

해외기사 소개

# 멀티 레벨 컨버터 시대의 도래

By Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodriguez, Jose I. Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo and Maria A.M. Prats

본 글은 IEEE Industrial Electronics Magazine 2008년에 게재된 Leopoldo G. Franquelo 외 5인 저자의 “The Age of Multilevel Converters Arrives” 를 번역하여 재편집한 내용입니다.

이 종 학, 김 태 훈  
(송실대 전기공학부 석사과정)

## 1. 서론

에너지 경쟁의 장이 변화하고 있다. 화석 연료에 의존하고 있다는 느낌과 화석 연료의 계속되는 가격 인상은 화석 연료와는 다른 값싸고 깨끗한 에너지 자원을 개발하기 위한 막대한 경제적, 인적 자원의 투자를 이끌고 있다. 사실 지난 몇 십년 동안 재생에너지 자원은 연구자들에게 중요한 화두였으며, 이러한 유형의 시스템들을 분산망으로 통합시키기 위해 여러 종류의 전력 컨버터가 설계되었다. 또한, 송전선에서는 대용량 전력 전자 시스템이 전력 분배와 전력 품질을 보장하는데 필요하다. 따라서 전력용 컨버터는 이러한 과제들을 높은 효율로 담당할 책임이 있다.

세계적인 에너지 수요의 증가는 필요로 하는 모든 전력공급이 가능한 새로운 전력 컨버터 토폴로지와 반도체 기술의 출현을 촉발시켰다. 대용량 시스템을 구동하기 위한 고전압, 고전류 전력용 반도체를 개발하려는 경쟁은 지금도 계속되고 있다. 이에 따라 최근 개발된 반도체는 고전압과 대전류 (약 6.5kV와 2.5kA)용으로 적절하다. 그러나 지금은 고압 반도체를 사용하는 전통적인 전력 컨버터와 중전압 반도체를 사

용하는 새로운 컨버터 토폴로지 간에 힘든 경쟁을 하는 시대이다. 이러한 생각을 그림 1에 제시했는데 완전한 중전압 전력 반도체를 사용하여 제작된 멀티레벨 컨버터는 아직 완전치 않은 대전력 반도체를 사용하는 전통적인 파워 컨버터와 개발 경쟁을 벌이고 있다. 오늘날, 멀티레벨 컨버터는 완전한 중간 전압 반도체 기술을 사용하여 대전력을 제어할 수 있다는 사실로 인하여 전력 어플리케이션용으로 좋은 해법이다<sup>(1),(2)</sup>.

멀티레벨 컨버터는 전통적이며 잘 알려진 2단계 컨버터와 비교했을 때 상당한 이점이 있다<sup>(1),(3)</sup>. 기본적으로 이들의 이점은 출력 품질의 개선과 컨버터의 공칭 전력 증가에 있다. 개량된 멀티레벨 컨버터의 출력 전압의 품질을 보여주기 위해서, 단상 2단계 컨버터의 출력 전압을 그림 2에서 보여주는 3레벨 및 9레벨의 멀티레벨 전압 파형에 비교했다. 전력 변환기 출력 전압은 출력 파형의 총 고조파 왜곡(THD)을 줄이기 위해 레벨의 수를 증가시켜 자체 품질을 개선한다.

이들 특성에 따라 멀티레벨 컨버터는 산업용으로 매우 매력적인 것으로 인식되어, 현재 전세계의 많은 연구자들은 제어 알고리즘의 단순화<sup>(4),(5)</sup>와 출력 신호의 THD를 향상시키는

것, 다양한 최적화 알고리즘의 수행<sup>[6],[7]</sup>, 직류 콘덴서 전압의 균형<sup>[8],[9]</sup>, 그리고 전류의 리플 개선<sup>[10],[11]</sup>과 같은 연구들을 통해 멀티레벨 컨버터의 성능을 개선하는데 상당한 노력을 기울이고 있다. 예를 들어서, 오늘날 연구자들은 미리 계산된 스위칭 함수를 이용한 고조파 제거<sup>[12]</sup>, 특정 그리드 코드를 충족시키기 위한 고조파 저감<sup>[13]</sup>, 새로운 멀티레벨 컨버터 토폴로지의 개발(하이브리드 또는 새로운 것)<sup>[14]</sup>, 그리고 새로운 제어전략의 개발<sup>[15],[16]</sup>에 초점을 맞추고 있다.

가장 일반적인 멀티레벨 컨버터 토폴로지는 중립-포인트-클램프 컨버터(NPC)<sup>[17]</sup>, 플라잉 커패시터 컨버터(FC)<sup>[18]</sup>, 그리고 직렬 H-브리지 컨버터(CHB)이다. 그림 3과 같이 이들 변환기들은 파워 컨버터 가운데서 대전력용으로 분류된다.

멀티레벨 컨버터에 대한 여러 가지 조사가 이들 토폴로지를 소개하기 위해서 출판되었다<sup>[1],[2]</sup>. 1980년대에, 파워 일렉트로닉스 관심은 컨버터 전력 증가(전압이나 전류를 증가시키는)에 있었다. 사실상 전류 소스 인버터의 전류를 증가시키는 것이 연구자들에게 중요한 초점이었다. 그러나 다른 연구자들은 전류 대신에 전압을 증가시킬 생각으로 작업을 시작했다. 이 목적을 이루기 위하여, 연구자들은 새로운 컨버터 토폴로지를 개발하였고, 1981년, A. Nabae, I. Takahashi, 그리고 H. Akagi가 첫 번째 NPC 펄스 폭 변조 컨버터를 출시했고(PWM), 이를 다이오드 클램프 컨버터라고 명명했다<sup>[17]</sup>. 이 컨버터는 상마다 2개의 전력 반도체를 추가한 전통적인 2레벨 컨버터 기반의 변형된 토폴로지였다.(그림 1 참조). 이러한 새로운 토폴로지를 사용하면 각각의 전력용 반도체는 같은 직류-링 전압을 가진 2레벨 컨버터의 경우와 비교하여 기껏해야 반 정도의 전압만을 견디면 된다. 그래서 이들 전력용 반도체가 2레벨의 경우와 같은 특성을 가진다면 컨버터의 전압은 두 배가 된다. NPC 컨버터는 출력 레벨의 수를 증가시키기 위하여 일반화 되었고 이것이 아직 중 전압용 시장을 형성하지 못했지만, 멀티 포인트 클램프 컨버터(MPC)

로서 주목 받게 되었다<sup>[21],[22]</sup>.

몇 년 후, FC<sup>[18]</sup> 혹은 CHB<sup>[19],[20]</sup> 같은 또 다른 멀티레벨 컨버터 토폴로지가 등장했다. 이들 멀티레벨 컨버터들은 구성 요소의 수, 모듈 방식, 제어의 복잡성, 효율, 그리고 내 고장성에서 NPC와 다른 특성을 나타낸다. 어플리케이션에 따라서 멀티레벨 컨버터 토폴로지는 표 1에서 보여주듯이 이들 요소들을 참작하여 선택될 수 있다.

오늘날, 대전력 어플리케이션<sup>[23]-[25]</sup>을 위한 산업 제품으로 팔리는 여러 가지 상업적 멀티레벨 컨버터 토폴로지가 있다. 그러나 멀티레벨 컨버터의 이점이 제시되어왔지만, 중 전압 드라이브로 사용되어 검증된 그들의 좋은 기능에도 불구하고 대전력 그리드에서 이들 전력 시스템의 어플리케이션 붐은 일어나지 않았다. 아마도 신뢰성, 효율성, 제어 복잡성의 증가 같은 기술적 문제와, 단순한 디자인과 빠른 변조 방식이 전 세계에 멀티 레벨 컨버터에 대한 어플리케이션의 확장을 지연시킨 장벽이 되었던 것 같다. 마침내, 연구자들의 노력을 통해 멀티레벨 컨버터가 이 장벽을 극복했고 전기 에너지 분야에서 완전한 전력 시스템으로 적용될 준비가 되었다고 단언할 수 있게 되었다. 이러한 작업을 통해 멀티레벨 컨버터의 모든 특성을 재고하고 분석하는데 전념하였고, 가능한 해법을 제시함으로써 전통적인 2레벨 컨버터와 비교하여 좋은 해법으로서 이들 컨버터에 투자해야 하는 결정적 순간에 와 있다는 것을 보여주었다. 본 논문은 멀티레벨 컨버터의 실제 어플리케이션에 관한 간략하게 설명하고 모델링 기술에 관해 제시하며 가장 일반적인 변조 전략에 관해 언급한다. 또한 운용상의 문제와 기술적인 문제도 언급한다.

## 2. 멀티레벨 컨버터-구동 어플리케이션

오늘날 멀티레벨 컨버터는 중-전압 대전력 어플리케이션을 위한 매우 매력적인 해법으로 고려된다. 사실, 다수의 주요한 제조사들은 어플리케이션에 따라 NPC, FC 혹은 넓고 다양한 제어 방법을 갖춘 CHB 토폴로지를 상품화 하고 있다. 특히, 여러 가지 응용분야 가운데 NPC는 컨베이어, 펌프, 팬 및 풍차와 같은 전통적인 대전력 교류 모터 드라이브 어플리케이션에서 중요한 시장을 발견했다, 그것은 석유와 가스, 금속, 전력, 광업, 용수, 바다와 화학을 포함하는 분야에서 산업용 솔루션을 제공한다<sup>[26],[27]</sup>.

회생 어플리케이션을 위한 백투백 구조는 이러한 토폴로지의 중요한 장점이 되며, 예를 들어 광산업을 위한 회생 컨베이어에서 혹은 풍력 발전 같은 재생에너지원의 그리드 연결 등에 사용된다<sup>[28],[30]</sup>. 그러나 FC 컨버터는 중 전압 전인 드라이브와 같은 고 대역폭 주파수 가변 응용을 위한 특별한 용례를 발견했다<sup>[31]</sup>.

마침내 직렬 H-브리지가 자체 직렬 확장 기능으로 인하여,

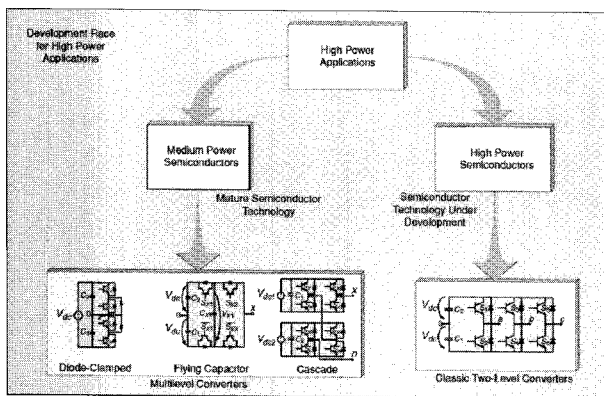


그림 1 전통적인 2단계 전력 변환기 대 가장 일반적인 멀티레벨 파워 컨버터. 대전력 응용에서 두 개의 서로 다른 해법간의 개발 경정

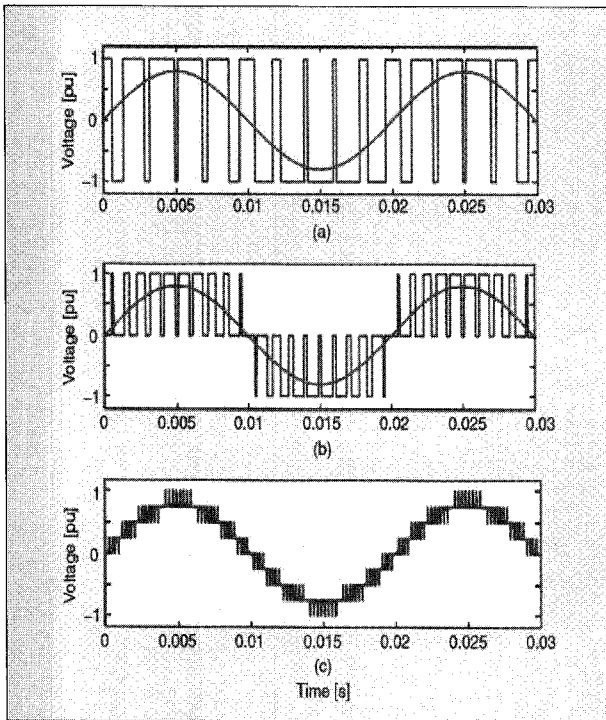


그림 2 출력 상전압 파형의 비교: (a) 2 레벨 인버터, (b) 3 레벨 인버터, (c) 9 레벨 인버터

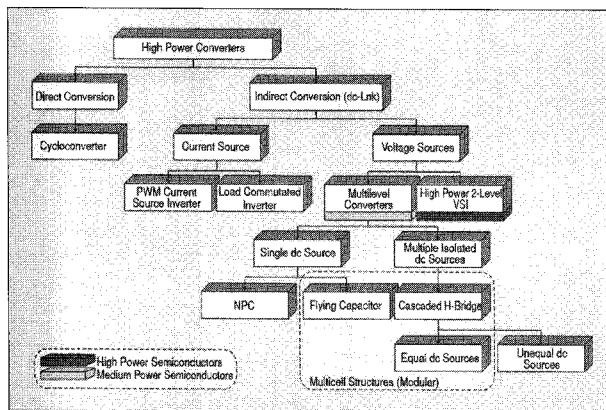


그림 3 대전력 컨버터의 분류

31MVA의 범위까지 상당한 대전력과 전력 품질을 필요로 하는 어플리케이션용으로서 성공적으로 상품화 되었다. 이 토폴로지는 능동필터와 무효전력보상 어플리케이션<sup>[32]</sup>, 전기자동차와 하이브리드 자동차<sup>[33], [34]</sup>, 태양광 전력 변환<sup>[35]-[37]</sup>, 무정전 전력 공급 장치<sup>[38]</sup>, 그리고 자기공명영상장치<sup>[39]</sup> 용으로도 보고되어 왔다. 상용 멀티레벨 파워 컨버터의 예로서, 3-상 회생 드라이브용으로 지멘스에서 나온 34kV, 15MW의 6셀 CHB 컨버터를 그림 4에 표시했다. 멀티레벨 컨버터-구동 어

표 1 구현 요소에 따른 멀티레벨 컨버터 토폴로지의 비교

TABLE 1—COMPARISON OF MULTILEVEL CONVERTER TOPOLOGIES DEPENDING ON IMPLEMENTATION FACTORS.			
Specific requirements	NPC Clamping diodes	FC Additional capacitors	CHB Isolated dc sources
Modularity	Low	High	High
Design and implementation complexity	Low	Medium (capacitors)	High (input transformer)
Control concerns	Voltage balancing	Voltage setup	Power sharing
Fault tolerance	Difficult	Easy	Easy

플리케이션의 요약은 그림 5에 설명했다.

### 3. 모델: 멀티레벨 컨버터 가능성을 확장시키는 도구

“입력에서 출력까지(I/O)” 관계에 대한 시뮬레이션과 설정은 멀티레벨 컨버터를 연구하고 계획하는데 있어서 근본적인 과제이다. 이들 I/O 관계는 적절한 모델 개발을 위해 중요시된다. 그것은 구현 단계 전에 컨버터에 대해 필요한 모든 정보를 얻는데 도움이 된다. 멀티레벨 컨버터의 모델링은 그것이 선형과 비선형 요소로 구성되기 때문에 쉬운 작업이 아니다. 역사적으로 dc 파워 일렉트로닉스 컨버터에 적용된 모델링 기술은 목적에 따라, 스너버 회로 설계, 제어 구조, 그리고 제어장치 개발, 정상-상태 연구, 동특성 및 과도상태 연구, 안정성 분석 등을 완수하는 다양한 근사화에 사용되었다. 멀티레벨 컨버터의 작동은 스위치의 이산 상태에 따른 가능한 상태의 주기적인 연속순차이다. 그림 6은 단상 3레벨 NPC 컨버터를 보여주고 두 가지의 가능한 모델링 기술을 보여준다. 이를 기반으로 두 가지의 모델 즉, 등가회로 시뮬레이션 혹은 상태-공간 평균법이 개발될 수 있다.

### 4. 멀티레벨 컨버터의 회로 시뮬레이션 모델링

컨버터의 모델은 SPICE에 기반을 둔 강력한 시뮬레이션의 도움을 받아 얻어진다. 이 경우에, 멀티레벨 컨버터의 모델링은 가능한 스위치의 비선형성을 완전히 포함하는 적절한 전기 회로모델을 만드는 일로 축소된다. 이상적인 스위치를 고려함으로써 컨버터 동작에 대한 선형적인 설명은 전력변환기의 모든 스위칭 상태에서 얻어질 수 있다.

그림 6은 스위치가 이상적인 스위치로 교체된 3레벨 NPC의 한 상을 보여주고, 상이 스위치의 모든 위치에서 전압원처럼 움직이는 것을 쉽게 볼 수 있다. 따라서 컨버터 각상의 선형 등가회로를 얻게 된다. 이 모델로, 구간 선형 시뮬레이션이 수행된다. 모델 방정식의 통합 방식이 적절히 선택되면,

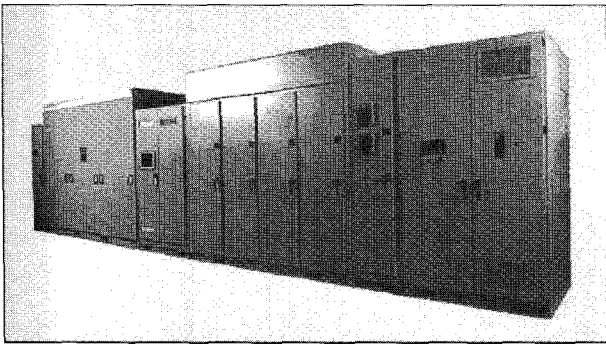


그림 4 화생드라이브용으로 상당 6셀, 13레벨의 15MW급 H-브리지 컨버터를 연결한 멀티레벨 컨버터

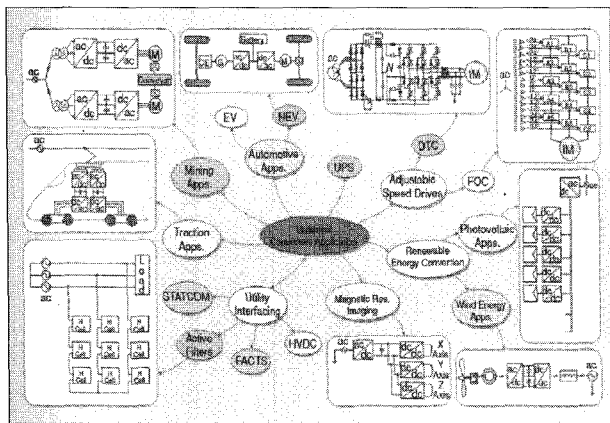


그림 5 멀티레벨 컨버터 구동 어플리케이션의 요약

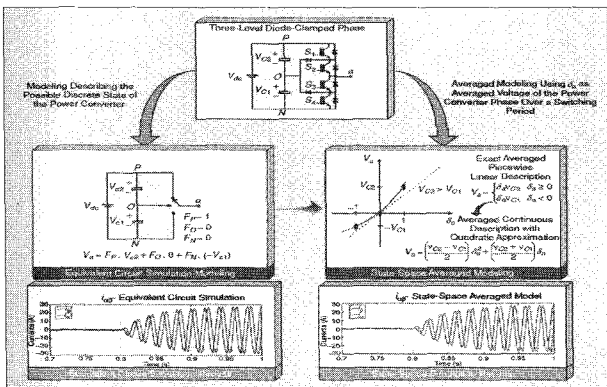


그림 6 멀티레벨 컨버터의 등가 회로 및 상태-공간 모델링

시뮬레이션 시간과 결과의 정확성은 적절하다<sup>(40)</sup>. 그러나 이 모델링 연구는 종종 시뮬레이션 시간이 대단위로 발생되고 수렴의 문제로 인하여 신뢰할 수 없는 결과를 낼 수 가능성이 있다. 이 모델링 기술의 중요한 결점은 모델과 고급 제어 기술의 통합이 거의 불가능하며<sup>(40)</sup>, 성가신 문제가 종종 발생하

는 제어루프의 설계<sup>(41),(42)</sup>에 있어서 항상 복잡하다는데 있다. 이 모델은 제어 루프의 튜닝 체계에 사용되며 그림 6에서 나타난 전류 파형에서 볼 수 있는 스위칭에 의한 고차원 고조파를 평가하기 위하여 사용된다.

### 5. 멀티레벨 컨버터의 상태-공간 평균 모델링

변화하는 제량이 스위칭 기간 동안 그들의 평균값으로 추정되는 이산 모델로부터 상태-공간 평균 모델은 쉽게 얻어진다. 교류 변환기에서 이 양은 정상상태에서 조차 시변적이며, 평균화 이전에 ac 정현적 제량을 dc로 변환하기 위한 좌표의 변환이 필요하다<sup>(43),(44)</sup>. 시불변 시스템의 제어기 설계 기술은 기본과 이외의 중요한 성분이 없는 경우 사용될 수 있다. 이러한 회전자좌표계에 대한 변환을 통해 dc 제량은 기본과 성분을 나타내지만, 어떤 멀티레벨 컨버터 토폴로지는 기본과만으로는 완전히 특성화 되지 않으며, 다량의 고조파를 고려할 수 있는 '고조파 모델'을 유도하는 것이 필요하다<sup>(41)</sup>. 이들 고조파 모델은 복잡하며 몇몇의 진보된 고급 제어 기술로만 적용이 가능하다<sup>(42)</sup>.

최근에 새로운 상태-공간 평균화 모델링 기술이 컨버터의 정확히 평균화된 구간-선형 특성을 통한 근사치에 기반을 두고 소개되었다<sup>(30)</sup>. 그림 6에서 보여준 3레벨 다이오드 클램프 컨버터 상에서, 이상적인 스위치가 가능한 3가지 상태에서 전환하게 될 것이며 그렇게 되면 평균 모델은  $\delta a$ 를 스위치 위치의 평균화된 값으로 고려하여 유도될 수 있다. 그림 6은 정확히 평균화된 구간-선형 근사치의 도식이며 제안된 2차 방정식 근사치의 도식이다<sup>(29)</sup>. 이 기법은 제어기설계에 사용된 간단하지만 충분한 모델을 제공하고 얻어진 방정식의 연속적인 특징으로 인하여 수렴 문제없이 빠른 시뮬레이션을 수행한다<sup>(45)</sup>. 따라서 이들 모델의 사용을 통해 멀티레벨 컨버터에 관련된 기술적 장애 가운데 하나를 극복할 수 있으며, 이는 멀티레벨 전력 시스템의 설계과정을 좀 더 접근하기 쉬운 과제로 만든다. 그림 6은 이러한 모델로 얻은 전류를 나타내고, 등가 회로 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 비교해 보면, 고차 고조파를 제외하고 결과는 거의 같다.

### 6. 멀티레벨 변조 방식

멀티레벨 컨버터 변조와 제어 방식은 지난 10년간 연구와 개발에 있어서 상당한 관심을 받았다. 관심을 받은 몇 가지 이유는 전통적인 변조 방식을 멀티레벨의 경우로 확장하려는 도전, 제어를 위해 더 많은 소자를 사용해야 하는 고유의 부가적인 복잡성, 그리고 이들 토폴로지에 의해 만들어진 추가적인 스위칭 상태에 의해 제공되는 추가적인 이점을 취할 수 있다는 가능성을 포함한다. 결과적으로, 어플리케이션에 따

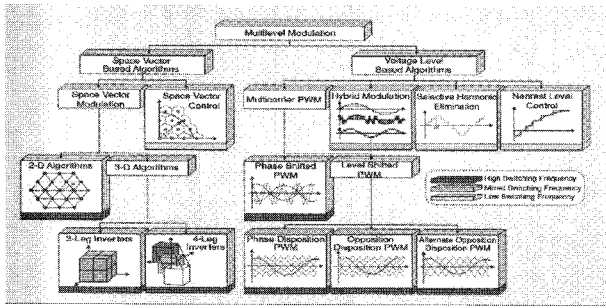


그림 7 멀티레벨 인버터 변조 분류

라서 독특한 특징과 단점을 지닌 많은 수의 다양한 변조 알고리즘이 개발되었다.

멀티레벨 인버터를 위한 변조 방식의 분류는 그림 7에 표현했다. 변조 알고리즘은 운전되는 영역에 따라서 2개의 주요한 그룹으로 나뉘게 된다: 전압 벡터 생성에 기반을 둔 상태공간 벡터 영역 그리고, 시간 프레임에서 전압 생성 레벨에 기반을 둔 시간 영역에 근거한 것이다. 더불어 그림 7에 나타난 다양한 방식들은 그들의 생산하는 스위칭 주파수에 따라 분류된다. 일반적으로 스위칭 손실을 줄이기 위해 대전력 시스템에서는 낮은 스위칭 주파수 방식을 선호하는데 반해 높은 출력 품질과 동특성을 요구하는 응용분야에서는 고주파수 변환 방식이 더욱 적절하다.

### 7. 멀티레벨 컨버터 PWM 전략

전통적인 PWM 기법<sup>[48]</sup>은 컨버터의 각 전력 스위치를 제어하는 멀티플 캐리어를 사용하여, 멀티레벨 컨버터 토폴로지로 훌륭하게 확장되었다. 따라서 그들은 그림 7에서 보듯이 멀티 캐리어 PWM 방식으로 알려졌다. FC와 CHB 같은 멀티셀 토폴로지에서는 각 캐리어는 셀간 균등한 전력분배를 제공하는 양극성 PWM과 단극성 PWM을 각각 사용하여 독립적으로 변조되는 특정 전력 셀에 결합될 수 있다. m개의 셀을 가진 컨버터용에서 낮은 왜곡을 갖는 계단형 다단 출력 파형을 형성하기 위해 CHB에서는 180°/m의 셀간 캐리어 위상차가 그리고 FC에 대하여 360°/m의 셀 간 캐리어의 위상차가 주어진다<sup>[23]</sup>. 따라서 이 방식은 위상 이동 PWM (PS-PWM)으로 알려졌다. 위상 이동 PWM과 PWM (단극 혹은 양극) 타입간의 차는 하나의 FC 셀이 2레벨 출력을 하면 하나의 CHB 전지는 3레벨 출력을 생성하는 것에 기인한다. 이 방식은 FC를 위하여 콘덴서 전압을 자연스럽게 균형 잡고 CHB를 위해서는 입력 전류의 고조파를 완화시킨다.

캐리어는 인버터로 생성된 가능한 각 출력 전압 레벨로 각 캐리어와 관련되는 진폭의 변화로도 구성된다. 이 전략은 레벨 이동 PWM (LS-PWM)으로 알려져 있고, 캐리어의 배치

에 따라서, 그들은 동상 배치, 위상 반대 배치 (POD-PWM), 그리고 교번 위상 반대 배치 (APOD-PWM) 방식이 되며, 모두 그림 7에서 보여준다<sup>[49]</sup>.

이들 PWM 방식 간의 상세한 평가는 참고문헌<sup>[50]</sup>에서 찾아 볼 수 있다. LS-PWM방식은 어떠한 멀티레벨 토폴로지를 위해서도 구현될 수 있다, 그러나 각 캐리어 신호는 각 전력 반도체와 쉽게 부합되기 때문에, 그들은 NPC에 더 적합하다. 캐리어의 수직 이동은 각 캐리어와 출력레벨을 특정한 셀에 관련시켜 셀 간 전력 불균형을 만들기 때문에 특히, LS-PWM방식은 CHB 인버터에 대해 유인력이 없다. 이러한 전력 불균형이 다중 펄스 입력 절연 변압기에 의한 입력 전류의 고조파 경감을 불가능하게 하여 전력 품질을 저하시키게 된다.

결국 하이브리드 변조는 불균형 직류 소스를 가진 CHB를 위해 특별히 고안된 부분적으로 PWM에 속하는 방식이다<sup>[14], [51]-[53]</sup>. 기본 아이디어는 스위칭 손실을 줄이기 위해 컨버터의 셀 간 서로 다른 정격을 적용함에 의한 장점을 취하고, 효율을 높이기 위함이다. 이것은 대전력 셀을 각 사이클별로 한 번씩만 온 오프하는 방식으로 기본과 스위칭 주파수로 제어하는 반면 저전력 셀은 단극성 PWM으로 제어하는 방식에 의해 성취된다. 또한 비대칭적 혹은 하이브리드 위상 기하학은 MPC 구조에<sup>[54]</sup> 기반을 두고 제안되었다.

### 8. 공간 벡터 변조 기법

공간 벡터 변조 (SVM)는 기준 전압이 파워 컨버터에 의해 생성되는 기준 벡터로서 대표된다. 컨버터의 모든 가능한 이산적 변환 상태는 이산 출력 전압으로 나타나고 그것은 달성 가능한 전압 벡터 (항상 상태 벡터로 명명된)로 나타난다. SVM기법은 한 스위칭 기간 동안 그 표본과 동일한 평균 출력 전압을 획득하기 위한 상태 벡터의 선형 결합으로 전압 표본 벡터를 생성한다<sup>[55]</sup>.

최근 몇 년 동안 멀티 레벨 컨버터로 확대된 몇몇의 공간 벡터 알고리즘에 관한 연구가 발견된다. 그 대부분은 특정 레벨 수를 가진 컨버터를 위하여 설계되었고, 레벨의 수에 따라 계산 비용과 알고리즘의 복잡성이 증가되었다. 게다가, 멀티레벨 컨버터용의 일반적인 변환 기법은 삼각함수 계산, 참조 표, 혹은 기준축 변환을 포함하며, 계산량을 증가시킨다.

최근에 SVM 전략은 계산 노력과 다른 전통적인 SVM과 정현파 PWM 변조 기법과<sup>[56]-[62]</sup> 비교한 알고리즘의 복잡성을 과감하게 줄였다. 이들 기법은 전환 순서를 구성하는 표본 벡터와 삼각 함수, 참조 표 혹은 조정 시스템 변환과 관계없이 상당히 단순한 계산을 사용하여 상응하는 듀티사이클을 계산하여 가장 가까운 상태 벡터를 제공했다. 그러므로 이들 방식은 변환 순서의 온라인 연산을 허용하고 각각의 변환 상태 벡

터의 온-상태 존속 시간을 가능하게 하여 유지된 계산 부하를 과감하게 줄인다. 부가적으로, 제안한 방법은 계산 비용이 낮고, 컨버터의 레벨 수와는 관계가 없다.

[59]에 표시된 3차원의 SVM (3D-SVM) 기법은 전력 시스템이 균형을 이루게 될 때(삼고조파 없이) 사용된 잘 알려진 2차원 (2D)-SVM 전략<sup>[60]</sup>의 개념이며, 따라서, 상태 벡터가 평면에 (알파-베타 평면) 배치된다. 그러나 그것은 시스템이 균형이 잡혀있지 않거나 영상분이나 삼고조파가 존재하면 3D 공간으로 일반화 할 필요가 있다. 왜냐하면 이 경우에 상태 벡터가 평면에 없기 때문이다. 멀티레벨 컨버터를 위한 3D-SVM 기법은 거대한 중성성분 전류를 생성하는 부하를 왜곡하는 중립 단상으로 능동 전력 필터에 영상분을 보정하는데 성공적으로 사용된다. 일반적으로, 3D-SVM은 중립의, 불균형 부하, 삼중 고조파가 있거나 없는 시스템에 유용하며, 3D 제어 벡터를 생성하는데 유용하다. 더구나, 이 기법은 직류 링크 콘덴서 전압 균형을 유지하게 한다.

[59]에 제안된 전략은 기준 전압 벡터를 생성하기 위한 가장 가까운 공간 벡터 순서의 온라인 연산을 허용하는 멀티레벨 컨버터를 위한 첫 3D-SVM 기법이다. 제안된 방법에 대한 계산 비용은 매우 낮으며 컨버터의 레벨 순과 상관이 없다. 이 기법은 3D 벡터 제어를 제공하는 모든 어플리케이션에서 변조 알고리즘으로 사용될 수 있다.

마지막으로, 4-레그 멀티 레벨 컨버터는 전력증가에 대한 요구와 더 낮은 고조파 왜곡률 및 더 낮은 EMI<sup>[64],[65]</sup>와 관련된 고성능 전력 품질 때문에 능동 전력 필터와 부하 균형과 왜곡 완화 기능이 있는 내고장성 3상 정류기 쪽의 응용을 찾고 있다. 4-레그 멀티레벨 컨버터는 영상분 전압과 전류의 범위가 넓어 중성전류의 정확한 제어가 가능하다.

일반적으로 적용할 수 있는 최적화된 3D-SVM 알고리즘은 최근에서야 나타났다<sup>[66]</sup>. 제안한 기법이 4-레그 시스템에서 스위칭 수를 최소화 하는 순차를 위한 최적화를 직접적으로 가능하게 한다. [56]-[61]에서처럼, 계산 복잡성은 최소화되었다. 이 기법은 기존의 2D-SVM이 사용될 수 없는 4-레그와 같은 3D 제어 벡터를 필요로 하는 모든 어플리케이션에 변조 알고리즘으로 사용된다.

## 9. 다른 멀티레벨 변조 알고리즘

SVM 과 멀티캐리어 PWM이 널리 수용되고 멀티레벨 어플리케이션을 위해 일정한 수준에 도달했지만, 다양한 어플리케이션의 특별한 요구를 만족시키기 위해 다른 알고리즘들이 개발되었다. 예를 들어, 선택적인 고조파 제거 (SHE)가 스위칭 손실<sup>[6],[12],[67]</sup>을 상당히 축소시키기 때문에 대전력 어플리케이션을 위한 멀티레벨의 경우까지 확대되었다. 그러나 스위칭 각도를 오프라인으로 계산해 운용해야하는 조건에 따

라 삽입되는 테이블에 저장되기 때문에, SHE알고리즘은 개루프 제어와 낮은 대역폭 어플리케이션에 상당히 제한적이다. 더구나, SHE 기반 방식은 스위칭 각도 수의 증가로 인하여 풀어야 할 방정식이 많아져 레벨수가 있는 컨버터에 있어서 설계하기가 매우 복잡해진다. 이 경우, 예를 들어, 멀티레벨 컨버터는 많은 수의 전압벡터로 인해 기준 전압 벡터 생성 시 생성가능한 가장 가까운 공간 벡터의 수가 많은 이점을 가진다<sup>[68]</sup>. 이 원칙은 자연적으로 스위칭 손실이 적은 기본파의 주파수를 형성하여 SHE에서처럼 궤루프와 고 대역폭 시스템에서 쉽게 발행되는 스위칭 손실을 감소시킨다. SVC의 시간 영역 버전은, 가장 가까운 레벨 제어(NLC)로서, 가장 가까운 벡터 대신에 인버터로 생성되는 가장 가까운 전압 레벨에 비교하는 것을 제외하면 본질적으로 같은 원리이다<sup>[69]</sup>. 두 방식은 작동 원리가 근사화에 기반을 두고 있고 기준에 대한 시간 평균에 의한 변조가 아니라서, 높은 레벨 수의 인버터용으로 적합하며, 또한 낮고 가변적인 스위칭 주파수로 인하여, 두 방식은 레벨 수가 낮은 인버터와 낮은 변조 인덱스에 대하여 더 높은 총 고조파 왜곡을 나타낸다.

위에서 언급했듯이, 이전에 언급한 변조 방식과 그림 7에 그림으로 설명한 모든 변조방식이 각 토폴로지에 적당한 것은 아니며, 더구나 몇몇의 알고리즘은 특정한 컨버터에서 이용이 불가능하다. 그림 8은 변조 방식과 멀티레벨 토폴로지사이의 호환성을 요약했다.

## 10. 동작 및 기술적인 문제

멀티레벨 컨버터는 대전력 어플리케이션에 상당히 매력적인 특성을 제공하지만, 멀티레벨 토폴로지의 전력 회로는 전통적인 컨버터보다 더 복잡한 구조를 갖고 있으며 가끔 그들의 작동이 간단하지 않아 긴 설명이 필요한 문제가 있다. 다른 경우에서, 이 여분의 복잡성은 전통적인 토폴로지에서 있기 어려운 효율성, 전력 품질 그리고 고장방지 동작을 도입하는 기회로서 기꺼이 받아들인다.

대부분의 널리 분석되고 알려진 멀티레벨 기술의 결점은 중립 점 제어나 NPC컨버터에 필요한 콘덴서 전압의 균형 문제이다. NPC 컨버터는 변조지수, 동특성, 부하조건 등에 따라 특정한 동작 상태에서 커패시터 전압의 불균형을 나타내는데 이것이 양 커패시터 사이의 전압차를 만들고 중성점을 이동시키며 원치 않는 왜곡을 컨버터 출력에 나타나게 한다. 이러한 결점은 변조방법들에 관한 많은 연구에서 벡터 및 시간 영역 측면 모두와 관련하여 언급되었으며, 이미 풀린 문제로 받아들여지고 있다<sup>[70]-[71]</sup>. NPC 컨버터의 중성점 제어와 전력회로의 구조는 많은 출력 레벨을 가진 비정형적 구조에서 훨씬 복잡해지며, 특히 요구되는 클램프 다이오드의 수에 있어서 그렇다. 그러므로 주로 3레벨 NPC 컨버터가 시장에서 발견

된다. 반대로 FC 컨버터는 자연적인 전압 균형 동작을 하지만<sup>(31)</sup>, 커패시터의 전압은 시작 시점에서 초기화라고도 알려진 정격치로 미리 충전되어 있어야 한다.

이것은 연속적으로 각 콘덴서를 소스에 연결하고 원하는 전압에 도달하면 그들을 분리하여 주는 컨버터의 스위치에 부가된 추가적인 단순한 제어 로직에 의해 수행된다. 토폴로지가 구조상 모듈화 되어 있고, 임의적인 수로 늘릴 수 있겠지만, 추가적인 플라잉 콘덴서와 그와 관련된 비용은 최대 4 단계까지 기존의 구성을 유지시킬 수 있다. 부가적으로, 더 많은 수의 셀이 반드시 컨버터의 출력을 증가시키는 것을 의미하지는 않는다. 왜냐하면, 레벨의 숫자만 변할 뿐 출력전압의 진폭은 변하지 않기 때문이며, 또한 전력 품질도 변하지 않는다.

CHB 컨버터는 입력 변압기의 멀티펄스 2차회로 권선에 의해 제공되는 독립적이고 절연된 dc 소스로 인해 전압 불균형의 문제는 없다. 게다가 특별한 초기화도 필요치 않으며, 그들의 회로구조가 산업적으로 용인을 얻을 수 있는 초대용량 전력 레벨(최대 등급 13.8KV, 1,400A와 31,000KVA)에 도달할 수 있는 직렬 연결을 구조적으로 가능하게 하기 때문이다.

그러나 절연 변압기는 2차측의 양과 입력 전류 고조파 완화를 위한 와인딩 사이의 각도 이동 때문에 표준적이지 않다. 이것은 이 토폴로지가 시장에 소규모로 침투하도록 내모는 중요한 결점이다. 그럼에도 불구하고, 태양광 전력 변압, 능동필터, 그리고 배터리 전원용 전기 자동차와 같은 무 변압기 어플리케이션이 적절한 어플리케이션으로 보고되었다<sup>(32)-(39)</sup>. 복잡한 변압기의 사용은 컨버터의 한 셀에 전력을 공급하는 표준적인 변압기의 사용에 의해 기피되며, 순환전력을 제어함에 의해 다른 전력 셀의 DC 링크를 원하는 값의 충전상태로 유지하기 위한 제어 전략도 사용된다<sup>(76)</sup>.

균등하지 못한 dc 소스가 있는 CHB의 경우, 균일하게 공급된 경우와 같은 결점은 입력 변압기가 와인딩 사이의 균등한 전력 정격의 차가 있는 차이에 의해 적용되고, 추가적으로, 입력 전류의 고조파에 대한 보상도 이루어지지 않는다. 다른 결점은 전지 사이에 비대칭 전력 분배가 구성 성분의 다양한 비율을 강제 촉진하여 발생하는 모듈 성 손실이다. (콘덴서와 반도체의 중요한 전압 비율) 그럼에도 불구하고, 이들 토폴로지는 적은 전력 반도체로 매우 우수한 품질의 대전력 파형을 제공하며 (크기와 가격이 감소하는 반면 신뢰성은 증가한다), 대전력 셀은 기본과 고주파에서 스위칭하기 때문에 스위칭 손실이 낮다. 더구나 복잡한 변압기의 사용은 대형 케이스 혹은 무변압기 응용에 적용된 것과 비슷한 제어 전략을 통해 회피될 수 있다.

비대칭 CHB의 또 다른 문제는 파워 컨버터가 모터링 모드인 경우 어떤 동작상태에서 발생하는 저전력 셀의 회생전력

Modulation Methods	Topologies		
	NPC	FC	CHB
SVM	✓	✓	✓
LS-PWM		✓	—
PS-PWM	×		✓
Hybrid Modulation	×	×	✓
SHE	✓		✓
SVC	—	✓	✓
NLC	—	✓	✓

Legend: ✓ Applicable/Recommended, × Not Applicable, — Applicable/Not Recommended

그림 8 멀티레벨 토폴로지에 대한 변조 방식의 적용 가능성

(그들은 비대칭, 변조 지수와 부하에 따라 변한다) 문제이다. 만일 이 전력이 전단의 액티브 정류기 또는 저항에 의한 소모 등에 의해 적절하게 처리되지 않으면 낮은 전력 전지의 dc 링크 전압은 변동되고, 출력 전압 왜곡을 산출하는 불균형이 일어난다. 이 문제는 전지 사이에 적절한 전압 비대칭을 사용하여 최소화 된다<sup>(14)</sup>.

멀티레벨 컨버터를 사용하는 경우 감소된 시간당 전압변화와 더욱 정현적인 출력으로 인해 비록 공통모드 전압과 배어링 전류는 크게 감소하지만, 이것은 아직도 연구 중인 문제이며, 관련하여 여러 가지 논문이 보고되어 있다<sup>(78)-(81)</sup>.

CHB와 FC가 모듈 구조를 갖고 있기 때문에, 그들은 내부 오류 조건하에서 더 직접적으로 작동되도록 적용될 수 있다. 이것은 산업용 어플리케이션을 위해 매우 매력적인 기능이며, 더 정돈되고 계획된 수리를 준비되는 동안 그들의 작동 정지 시간과 관련된 비용을 없애거나 혹은 상당히 줄이는 것을 고려하면 그렇다. 중요한 문제를 잘못 진단하는 것과 고장에 대해 적절하게 적시에 조치하기만 한다면, 오작동은 발생 가능성에 그칠 뿐이다. 이에 관한 여러 가지 공헌들이 보고되었는데, 단순히 결함 있는 셀을 바이패스 시키는 것에서부터 더 복잡한 방식인 기준 전치 보상 방식까지 보고되었다<sup>(82)-(85)</sup>. 예를 들어, 캐리어의 분광 분석과 출력 전압의 측파대 고조파에 기반을 둔 다양한 오류 감지 메커니즘이 보고되었다<sup>(86),(87)</sup>.

본문에서 분석된 3가지 중요한 토폴로지들은 각각이 특정한 응용에 적합한 고유한 특성들과 단점들을 나타낸다. 참고 문헌<sup>(88)</sup>에는 그들의 구조, 비용과 효율성의 관점에서 비교되었다.

## 11. 결론

멀티레벨 컨버터는 떠오르는 기술에서 잘 정착된 기술로 성숙해 왔으며, 중 전압 대전력 드라이브를 위한 매력적인 솔루션이 된다. 본 논문에서 제시했듯이, 이들 컨버터는 전력 시

장에서 최적화된 해법으로 그들의 광범위한 사용에 대한 기술적인 장애물을 극복했다. 모델링, 제어 전략 설계와 변조방식 개발이 이러한 기술적인 혁명을 이루기 위해 최근 몇 년 동안 도입되었다. 오늘날, NPC, FC, CHB와 같은 멀티레벨 컨버터는 전력 품질, 전력 범위, 모듈화 성능과 중-대전력 어플리케이션을 위해 특별하게 설계된 고 품질 출력 신호의 관점에서 매우 흥미있는 특징들을 갖는다.

따라서 시장이 더 강력하고 분산된 에너지 소스의 형태로 이동하는 지금이 현재와 미래 전력 어플리케이션을 위해 이 기술에 운을 걸 시기인 것이다. 현재 재생에너지용 전력변환, 분산 발전 시스템 같은 에너지 어플리케이션이 직면한 도전은 멀티레벨 컨버터 기술에서의 최근 발전과 함께 이 기술이 많은 것을 제공할 수 있는 거대한 새로운 응용 영역을 열고 있다. 멀티레벨 컨버터가 이들 어플리케이션 시장에서 중요한 시장 점유율에 도달하는 것은 시간문제이다. 이제 멀티레벨 컨버터의 시대라 해도 좋다. ■

### 참고 문헌

- [1] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F.Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [2] J.-S. Lai and F. Zheng Peng, "Multilevel converters a new breed of power converters," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, May 1985.
- [3] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, Dec. 2007.
- [4] A. BenAbdelghani, C.A. Martins, X. Roboam, and T.A. Meynard, "Use of extra degrees of freedom in multilevel drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 965-977, Oct. 2002.
- [5] Z. Pan, F.Z. Peng, K.A. Corzine, V.R. Stefanovic, J.M. Leuthen, and S. Gataric, "Voltage balancing control of diode-clamped multilevel rectifier/inverter systems," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 41, no. 6, pp. 1698-1706, Nov. 2005.
- [6] B. Ozpineci, L.M. Tolbert, and J.N. Chiasson, "Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms," *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 3, no. 3, pp. 92-95, Sept. 2005.
- [7] B.P. McGrath, D.G. Holmes, and T. Meynard, "Reduced PWM harmonic distortion for multilevel inverters operating over a wide modulation range," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 4, pp. 941-949, July 2006.
- [8] M. Marchesoni and P. Tenca, "Diode-clamped multilevel converters: A practicable way to balance dc-link voltages," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 752-765, Aug. 2002.
- [9] K.A. Corzine and X. Kou, "Capacitor voltage balancing in full binary combination schema flying capacitor multilevel inverters," *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 2-5, Mar. 2003.
- [10] M. Marchesoni, "High-performance current control techniques for application to multilevel highpower voltage source inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 189-204, Jan. 1992.
- [11] A. Bendre and G. Venkataramanan, "Neutral current ripple minimization in a three-level rectifier," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 42, no. 2, pp. 582-590, Mar. 2006.
- [12] Z. Du, L.M. Tolbert, and J.N. Chiasson, "Active harmonic elimination for multilevel converters," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 459-469, Mar. 2006.
- [13] L.G. Franquelo, J. Napoles, R. Portillo, J.I. Leon, and M. Aguirre, "A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in threelevel PWM converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3022-3029, Dec. 2007.
- [14] C. Rech and J.R. Pinheiro, "Hybrid multilevel converters: Unified analysis and design considerations," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 1092-1104, Apr. 2007.
- [15] L. Yacoubi, K. Al-Haddad, L.-A. Dessaint, and F. Fnaiech, "Linear and nonlinear control techniques for a three-phase three-level NPC boost rectifier," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1908-1918, Dec. 2006.
- [16] P. Lezana, C.A. Silva, J. Rodriguez, and M.A. Prez, "Zero-steady-state-error input-current controller for regenerative multilevel converters based on single-phase cells," *IEEE Trans. Ind.*



- Electron., vol. 54, no. 2, pp. 733-740, Apr. 2007.
- [17] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A neutralpoint clamped PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 1A-17, no. 5, pp. 518-523, Sept. 1981.
- [18] T.A. Meynard and H. Foch, "Multi-level choppers for high voltage applications," in *Proc. European Conf. Power Electronics and Applications*, 1992, pp. 45-50.
- [19] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli, and S. Tenconi, "A nonconventional power converter for plasma stabilization," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 5, no. 2, pp. 212-219, Apr. 1991.
- [20] T. Ghiara, M. Marchesoni, L. Puglisi, and G. Sciutto, "A modular approach to converter design for high power ac drives," in *Proc. 4th Eur. Conf. Power Electronics and Applications (EPE '91)*, Firenze, Italy, Sept. 1991, pp. 4-477/4-482.
- [21] N.S. Choi, J.G. Cho, and G.H. Cho, "A general circuit topology of multilevel inverter," in *PESC' 91 Conf. Rec.*, Cambridge, MA, June 1991, pp. 96-103.
- [22] M. Carpita, M. Fracchia, and S. Tenconi, "A novel multilevel structure for voltage source inverter," in *Proc. EPE' 91*, Firenze, Italy, Sept. 1991, pp. 1-090/1-094.
- [23] B. Wu, *High Power Converters and AC Drives*. New York: IEEE Press/Wiley, Oct. 2005.
- [24] P.K. Steimer, "High power electronics, trends of technology and applications," presented at *PCIM' 07*, Nuremberg, Germany, May 2007.
- [25] N. Zargari and S. Rizzo, "Medium voltage drives in industrial applications," *Technical Seminar*, IEEE Toronto Section, Nov. 2004.
- [26] R.D. Klug and N. Klaassen, "High power medium voltage drives: Innovations, portfolio, trends," in *Proc. Conf. Rec. EPE*, Dresden, Germany, Sept. 2005.
- [27] S. Bernet, "State of the art and developments of medium voltage converters: An overview," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 82, no. 5, pp. 1-10, May 2006.
- [28] J. Rodriguez, J. Pontt, G. Alzamora, N. Becker, O. Eichenkel, and A. Weinstein, "Novel 20 MW downhill conveyor system using three-level converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 1093-1100, Oct. 2002.
- [29] S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, J. Gago, D. Gonzalez, and J. Balcells, "Interfacing renewable energy sources to the utility grid using a three-level inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1504-1511, Oct. 2006.
- [30] R.C. Portillo, M.M. Prats, J.I. Leon, J.A. Sanchez, J.M. Carrasco, E. Galvan, and L.G. Franquelo, "Modeling strategy for back-to-back three-level converters applied to high-power wind turbines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1483-1491, Oct. 2006.
- [31] T. Meynard, H. Foch, P. Thomas, J. Cournault, R. Jakob, and M. Nahrstaedt, "Multicell converters: basic concepts and industry applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 955-964, Oct. 2002.
- [32] J. Dixon, L. Moran, E. Rodriguez, and R. Domke, "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, Dec. 2005, pp. 2144-2164.
- [33] L.A. Tolbert, F.Z. Peng, T. Cunnyngham, and J.N. Chiasson, "Charge balance control schemes for cascade multilevel converter in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 1058-1064, Oct. 2002.
- [34] D. Zhong, L.M. Tolbert, J.N. Chiasson, B. Ozpineci, Li Hui, and A.Q. Huang, "Hybrid cascaded Hbridges multilevel motor drive control for electric vehicles," in *Proc. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conf., PESC '06*, June 2006, pp. 1-6.
- [35] A. Rahiman, U. Kumar, and V. Ranganathan, "A novel fifteen level inverter for photovoltaic power supply system," in *Proc. IEEE Industry Applications Society Ann. Meeting*, Seattle, WA, 2004, pp. 1165-1171.
- [36] R.L. Naik and K.R.Y. Udaya, "A novel technique for control of cascaded multilevel inverter for photovoltaic power supplies," in *Proc. Eur. Conf. Power Electronics and Applications*, Sept. 2005.
- [37] M. Calais, V.G. Agelidis, L.J. Borle, and M.S. Dymond, "A transformerless five level cascaded based single phase photovoltaic system," in *Proc.*

- IEEE 31st Ann. Power Electronics Specialists Conf. (PESC '00), vol. 3, Galway, Ireland, 2000, pp. 1173-1178.
- [38] C.-C. Hua, C.-W. Wu, and C.-W. Chuang, "Control of low-distortion 27-level cascade inverter with three H-bridge inverter modules," in Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology, ICIT 2006, Dec. 2006, pp. 277-282.
- [39] J. Sabate, L.J. Garces, P.M. Szczesny, Li Qiming, and W.F. Wirth, "High-power high-fidelity switching amplifier driving gradient coils for MRI systems," in Proc. IEEE 35th Ann. Power Electronics Specialists Conf., PESC 04, Aachen, Germany, June 2004, pp. 261-266.
- [40] J. Espinoza and G. Joos, "Power converter system simulation using high level languages," in Conf. Record IEEE 4th Workshop Computers in Power Electronics, Trois-Rivieres, Canada, Aug. 1994, pp. 79-84.
- [41] T.A. Meynard, M. Fadel, and N. Aouda, "Modeling of multilevel converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, no. 3, pp. 356-364, June 1997.
- [42] G. Gateau, M. Fadel, P. Maussion, R. Bensaid, and T. Meynard, "Multicell converters: Active control and observation of flying-capacitor voltages," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 5, pp. 998-1008, Oct. 2002.
- [43] C.T. Rim, D.Y. Hu, and G.H. Cho, "Transformers as equivalent circuits for switches: General proofs and D-Q transformation-based analyses," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 26, no. 4, pp. 777-785, July 1990.
- [44] S.B. Han, N.S. Choi, C.T. Rim, and G.H. Cho, "Modeling and analysis of static and dynamic characteristics for buck-type three-phase PWM rectifier by circuit DQ transformation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, no. 2, pp. 323-336, Mar. 2001.
- [45] G. Escobar, J. Leyva-Ramos, J.M. Carrasco, E. Galvan, R. Portillo, M.M. Prats, and L.G. Franquelo, "Modeling of a three level converter used in a synchronous rectifier application," in Proc. IEEE 35th Ann. Power Electronics Specialists Conf. (PESC2004), vol. 6, Aachen, Germany, pp. 4306-4311.
- [46] L.M. Tolbert, F.Z. Peng, and T.G. Habetler, "Multilevel converters for large electric drives," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 35, no. 1, pp. 36-44, Jan. 1999.
- [47] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, E. Cengelci, S. Sulistijo, B. Woo, and P. Enjeti, "Multilevel converters-A survey," in Proc. Eur. Power Electronics Conf., 1999, Lausanne, Switzerland, pp. 408-418.
- [48] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion," Proc. IEEE, vol. 82, no. 8, Aug. 1994, pp. 1194-1214.
- [49] G. Carrara, S. Gardella, M. Marchesoni, R. Salutari, and G. Sciutto, "A new multilevel PWM method: A theoretical analysis," IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, no. 3, pp. 497-505, July 1992.
- [50] B.P. McGrath and D.G. Holmes, "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, pp. 858-867, Aug. 2002.
- [51] M.D. Manjrekar, P.K. Steimer, and T.A. Lipo, "Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, no. 3, pp. 834-841, May 2000.
- [52] O.M. Mueller and J.N. Park, "Quasi-linear IGBT inverter topologies," in Proc. APEC '94, Feb. 1994, pp. 253-259.
- [53] A. Damiano, M. Fracchia, M. Marchesoni, and I. Marongiu, "A new approach in multilevel power conversion," in Proc. 7th Eur. Conf. Power Electronics and Applications (EPE '97), Trondheim, Norway, Sept. 1997, pp. 4.216-4.221.
- [54] A. Damiano, M. Marchesoni, I. Marongiu, and A. Taffone, "Optimization of harmonic performances in multilevel converter structures," presented at ISIE '97 Conference, Guimaraes, Portugal, July 1997.
- [55] K.E. Bornhardt, "Novel modulation techniques for DC-side commutated inverters," in Proc. 4th Int. Conf. Power Electronics and Variable-Speed Drives, July 1990, 1991, pp. 92-97.
- [56] M.M. Prats, J.M. Carrasco, and L.G. Franquelo,

- "Effective algorithm for multilevel converters with very low computational cost," *IEEE Electron. Lett.*, vol. 38, no. 22, pp. 1398-1400, Oct. 2002.
- [57] M.M. Prats, J.M. Carrasco, L.G. Franquelo, "Effective modulation algorithm for three-level converters," in *Proc. Int. Conf. Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM'02)*, Nuremberg, Germany, May 2002, pp. 621-627.
- [58] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A fast spacevector modulation algorithm for multilevelthree-phase converters," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 37, no. 2, pp. 637-641, 2001.
- [59] M.M. Prats, L.G. Franquelo, R. Portillo, J.I. Leon, E. Galvan, and J.M. Carrasco, "A  $\alpha$  and  $\beta$  space vector modulation generalized algorithm for multilevel converters," *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 1, no. 4, pp. 110-114, 2003.
- [60] M.M. Prats, J.I. Leon, R. Portillo, J.M. Carrasco, and L.G. Franquelo, "A novel space-vector algorithm for multilevel converters based on geometrical considerations using a new sequence control technique," *J. Circuits, Syst. Comput.*, vol. 13, no. 4, pp. 845-861, 2004.
- [61] M.M. Prats, J.M. Carrasco, and L.G. Franquelo, "New space vector modulation algorithms applied to multilevel converters with balanced dc-link voltage," *HAIT J. Sci. Eng. B.*, vol. 2, no. 5-6, pp. 690-714, 2005.
- [62] J. Pou, D. Boroyevich, and R. Pindado, "New feedforward space-vector PWM method to obtain balanced AC output voltages in a three-level neutral-point-clamped converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 1026-1034, Oct. 2002.
- [63] L.G. Franquelo, J.I. Leon, M.M. Prats, and R. Portillo, "Space vector modulation techniques for multilevel converters-A survey," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 2006, no. 4, pp. 56-61, 2006.
- [64] S. Buso, L. Malesani, and P. Mattavelli, "Comparison of current control techniques for active filter applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 722-729, 1998.
- [65] M.P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage source PWM converters: A survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 691-703, 1998.
- [66] L.G. Franquelo, M.M. Prats, R. Portillo, J.I. Leon, J.M. Carrasco, E. Galvan, M. Perales, and J.L. Mora, "Three dimensional space vector modulation algorithm for four-leg multilevel converters using abc coordinates," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 458-466, Apr. 2006.
- [67] L. Li, D. Czarkowski, Y. Liu, and P. Pillay, "Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series-connected voltage inverters," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 36, no. 1, pp. 160-170, Jan. 2000.
- [68] J. Rodriguez, L. Moran, P. Correa, and C. Silva, "A vector control technique for medium-voltage multilevel inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 882-888, Aug. 2002.
- [69] S. Kouro, R. Bernal, C. Silva, J. Rodriguez, and J. Pontt, "High performance torque and flux control for multilevel inverter fed induction motors," in *Proc. 32nd Ann. Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON'06)*, Paris, France, Nov. 2006, pp. 805-810.
- [70] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A comprehensive study of neutral point voltage balancing problem in three-level-neutral-point-clamped voltage source PWM inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, pp. 242-249, Mar. 2000.
- [71] S. Ogasawara and H. Akagi, "Analysis of variation of neutral point potential in neutral-pointclamped voltage source PWM inverters," in *Proc. IEEE-IAS Ann. Meeting*, Toronto, Canada, 1993, pp. 965-970.
- [72] C. Newton and M. Sumner, "Neutral point control for multi-level inverters: Theory, design, and operational limitations," in *Proc. IEEE-IAS Ann. Meeting*, New Orleans, LA, 1997, pp. 1136-1343.
- [73] J.E. Espinoza, J.R. Espinoza, and L.A. Moran, "A systematic controller design approach for neutral-point-clamped three-level inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 6, pp. 1589-1599, Dec. 2005.
- [74] A. Bendre, G. Venkataramanan, D. Rosene, and V. Srinivasan, "Modeling and design of a

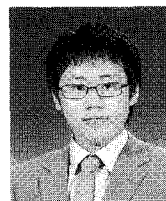
- neutralpoint voltage regulator for a three-level diode clamped inverter using multiple-carrier modulation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 3, pp. 718-726, June 2006.
- [75] T.A. Meynard, H. Foch, P. Thomas, J. Courault, R. Jakob, and M. Nahrstaedt, "Multicell converters: Basic concepts and industry applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 955-964, Oct. 2002.
- [76] D. Zhong, L.M. Tolbert, J.N. Chiasson, and B. Ozpineci, "A cascade multilevel inverter using a single DC source," in *Proc. 21st Annual IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition*, Mar. 2006, pp. 426-430.
- [77] M. Perez, J. Rodriguez, J. Pontt, and S. Kouro, "Power distribution in hybrid multi-cell converter with nearest level modulation," in *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics (ISIE 2007)*, Vigo, Spain, June 2007, pp. 736-741.
- [78] A.K. Gupta and A.M. Khambadkone, "A space vector modulation scheme to reduce common mode voltage for cascaded multilevel inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 1672-1681, Sept. 2007.
- [79] P.C. Loh, D.G. Holmes, Y. Fukuta, and T.A. Lipo, "Reduced common-mode modulation strategies for cascaded multilevel inverters," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 39, no. 5, pp. 1386-1395, Sept. 2003.
- [80] J. Rodriguez, J. Pontt, P. Correa, P. Cortes, and C. Silva, "A new modulation method to reduce common-mode voltages in multilevel inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, pp. 834-839, Aug. 2004.
- [81] P.C. Loh, D.G. Holmes, and T.A. Lipo, "Implementation and control of distributed PWM cascaded multilevel inverters with minimal harmonic distortion and common-mode voltage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 1, pp. 90-99, Jan. 2005.
- [82] C. Turpin, P. Baudesson, F. Richardeau, F. Forest, and T. Meynard, "Fault management of multicell converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, pp. 988-997, Oct. 2002.
- [83] S. Ceballos, J. Pou, I. Gabiola, J. Villate, J. Zaragoza, and D. Boroyevich, "Fault-tolerant multilevel converter topology," in *Proc. 2006 IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, July 2006, pp. 1577-1582.
- [84] J. Rodriguez, P. Hammond, J. Pontt, R. Musalem, P. Lezana and M.J. Escobar, "Operation of a medium-voltage drive under faulty conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 4, pp. 1080-1085, Aug. 2005.
- [85] X. Kou, K. Corzine, and Y. Familant, "A unique fault-tolerant design for flying capacitor multilevel inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 4, pp. 979-987, July 2004.
- [86] P. Lezana, J. Rodriguez, and R. Aguilera, "Fault detection on multicell converter based on output voltage frequency analysis," in *Proc. Industrial Electronics Conf.*, Paris, France, Nov. 2006, pp. 1691-1696.
- [87] E. da Silva, W. Lima, A. de Oliveira, C. Jacobina, and H. Razik, "Detection and compensation of switch faults in a three level inverter," in *Proc. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, June 2006, pp. 1-7.
- [88] S. Bernet, D. Krug, S. Fazel, and K. Jalili, "Design and comparison of 4.16 kV neutral point clamped, flying capacitor and series connected H-bridge multi-level converters," in *Proc. 40th IAS Ann. Meeting*, Hong Kong, Oct. 2005, pp. 121-128.

## 〈 필 자 소 개 〉



### 이종학(李鍾鶴)

1984년 7월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



### 김태훈(金兌勳)

1983년 9월 18일생. 2009년 숭실대 전기공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.