

고효율의 3-level 3-phase 무변압기형 양방향 인버터

정영승¹, 정서광¹, 노준택², 신익두², 권봉환¹
 포항공과대학교¹, (주)에이치엠티²

3-level 3-phase Bidirectional Transformerless Inverter with High Efficiency

Yeong-Seung Jeong¹, Seo-Gwang Jeong¹, Jun-Taek Noh², Ik-Du Shin², Bong-Hwan Kwon¹
 Pohang University of Science and Technology (POSTECH)¹, HMT²

ABSTRACT

본 논문에서는 고효율을 갖는 3-level 3-phase 무변압기형 양방향 인버터를 제안한다. 제안된 인버터는 두 개의 직류링크 커패시터를 통해 연결된 3-level dc-dc 컨버터와 T-type 인버터로 구성된다. 따라서 낮은 전압 스트레스를 가지며 스위칭 및 도통 손실이 줄어들고 변압기가 없어 높은 전력 밀도와 고효율을 달성한다. 스위칭에 의해 발생하는 직류링크 중성점 변화에 따른 출력 전압왜곡은 제안된 중성점 제어 알고리즘을 통해 직류링크 전압의 균형을 맞추어 최소화된다. 또한 T-type 인버터는 제안하는 제어 알고리즘을 통해 높은 품질의 계통전류를 출력한다. 본 논문에서는 제안된 인버터의 이론적 해석 및 시제품의 실험을 수행하여 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 신재생 에너지 산업의 성장에 따라 높은 전력을 변환하는 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 이런 대용량 전력 변환을 위해 multi-level 인버터에 대한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 3-level 3-phase 인버터는 두 개의 직류링크 커패시터와 높은 직류링크 전압을 유지하기 위한 dc-dc 컨버터를 포함한다.^[1] 3-level 인버터는 2-level 인버터에 비해 스위칭에 걸리는 전압 스트레스와 스위칭 및 도통 손실이 적은 장점을 가진다. 하지만 인버터의 스위칭과 소자 특성의 불일치에 의해 두 개의 직류링크 커패시터 사이의 중성점이 흔들리고 그에 따라 출력이 왜곡되는 결점을 가진다. 이를 해결하기 위해 다양한 인버터 제어방식이 연구되고 있다.^[2] 하지만 기존의 제어방식들은 여전히 중성점 전압의 저주파 진동이 있고 인버터단의 스위칭 제어가 복잡해지는 단점이 있다.

본 논문에서는 3-level dc-dc 컨버터를 사용한 3-level 3-phase 양방향 인버터를 제안한다. 제안된 인버터는 3-level 인버터로 스위칭 및 도통 손실이 적고 변압기가 없어 높은 전력밀도와 고효율을 달성한다. 제안된 인버터는 기존의 인버터단의 복잡한 제어를 통해 중성점을 맞추는 방법과 달리, dc-dc 컨버터의 간단한 제어를 통해 중성점 진동을 없애고 높은 품질의 3상 전류를 출력한다.

2. 제안된 3-level 양방향 인버터

2.1 제안된 인버터의 구성 및 특징

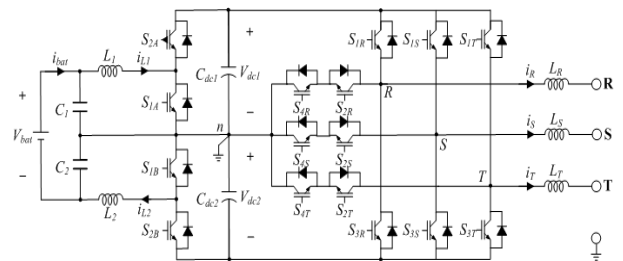


그림 1. 제안된 3-level 3-phase 인버터
 Fig. 1. Proposed 3-level 3-phase inverter

제안된 양방향 인버터는 그림 1과 같이 3-level dc-dc 컨버터와 T-type 인버터가 직류링크 커패시터로 연결된 구조를 가진다. 3-level dc-dc 컨버터는 S_{1A} , S_{2A} 와 S_{1B} , S_{2B} 의 스위칭을 통해 배터리를 충/방전시킨다. T-type 인버터는 3상 4선식으로 중성점이 그라운드로 연결되어 있으며 제안된 3상 제어 알고리즘을 통해 높은 품질의 계통전류를 출력한다. 두 개의 직류링크 커패시터에 걸리는 전압은 제안된 밸런싱 제어 알고리즘을 통해 균형을 이루고 결과적으로 인버터의 출력 왜곡이 최소화 된다.

2.2 3-level dc-dc converter

3-level dc-dc 컨버터의 스위치 S_{1A} , S_{2A} 와 S_{1B} , S_{2B} 는 각각 상보적으로 동작하여 배터리를 충/방전시키며 S_{1A} 과 S_{1B} 는 180°의 위상 차이를 가지고 동작한다.

그림 2는 3-level dc-dc 컨버터의 제어 알고리즘을 나타낸다. Discharging mode에서 3-level dc-dc 컨버터의 듀티비 D_{dchg} 는 인덕터 L_I 의 volt-second 평형 조건에 의해 다음과 같이 공칭 듀티비 D_{ndchg} 과 듀티비 변화율 ΔD_{dchg} 로 나타낼 수 있다.

$$D_{dchg} = D_{n\ dchg} + \Delta D_{dchg} = 1 - \frac{V_{bat}}{V_{dc}} + \frac{L\Delta|i_L|}{2V_{dc}T_s} \quad (1)$$

두 커패시터 사이의 중성점 전압 제어를 위해 밸런싱 듀티비 \hat{D} 를 사용하며 밸런싱 듀티비는 $\hat{D} = K_p(V_{dc1} - V_{dc2})$ 로 정의되고 비례제어기를 통해 얻을 수 있다. 최종적으로 듀티비 D_{dchg} 에 \hat{D} 를 더하거나 빼으로써 D_1 , D_2 를 생성하고 각 듀티비로 스위치 S_{1A} 와 S_{1B} 를 구동한다.

Charging mode에서도 discharging mode와 같이 듀티비 D_{chg} 는 인덕터 L_I 의 volt-second 평형 조건에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

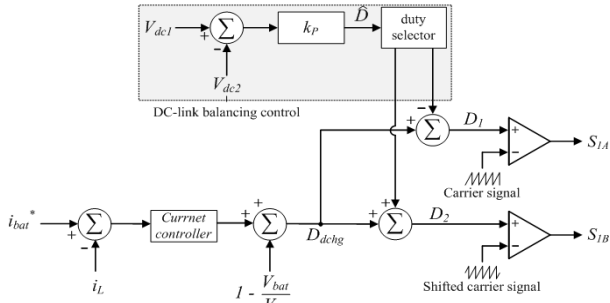


그림 2. Discharging mode에서 제안된 3-level 컨버터의 제어블록 선도

Fig. 2 Control block diagram of proposed 3-level converter in discharging mode

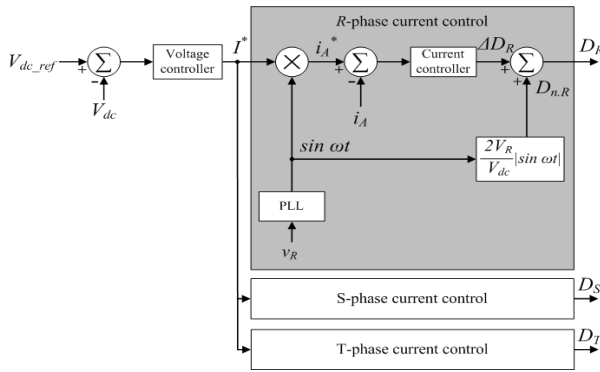


그림 3 제안된 T-type 인버터의 제어 블록 선도
Fig. 3 Control block diagram of proposed T-type inverter

$$D_{chg} = D_{n\ chg} + \Delta D_{chg} = \frac{V_{bat}}{V_{dc}} + \frac{2L\Delta|i_L|}{V_{dc}T_s} \quad (2)$$

Discharging mode에서와 같이 듀티비 D_{chg} 에 밸런싱 듀티비 \hat{D} 를 더하거나 빼므로써 D_1 , D_2 를 생성하고 각 듀티비로 스위치 S_{1A} 와 S_{1B} 를 구동한다.

2.3 3-level 3-phase T-type inverter

T-type 인버터는 각 상에 대해 전류제어를 수행한다. 즉 x 는 R , S , T 를 나타낼 때, T-type cell(S_{1x} , S_{2x} , S_{3x} and S_{4x})의 고주파 스위칭 동작에 의해 상전류 i_x 를 조절한다.

T-type cell R 에 대한 동작은 2개의 mode로 구분할 수 있다. v_R 이 양이 되는 반주기 동안 스위치 S_{1R} 와 S_{2R} 는 상보적으로 고주파 스위칭을 하고 S_{3R} 는 항상 on 상태이다. 반대로, v_R 이 음이 되는 반주기 동안 S_{3R} 와 S_{4R} 가 상보적으로 고주파 스위칭을 하고 S_{2R} 가 항상 켜진다.

그림 3은 T-type 인버터의 제어 블록 선도를 나타낸다. 직류링크 커패시터 C_{dc1} , C_{dc2} 가 충분히 크고 동일한 전압이 걸린다고 가정하면, 한 스위칭 주기 $T_{s\ inv}$ 동안 L_R 에 걸리는 평균 전압을 통해 고주파스위칭을 위한 듀티비 D_R 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_R = \frac{2|v_R|}{V_{dc}} + \frac{2L_A}{V_{dc}T_{s\ inv}} \Delta|i_A| = D_{n,R} + \Delta D_R \quad (3)$$

공칭 듀티비 $D_{n,R}$ 은 feed-forward 제어가 역할을 함으로써 v_R 에 대한 전압을 보상한다. 이를 통해 상전류 변화율 $\Delta|i_A|$ 와 듀

티비 변화율 ΔD_R 은 선형관계를 가지고 전류 제어는 그림 3과 같이 간단한 구조를 가진다. T-type cell S , T 에 대한 동작 및 제어는 R 과 같고 제안된 알고리즘에 의해 T-type 인버터는 복잡한 계산 및 제어 없이 높은 품질의 3상 전류를 출력한다.

3. 실험 결과

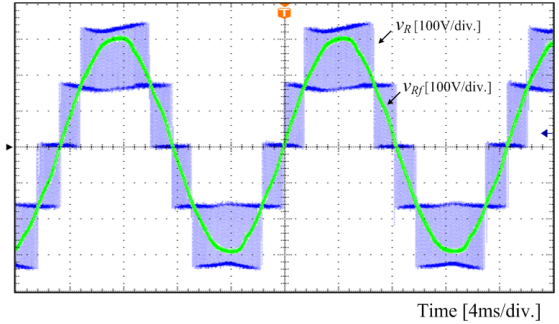


그림 4. Discharging mode에서 제안된 인버터의 출력 상 전압
Fig. 4 Output voltage of proposed inverter in discharging mode

본 논문에서는 제안된 회로의 시작품 실험을 수행하여 타당성을 검증하였다. 시작품의 배터리 공칭전압은 360V, 3상 전압은 210V_{rms}, 60Hz이며 정격전력은 10kW이다. 그림 4는 필터를 통과하기 전 R 상 전압 v_R 과 통과한 R 상 전압 v_{Rf} 이다. 측정된 역률은 0.99이며 정격효율은 97.0%로 제안된 인버터가 고역률과 고효율을 갖는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고효율을 갖는 3-level 3-phase 무변압기형 인버터를 제안하였다. 제안된 인버터는 3-level dc-dc 컨버터의 스위치를 제어함으로써 배터리를 충/방전하며 제안된 밸런싱 알고리즘을 통해 기존의 중성점 제어에 비해 간단하게 중성점 진동을 없애고 높은 전력품질을 달성할 수 있다. 또한 무변압기형 3-level 인버터로 스위칭 및 도통 손실을 최소화하여 높은 전력밀도와 고효율을 달성한다.

본 연구는 2016년 미래과학창조부의 재원으로 포항테크노파크의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO. S0144-15-1007)

참고 문헌

- [1] D. D. Lu and V. G. Agelidis, "Photovoltaic - Battery - Powered DC Bus System for Common Portable Electronic Devices", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 849-855, April, 2009.
- [2] F. Luo, K. H. Loo, and Y. M. Lai, "Simple carrier-based pulse-width modulation scheme for three-phase four-wire neutralpoint-clamped inverters with neutral-point balancing" *IET Power Electronics*, vol. 9, Iss. 2, pp. 365-376, 2016.