 그림 8은 제안하는 불연속 전압 변조 방식의 전압 변조 신호를 나타낸다. 기존 오프셋 전압과 비교하여 제안하는 오프셋 전압은 연속적으로 변하고 이에 따라 극 전압 지령도 직류단 전압으로 고정될 때 연속적으로 변하는 것을 볼 수 있다. 그림 5와 동일한 조건에서 제안하는 불연속 전압 변조 방식의 고조파 전압 분포는 그림 9와 같다. 스위칭 주파수 대역의 고조파가 가장 크고 이는 그림 5와 유사하지만 저차 고조파의 분포는 다른 것을 볼 수 있다. 그림 9에서 100차 이하의 고조파가 저감되어 넓은 주파수 대역에 고조파가 분포하지 않는다.

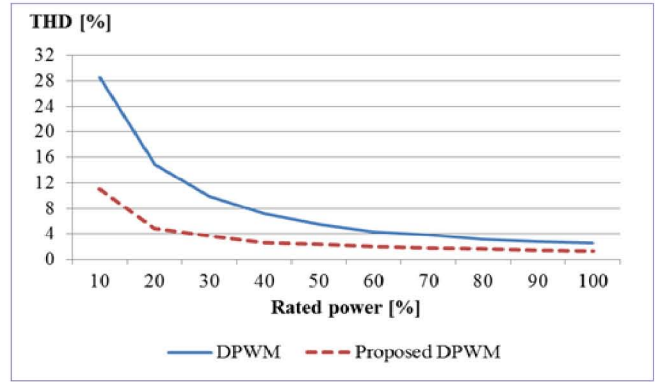


그림 11 스위칭 방법에 따른 전류 THD

LCL-필터의 공진 주파수는 스위칭 주파수의 1/2 이하에 위치하기 때문에 이 주파수 대역의 고조파 전압 저감이 중요하다. 그림 5와 비교하여 공진 주파수 대역인 60차 부근에서 고조파 전압이 충분히 줄어든 것을 볼 수 있다. 따라서, 제안하는 불연속 전압 변조 방식은 전류의 공진 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

그림 10은 제안하는 불연속 전압 변조 방식의 실험 결과로 그림 10(a)와 그림 10(b)는 시간 영역과 주파수 영역에서의 파형을 나타낸다. 극 전압 지령은 불연속적인 변화 없이 연속적으로 직류단 전압으로 고정되는 것을 볼 수 있다. 그림 6(a)와 비교하여 극 전압 지령이 직류단 전압으로 고정되는 순간에 전류가 공진하는 문제가 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 6(b)와 비교하여 넓은 주파수 대역에서 전류의 고조파가 줄어들고 스위칭 주파수 대역과 저차 고조파만 남아 있는 것을 볼 수 있다.

그림 10은 스위칭 방법에 따른 전류의 THD를 보여준다. 전류의 THD는 YOKOGAWA 社의 WT3000 전력분석기로 측정하였다. 제안하는 불연속 변조 방식을 사용한 경우 전 부하 영역에서 전류의 THD가 60도 불연속 전압 변조 방식의 전류 THD보다 낮은 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 LCL-필터를 사용하는 계통연계 인버터에 60도 불연속 전압 변조 방식을 사용할 경우 발생하는 공진 전류의 원인을 분석하고 이를 해결하기 위해 개선된 불연속 전압 변조 방식을 제안하였다. 실험을 통해 제안하는 불연속 전압 변조 방식의 타당성을 검증하였다. 본 연구 결과를 이용하여 고효율/고품질의 계통연계 인버터 운용이 가능할 것으로 기대한다. 