

Original Article

모델예측제어 기반 파력발전용 4-선식 인버터들의 출력 성능 비교

노 찬[†]

한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

Comparison of Output Performance of 4-leg Inverters for Wave Energy Converter based on Model predictive Control

Chan Roh[†]

Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

파력변환장치의 고도화에 따른 단일용량 증가로 전력변환장치의 용량 증가와 독립운전 시 불균형 부하 조건에서도 안정적인 전력을 공급할 수 있는 4-선식 토폴로지에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 파력변환장치의 전력 변환장치로 사용되는 2-단계 인버터부터 3-단계 인버터까지 다양한 4-선식 인버터들의 성능을 각각 비교하였다. 또한, 4-선식 인버터들은 일반적이지 않은 구조를 가지고 있기 때문에 컨트롤러를 쉽고 간단하게 구성할 수 있는 모델 예측 제어를 적용하여 각 4-선식 인버터들의 성능을 분석했습니다. 각 4-선식 인버터들의 성능을 검증하기 위해 평형 부하 조건과 불평형 부하 조건에서 비교를 수행했습니다. 이를 기반으로 파력발전용 전력변환장치의 적합한 4-선식 인버터가 확인되었습니다.

Abstract – A study on the capacity increase of a power converter according to the increase in the single capacity of wave energy converters and four-leg topology that can supply stable power even under unbalanced load conditions during independent operation are required. Therefore, in this paper, the performances of various 4-leg inverters, from 2-level inverters to 3-level inverters, which are used as power converters for wave energy converters, are compared respectively. Since the 4-leg converter has an unusual structure, the performance of each 4-leg inverter was analyzed by applying the model predictive control that can easily and simply configure the controller. To verify the performance of each 4-leg inverter, comparison was performed under balanced load and unbalanced load conditions. Based on this, a suitable 4-leg topology of the power converter for wave energy converters was confirmed.

Keywords: 4-leg inverter(4-선식 인버터), Model predictive control(모델예측제어), Balanced load(균형 부하), Unbalanced load(불균형 부하), Wave energy converter(파력발전장치), Efficiency(효율)

1. 서 론

파력발전장치의 기술 고도화와 함께 파력발전용 전력변환장치도 용량 증가에 따른 다단계 컨버터의 적용이 필요하다. 재생가능에너지원 중 가장 많이 연구된 풍력발전장치도 수십 kW에서 수백 kW 급의 용량까지는 2-단계 유형의 전력변환장치를 사용하였지만 단일 용량이 MW급 이상의 용량에서는 다단계 유형의 컨버터를 적용하고 있다. 이와 같이 파력발전용 단일용량 증가에 따른 다단계 유형의 컨버터에 관한 연구가 요구되고 있다(Kouro *et al.*[2010]; Roh[2022]).

다단계 유형의 컨버터는 고/중 전력 범위 및 저전압 애플리케이션에서 기존의 2-단계 인버터에 비해 낮은 총 고조파 왜곡(total harmonic distortion, THD), 낮은 스위칭 손실, 낮은 전압 스트레스 등과 같은 높은 품질의 전력을 제공할 수 있다(Dijkhuizen [2012]). 특히, 다단계 유형 컨버터 중에서 중립점 클램프(neutral point clamped, NPC) 유형 3-단계 인버터는 계통 연계 애플리케이션을 위한 최고의 토폴로지 중 하나로 간주되고 있다. 하지만 기존의 3-단계 3-선식 인버터는 불평형 부하와 비선형 부하가 발생하는 애플리케이션에 적합하지 않다. 그래서 이를 극복할 수 있는 적절한 토폴로지가 필요하다. 특히, 파력발전장치는 도서지역에 설치되기 때문에 불평형 및 비선형 부하에 대한 대처가 필수적이다. 4-선식 인버터는 중성점 전류를 제어할 수 있는 경로를 제공할 수 있기 때문에 비선형 및 불평형 부하 등의 정밀한 전류 제어를 필요로 하는

[†]Corresponding author: rohchan@kmou.ac.kr

어플리케이션에서 사용된다. 추가적으로 안전성 문제를 고려해서 누설 커패시터에 발생하는 누설 전류를 제어하기 위해서도 4-선식 인버터의 시스템이 필요하다. 파력발전장치와 같이 재생에너지 특성상 독립 운전 등을 고려하면 비선형 부하에 대응할 수 있는 4-선식 인버터는 장점이 있다.

4-선식 인버터를 위한 제어는 반송파 기반 펄스 폭 변조(carrier-based pulse width modulation, PWM)과 3차원 공간 벡터 펄스 폭 변조(3-dimension space vector pulse width modulation, SVPWM)이 사용되어 왔다(Chaturvedi *et al.*[2012]; Videt *et al.*[2007]; Djeghloud and Benalla[2004]; Busquets-Monge *et al.*[2004]; Mohapatra and Agarwal[2018]). 하지만 4-선식 인버터의 구조는 일반적이지 않아서 펄스 폭 변조 기반의 제어를 이용해 구성하는 것이 복잡하다. 이에 비해 유한한 모델예측제어는 간단하고, 이해하기 쉬운 장점을 갖고 있고, 다양하고 복잡한 제어 변수와 제약조건이 존재하는 어플리케이션에 적합하다(Yaramasu *et al.*[2012]; Kim *et al.*[2016]; Roh *et al.*[2020];). 즉, 유한한 모델예측제어는 4-선식 인버터와 같은 비정형적인 토폴로지에 적합할 수 있다. 최근 마이크로프로세서의 발달과 함께 계산의 부담을 감소시킬 수 있어서 최근 많은 학술 연구에서 다양한 인버터에 대한 유한한 모델예측제어 적용한 결과를 확인할 수 있다(Roh *et al.*[2021]; Mohapatra and Agarwal[2019];). 또한, 파력발전과 같이 입력 에너지가 급격하게 변화하는 에너지원에는 빠른 응답을 얻을 수 있는 모델예측제어가 더욱 뛰어난 성능을 나

타낼 수 있다.

결론적으로 파력발전장치용 전력변환장치로 4-선식의 인버터를 적용해서 동작 성능을 확인하였다. 또한, 모델예측제어를 적용성을 확인하기 위해서 본 논문에서는 다양한 4-선식 인버터의 성능을 비교하였다. 또한, 4-선식 인버터는 기존의 파력발전에 사용되었던 2-단계 인버터부터 3-단계 인버터까지 성능을 비교하였다. 4-선식 인버터의 성능을 확인하기 위해 평형 부하 조건과 불평형 부하 조건에서 각 4-선식 인버터를 비교하였다. 이를 통해 파력발전장치에 4-레그 인버터 적용 가능성을 검증할 수 있다.

2. 4-선식 인버터들을 위한 모델예측제어

파력발전용 전력변환장치에 4-선식 인버터를 적용하기 위해서 본 논문에서는 다양한 4-선식 인버터를 비교하였다. 또한, 4-선식 인버터들은 기존의 파력발전용 전력변환장치로 사용된 2-단계 인버터부터 3-단계 다단계 인버터까지 각 인버터들의 성능을 비교하였다. 이를 통해서 파력발전용 전력변환장치용 인버터로 적합한 4-선식 인버터의 성능을 확인한다. 4-선식 인버터들은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 2-단계 3-선식 4-선식 구조의 인버터(Fig. 1(a)), 2-단계 4-선식 구조의 인버터(Fig. 1(b)), 3-단계 3-선식 4-선식 구조의 인버터(Fig. 1(c)) 그리고 3-단계 4-선식 구조의 인버터(Fig. 1(d))를 각각 비교하였다.

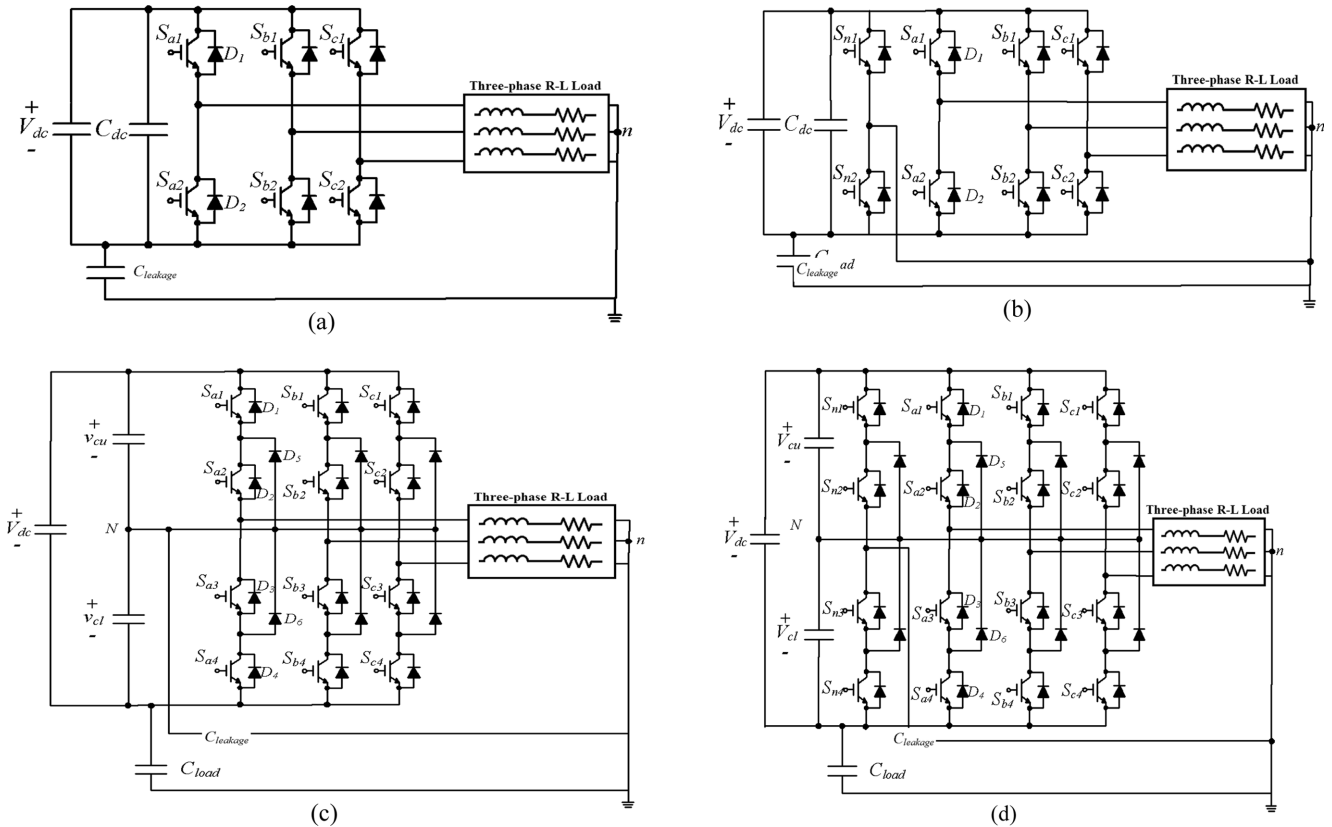


Fig. 1. Circuit diagram of 4-leg inverter: (a) 2-level 3-leg 4-wire type, (b) 2-level 4-leg type, (c) 3-level 3-leg 4-wire type and (d) 3-level type 4-leg inverter.

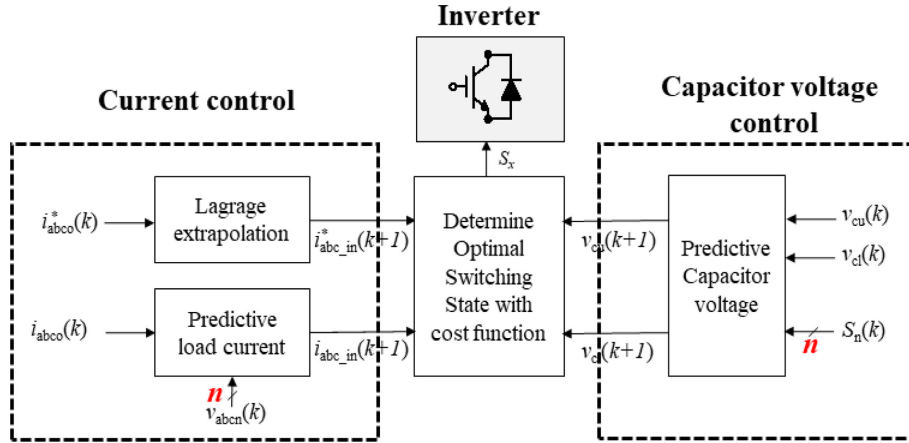


Fig. 2. Block diagram of model predictive control for 4-leg Inverter.

각 인버터들의 성능은 모델예측제어를 적용해서 분석을 수행하였다. Fig. 1에 나타난 각 인버터들에 모델예측제어를 적용하기 위해서는 각 인버터에 따른 제어 변수와 스위칭 상태를 고려해야 한다. 모델예측제어는 인버터의 출력 전압 단계에 따라서 전류 제어와 커패시터 전압 제어 부분으로 나뉜다. 2-단계 인버터의 경우 비용함수에서 입력 전류만 고려하면 되지만, 3-단계 인버터는 비용함수에서 입력 전류와 커패시터 전압을 동시에 고려해야 하고, 이에 따라서 고려해야 하는 스위칭 개수가 증가하게 된다. Fig. 2는 인버터의 모델예측제어 블록 다이어그램을 나타낸다.

인버터에 모델예측제어를 적용하기 위한 전류 제어 부분은 인버터의 출력 AC 전압을 $R\text{-}L(R_L, L_L)$ 부하와 출력 전류(i_{abco})를 이용해서 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$v_{abcn} = R_L * i_{abco} + L_L * \frac{d}{dt} i_{abco} \quad (1)$$

이를 위해 식 (1)을 이산모델기반으로 다음 스텝 전류를 예측하면 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$i_{abco}(k+1) = i_{abco}(k) + \frac{T_{sp}}{L_L} * (v_{abcn}(k) - R_L * i_{abco}(k)) \quad (2)$$

식 (2)을 기반으로 최적의 스위칭 상태는 인버터가 만들 수 있는 모든 스위칭 상태를 이용해서 다음 스텝의 부하 전류를 예측하고, 이를 기준 전류와 비교를 통해서 최적의 상태를 선택할 수 있다. 최적의 스위칭 상태는 비용 함수를 최소화 하는 상태이다. 모델예측제어의 전류 제어 부분의 비용 함수는 다음과 같이 구성된다.

$$G_{current} = |i_{abco}^*(k+1) - i_{abco}(k+1)| \quad (3)$$

식 (3)에 나타난 전류 제어를 위한 (k+1)번째 기준 전류 값은 다음과 같은 4차 라그랑주 외삽 공식을 사용하여 얻을 수 있습니다 (Cortes et al.[2011]):

$$i_{abco}^*(k+1) = 4 * i_{abco}^*(k) + 6 * i_{abco}^*(k-1) + 4 * i_{abco}^*(k-2) + i_{abco}^*(k-3) \quad (4)$$

2-단계 인버터와 다르게 3-단계 인버터는 전류 제어와 함께 커패시터 전압 밸런싱 제어가 필요하다. 전류 제어는 앞서 설명한 것과 같고, 커패시터 전압 밸런싱 제어를 위해서는 직류 커패시터에 흐르는 전류를 이용해서 커패시터 전압 변동률을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} v_c = \frac{1}{C} * i_c \quad (5)$$

i_c 는 커패시터에 흐르는 전류를 나타내고, C 는 커패시터의 커패시턴스를 나타낸다. 이를 전류 제어와 같이 이산모델로 나타내면 (k+1)번째 커패시터 전압은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$v_c(k+1) = v_c(k) + \frac{T_{sp}}{C} i_c(k) \quad (6)$$

3-단계 인버터의 비용 함수는 식 (2)에 나타난 전류와 식 (6)에 나타난 커패시터 전압을 이용해서 구성할 수 있다. 전류 제어만으로 구성된 2-단계 컨버터의 비용 함수와 달리 전류 제어와 커패시터 전압 제어로 구성된 비용 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = |i_{abco}^*(k+1) - i_{abco}(k+1)| + \lambda |v_{c1}(k-1) - v_{c2}(k-1)| \quad (7)$$

3-단계 인버터는 스위칭 개수가 증가했기 때문에 최적의 스위칭 상태를 선택하기 위해서 고려해야 하는 스위칭 상태가 증가하게 되고, 이는 계산량도 증가하게 된다. 더 나아가, 3-단계 4-선식 인버터는 전원의 중성점이 4번째 선식에 연결되었기 때문에 스위칭 개수가 81개로 증가하게 된다. 3-단계 4-선식 인버터의 비용 함수도 식 (5)와 같이 나타낼 수 있지만, 고려해야 하는 스위칭 개수가 증가했기 때문에 계산량이 급격하게 증가하게 된다. 그림 3은 각 인버터가 고려해야 하는 전압 벡터를 나타낸다. 전압 단계가 증가할수록 전압 벡터가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

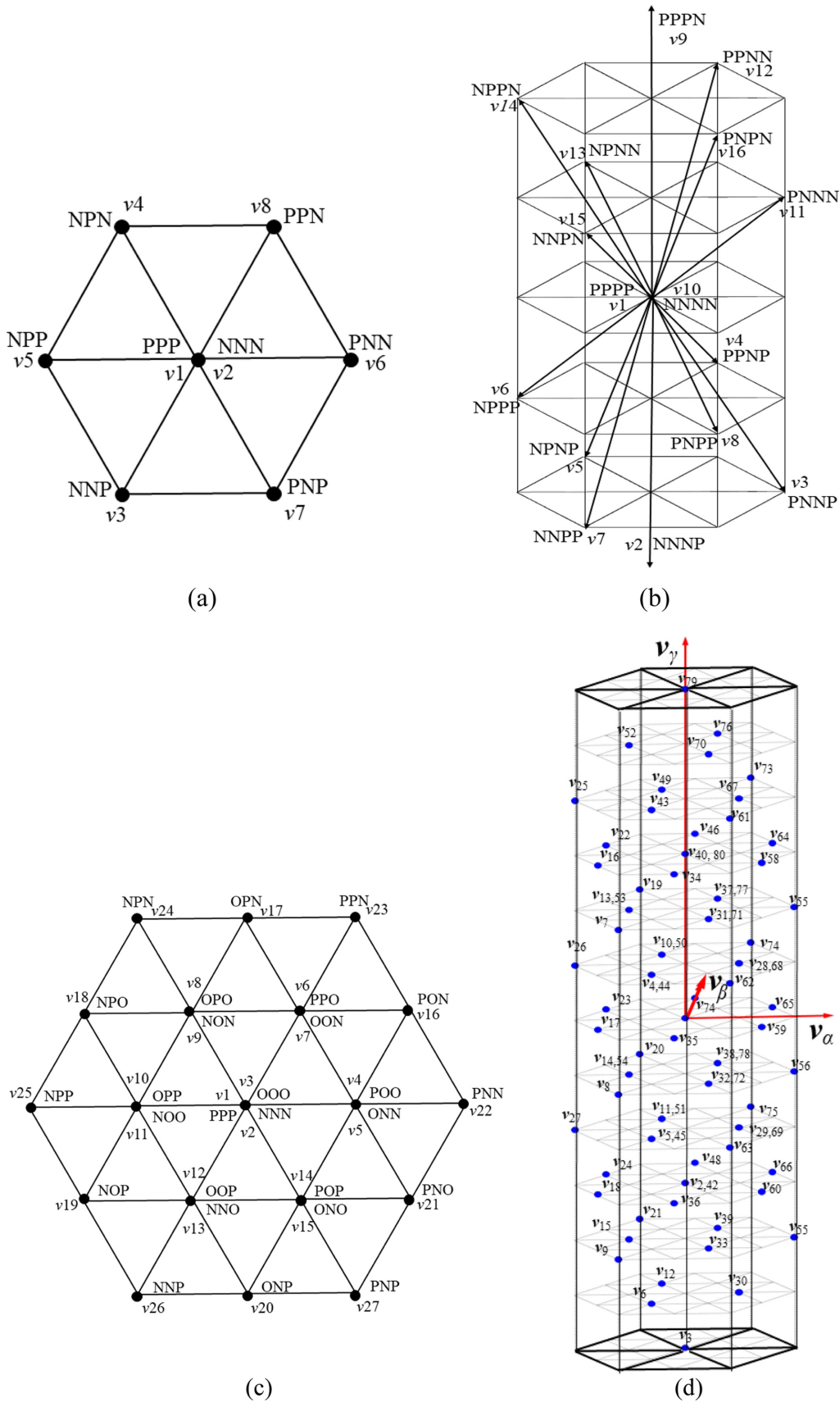


Fig. 3. Voltage vector diagram of 4-leg inverter: (a) 2-level 3-leg 4-wire type, (b) 2-level 4-leg type, (c) 3-level 3-leg 4-wire type and (d) 3-level type 4-leg inverter.

3. 4-선식 인버터들의 출력 성능비교

각 인버터들의 성능을 확인하기 위해서 과력발전 정격조건에서 각 인버터의 출력 특성을 비교하였다. 각 인버터는 모델예측제어를 각각 적용하였다. 인버터의 출력 부하는 R-L 부하로 7.5 Ω과 24.2 mH를 사용하였고 부하 역률은 0.72이다. 각 인버터는 평형 부하 조건과 불평형 부하 조건에서 성능을 분석하였다.

Fig. 4는 평형 부하 조건에서 4-선식 인버터들의 출력 성능을 나타낸다. 먼저, 평형 부하 조건에서는 2-단계 인버터보다 3-단계 인

버터가 출력 전류 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 또한, 누설 전류의 성능도 3-단계 인버터가 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 그 중에서도 3-단계 4-선식 인버터의 누설전류 성능이 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 3-단계 3-선식 인버터보다 뛰어난 성능을 보여주었다. 결론적으로 3-단계 4-선식 인버터의 출력 전류 성능이 가장 뛰어나고, 누설 전류 성능에서도 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

다음으로는 불평형 부하 조건에서 4-선식 인버터들의 성능을 비교하였다. Fig. 5는 불균형 부하 조건에서 각 인버터들의 출력 성능을 나타낸다. 2-단계 3-선식 인버터나 3-단계 3-선식 인버터는 개별 선식을 직접적으로 제어하지 못하기 때문에 출력 전류나 누설 전류 성능이 좋지 않다. 하지만 개별 선식을 제어할 수 있는 2-단계 4-선식 인버터나 3-단계 4-선식 인버터의 경우는 불균형 부하가 발생하더라도 적절하게 출력 전류를 제어하는 것을 확인할 수 있다. 더 나아가, 3-단계 4-선식 인버터의 경우는 출력 단계 증가에

Table 1. Computed wind and current forces on buoy models

Parameter	Value	
Road Resistance (R_L)	7.5	[Ω]
Road Inductance (L_L)	24.2	[mH]
DC Capacitance	4400	[μF]
DC Voltage	850	[V]

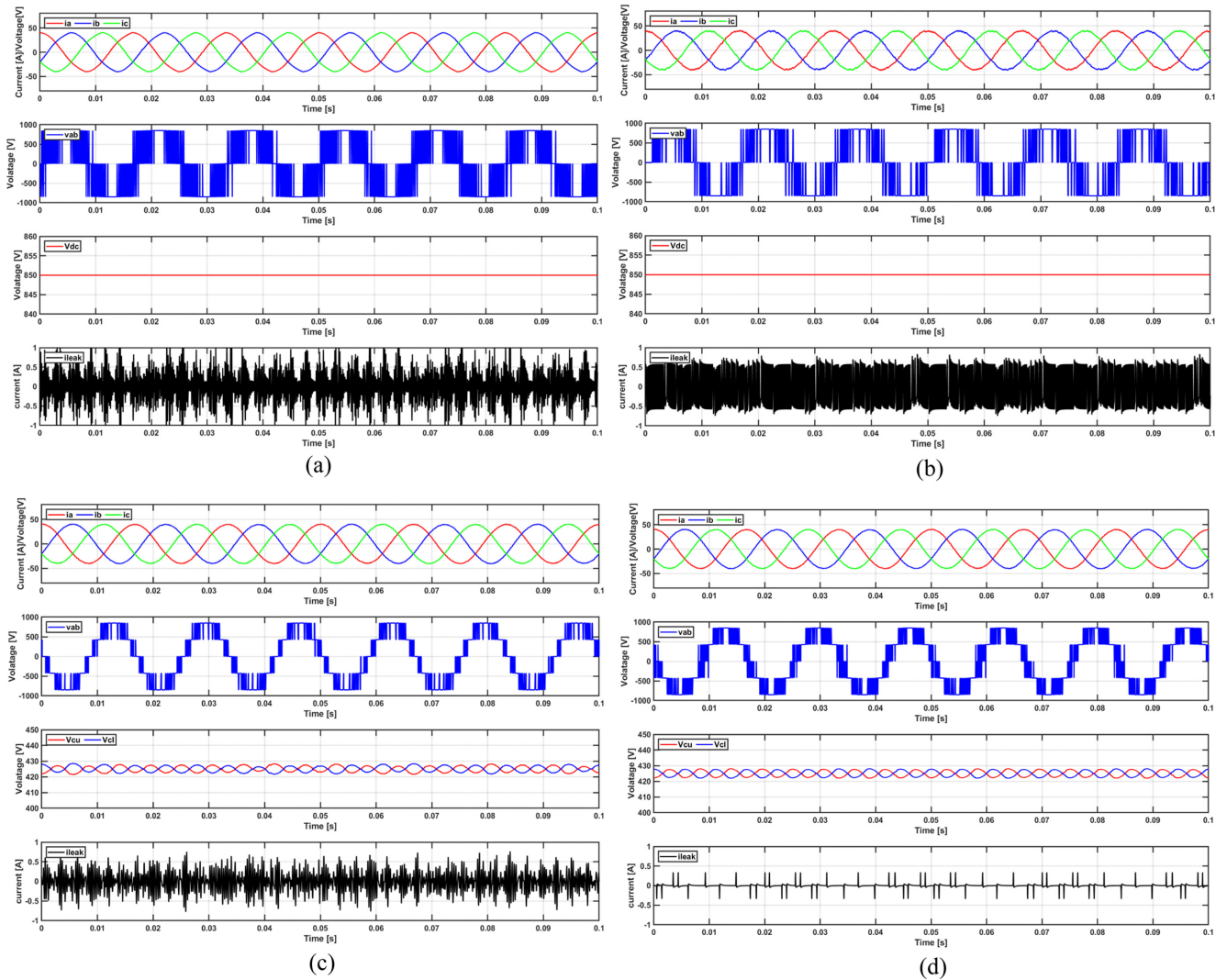


Fig. 4. Comparison of output performance of 4-leg inverter (output current, output line voltage, DC voltage, leakage current) in balanced load conditions: (a) 2-level 3-leg 4-wire type, (b) 2-level 4-leg type, (c) 3-level 3-leg 4-wire type and (d) 3-level type 4-leg inverter.

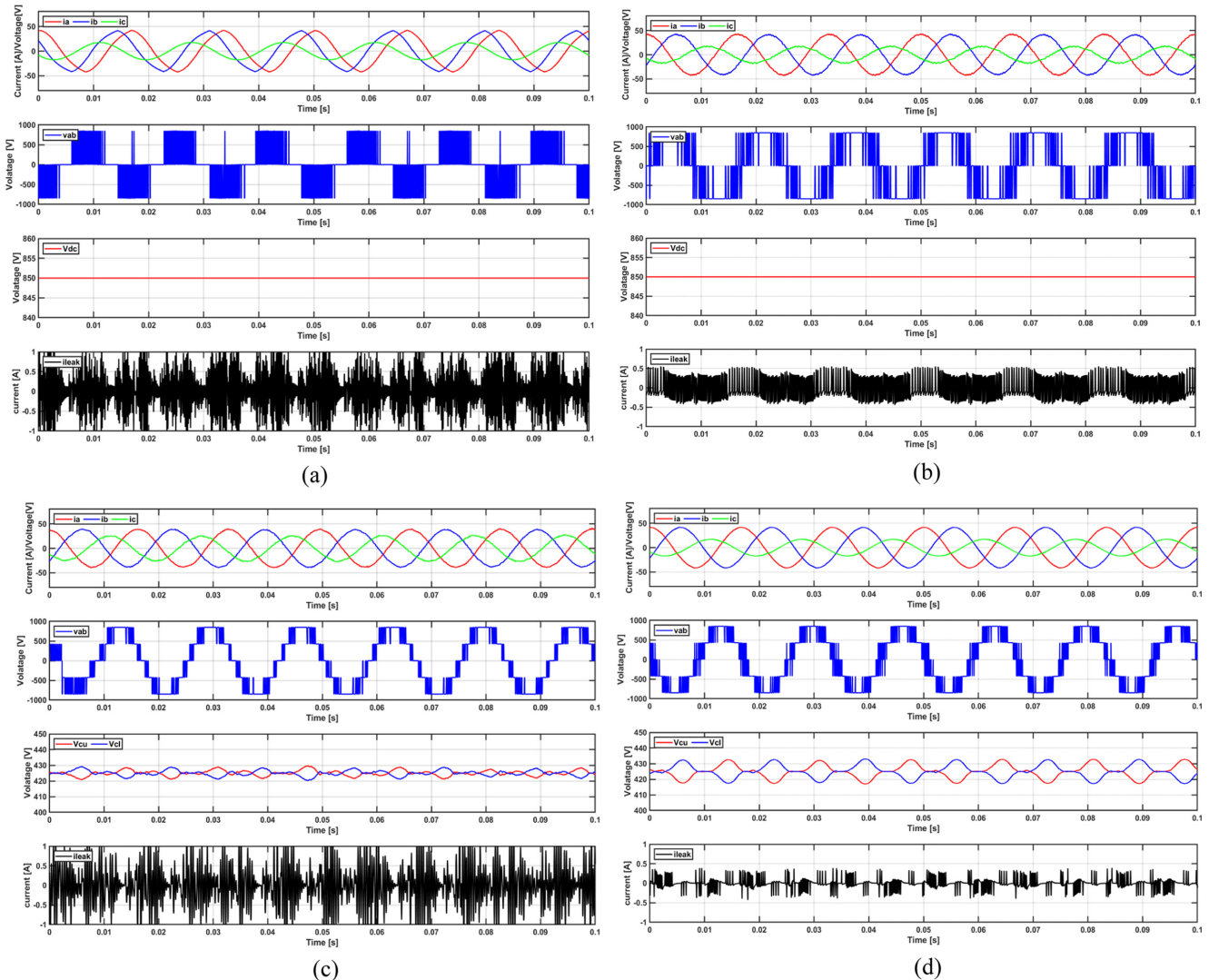


Fig. 5. Comparison of output performance of 4-leg inverter (output current, output line voltage, DC voltage, leakage current) in unbalanced load conditions: (a) 2-level 3-leg 4-wire type, (b) 2-level 4-leg type, (c) 3-level 3-leg 4-wire type and (d) 3-level type 4-leg inverter.

따른 2-단계 4-선식 인버터보다 출력 전류나 누설 전류 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 입력 파워 변화에 따른 각 인버터들의 출력 전류 THD, 누설전류의 크기 그리고 컨버터 손실 및 효율을 비교하였다. 입력 파워의 변화는 일반적인 파력발전장치의 단일용량을 검증할 수 있도록 5-30 kW 범위로 설정해서 수치해석을 수행하였다. 입력 파워가 변화하더라도 3-단계 4-선식 인버터의 출력 전류 THD와 누설 전류 성능이 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 또한, 기존의 파력발전용 전력변환장치인 2-단계 3-선식 인버터보다 손실 측면이나 효율 측면에서 훨씬 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 특히, 정격 30 kW 기준에서도 3-단계 4-선식 인버터는 출력 전류 THD와 누설전류 측면에서도 뛰어난 성능을 나타내며, 손실과 효율에서도 가장 좋은 성능을 보여준다. 결론적으로 Fig. 6에 나타난 것과 같이 3-단계 4-선식 인버터가 기존의 2-단계 3-선식 인버터 뿐 아니라 다른 4-선

식 인버터들 중에서 뛰어난 성능을 얻는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 샘플링 주파수 변화에 따른 각 인버터의 출력 전류 THD, 누설전류의 크기, 인버터 손실 및 효율을 비교하였다. 샘플링 주파수가 증가함에 따라서 출력 전류의 THD 감소하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 3-단계 4-선식 인버터는 모든 스위칭 주파수 범위에서 가장 낮은 입력 전류 THD를 나타낸다. 또한, 입력 파워의 변화와 같이 샘플링 주파수가 변화하더라도 3-단계 인버터가 2-단계 인버터보다 누설 전류 측면에서 더욱 뛰어난 성능을 나타내었고, 특히 3-단계 4-선식 인버터의 성능이 가장 뛰어났다. 또한, 컨버터의 결과와 같이 인버터의 손실이나 효율 측면에서도 기존의 파력발전용 컨버터보다 훨씬 뛰어난 성능을 나타낸다. 그림 8은 불균형 부하 조건에서 4-선식 인버터의 출력 성능을 비교 분석하였다. 불평형 부하 조건은 파력발전에서 독립운전 시 다양하게 발생할 수 있기 때문에 다음과 같이 불균형 지수를 이용해서 성능

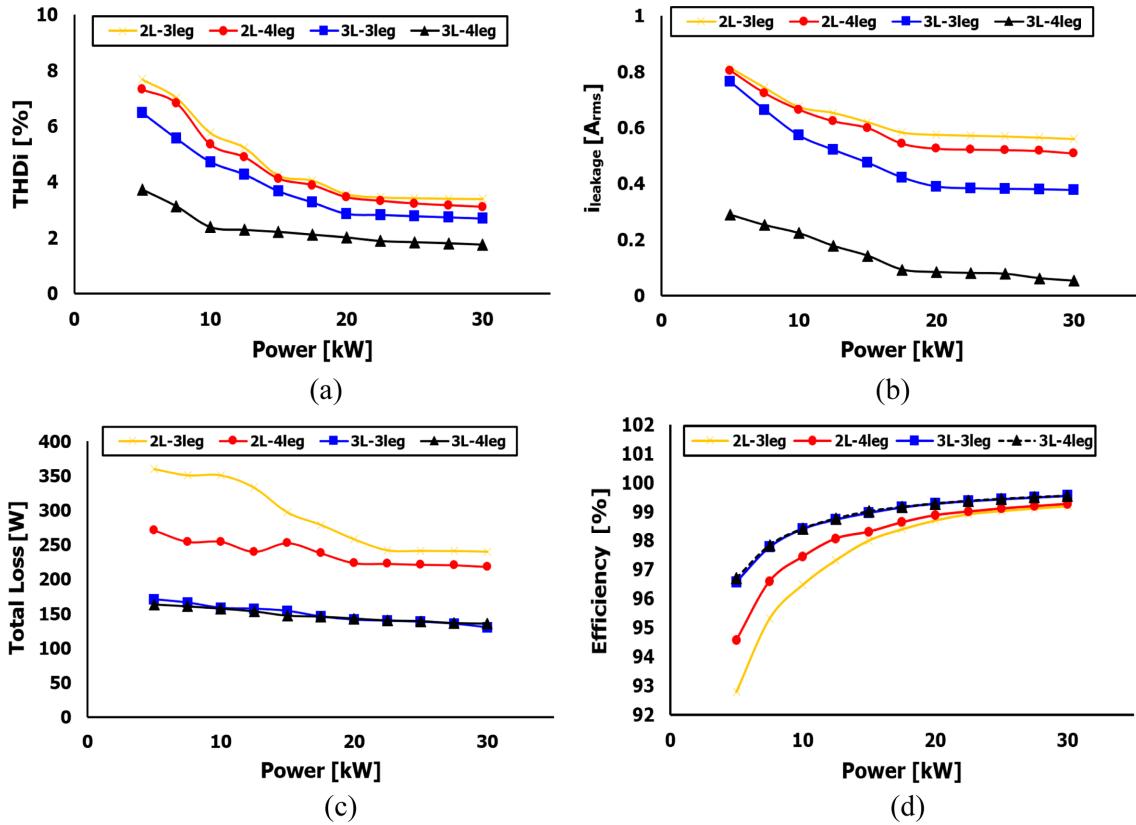


Fig. 6. Comparison of output performance of each 4-leg inverter according to output power change: (a) output current THD, (b) leakage current, (c) converter loss, (d) converter efficiency.

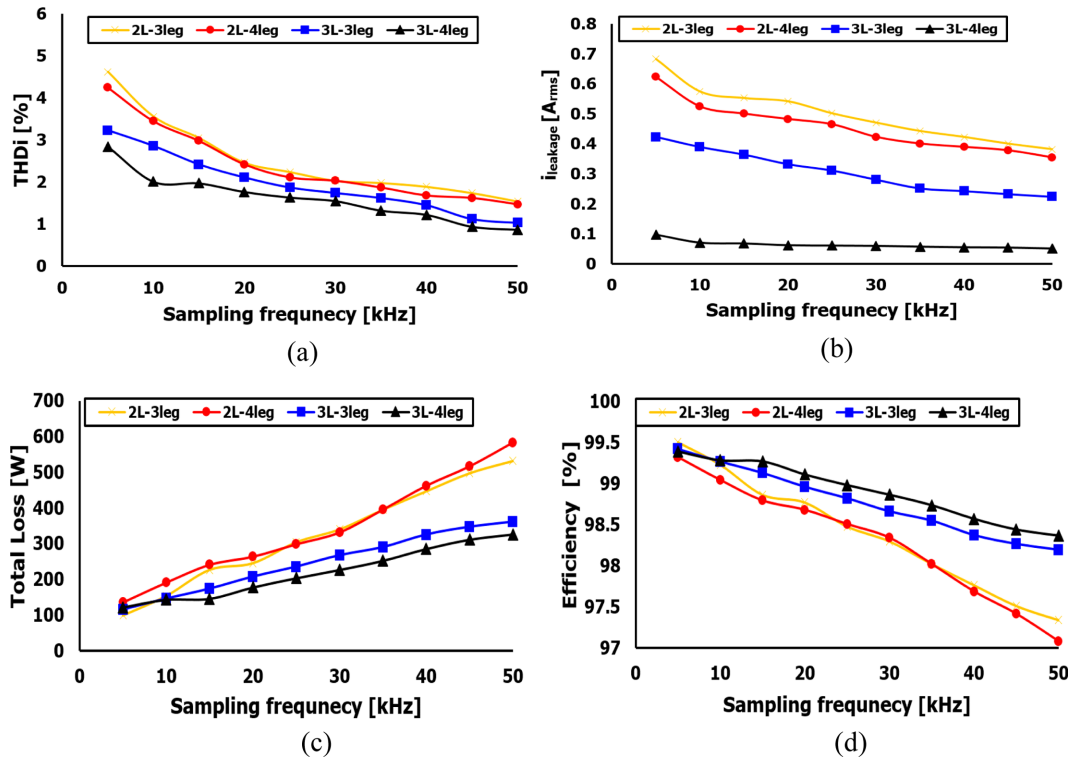


Fig. 7. Comparison of output performance of each inverter according to sampling frequency change: (a) output current THD, (b) leakage current, (c) inverter loss, (d) inverter efficiency.

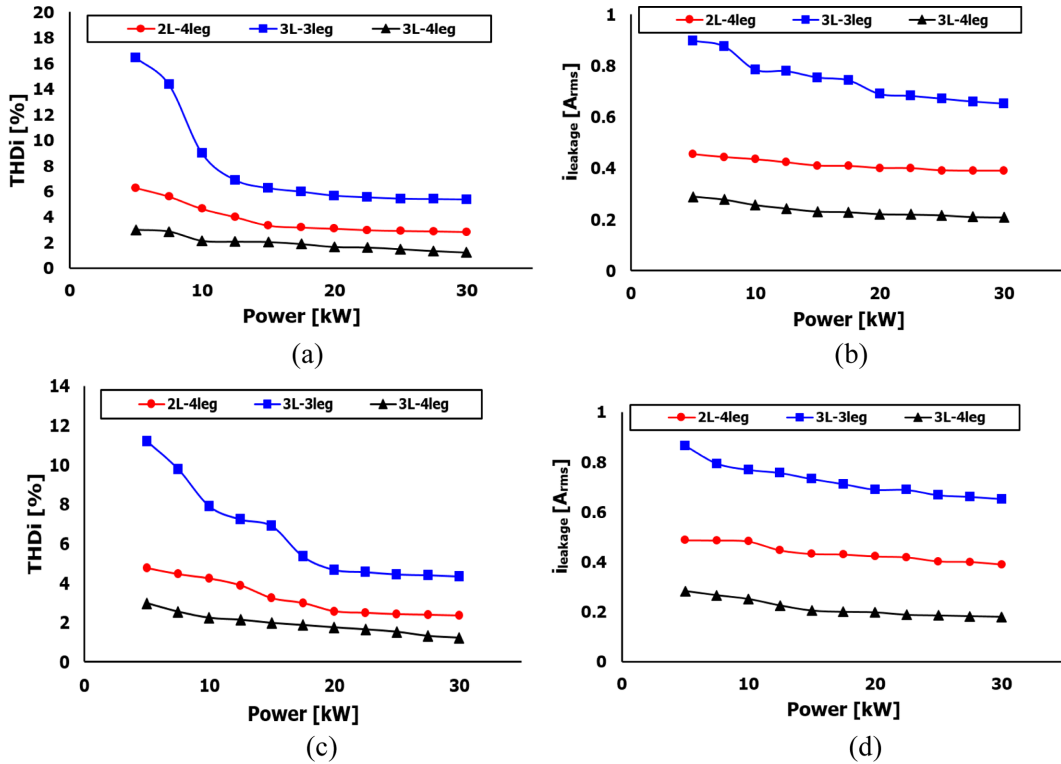


Fig. 8. Output performance of 4-leg inverter under unbalanced load condition: (a) Output current THD(Asy_index=0.75) (b) Leakage current (Asy_index=0.75), (c) Output current THD(Asy_index=0.34) (d) Leakage current (Asy_index=0.34).

을 검증하였다. 불균형 지수는 기준 전류 불균형에 따른 각 상 부하의 출력 전력에 따라 다음과 같이 정의할 수 있습니다.

$$Asy_{ratio} = (P_{max} - P_{min}) / P_{max} \tag{8}$$

P_{max} , P_{min} 는 기준 전류 불균형에 따른 각 상의 출력 부하 중 가장 큰 출력 전력과 가장 작은 출력 전력을 나타냅니다. 불균형 비율이 증가할수록 최대 파워와 최소 파워의 차이가 증가하게 되고, Fig. 8은 불균형 지수를 변경함으로써 각 인버터들의 성능을 비교하였다. 불균형 지수가 커질수록 인버터의 성능은 약간 저감된다. 하지만, 본 연구에서 사용된 3-단계 4-선식 인버터는 불균형 지수가 증가하더라도 성능 저감이 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 또한, 불균형 지수에 상관없이 3-단계 4-선식 인버터는 출력 전류 THD나 누설 전류 측면에서 가장 뛰어난 성능을 나타낸다. 이는 파력발전용 컨버터가 독립운전 시 불균형 부하가 발생하더라도 안정적으로 전력 공급이 가능한 것을 확인할 수 있다. 이렇게 다양한 성능지표를 이용해서 기존의 사용되고 있는 파력발전용 전력변환장치 뿐만 아니라 다양한 전력변환장치를 비교하였을 때 본 연구에서 사용된 3-단계 4-선식의 구조의 뛰어난 성능을 확인할 수 있다.

4. 결 론

파력발전장치의 고도화에 따른 단일용량 증가로 전력변환장치도 대용량에 대한 연구가 필요하고, 또한 독립 운전 시 불평형 부하 조

건에 대응할 수 있는 4-선식의 토폴로지에 대한 연구가 요구된다. 그래서 본 논문에서는 기존의 파력발전용 전력변환장치로 사용되고 있는 2-단계 인버터부터 3-단계 인버터까지 다양한 4-선식 인버터의 성능을 각각 비교하였다. 4-선식 컨버터는 일반적이지 않은 구조이기 때문에 쉽고 간단하게 제어기를 구성할 수 있는 모델예측제어를 적용해서 각 4-선식 인버터들의 성능을 분석하였다. 각 4-선식 인버터들의 성능을 확인하기 위해서 평형 부하 및 불평형 부하 조건에서 비교를 진행하였고, 불평형 조건이나 출력 파워에 상관없이 3-단계 4-선식 인버터가 가장 좋은 성능을 나타내었다. 이를 기반으로 파력발전용 전력변환장치의 적합한 4-선식 토폴로지를 확인하였다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며(RS-2022-00165789), 연구비 지원에 감사드립니다.

References

[1] Busquets-Monge, S., Bordonau, J., Boroyevich, D. and Soma-villa, S., 2004, The nearest three virtual space vector PWM-a modulation for the comprehensive neutral-point balancing in the

- three-level NPC inverter. *IEEE power electronics letters*, 2(1), 11-15.
- [2] Chaturvedi, P., Jain, S. and Agarwal, P., 2012, Carrier-based common mode voltage control techniques in three-level diode-clamped inverter. *Advances in Power Electronics*, 2012.
- [3] Cortes, P., Rodriguez, J., Silva, C. and Flores, A., 2011, Delay compensation in model predictive current control of a three-phase inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 1323-1325.
- [4] Djeghloud, H. and Benalla, H., 2004, Space vector pulse width modulation applied to the three-level voltage inverter. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 19, 732-738.
- [5] Dijkhuizen, F., 2012, Multilevel converters: review, form, function and motivation. EVER 2012.
- [6] Kim, S.E., Park, S.Y. and Kwak, S., 2016, Simplified model predictive control method for three-phase four-leg voltage source inverters. *Journal of Power Electronics*, 16(6), 2231-2242.
- [7] Kouro, S., Malinowski, M., Gopakumar, K., Pou, J., Franquelo, L.G., Wu, B. and Leon, J.I., 2010, Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 57(8), 2553-2580.
- [8] Mohapatra, S.R. and Agarwal, V., 2018, Model predictive controller with reduced complexity for grid-tied multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(11), 8851-8855.
- [9] Mohapatra, S.R. and Agarwal, V., 2019, An improved reduced complexity model predictive current controller for grid-connected four-leg multilevel inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(1), 498-506.
- [10] Roh, C., 2022, Performance Comparisons of Three-Phase/Four-Wire Model Predictive Control-Based DC/AC Inverters Capable of Asymmetric Operation for Wave Energy Converters. *Energies*, 15(8), 2839.
- [11] Roh, C., Kim, K.H., Park, J.Y. and Kwak, S.S., 2020, Simplified model predictive control with preselection technique for reduction of calculation burden in 3-level 4-leg NPC inverter. In 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 2291-2296). IEEE.
- [12] Roh, C., Kwak, S. and Choi, S., 2021, Three-phase three-level four-leg NPC converters with advanced model predictive control. *Journal of Power Electronics*, 21(10), 1574-1584.
- [13] Videt, A., Le Moigne, P., Idir, N., Baudesson, P. and Cimetiere, X., 2007, A new carrier-based PWM providing common-mode-current reduction and DC-bus balancing for three-level inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(6), 3001-3011.
- [14] Yaramasu, V., Rivera, M., Wu, B. and Rodriguez, J., 2012, Model predictive current control of two-level four-leg inverters—Part I: Concept, algorithm, and simulation analysis. *IEEE transactions on power electronics*, 28(7), 3459-3468.

Received 10 August 2022

1st Revised 4 October 2022, 2nd Revised 17 October 2022

3rd Revised 25 October 2022

Accepted 27 October 2022