

WBG 전력반도체를 이용한 ESS용 인버터

최근 풍력 및 태양광 등을 이용한 신재생에너지 발전 시스템에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이와 더불어 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)에 대한 수요가 급증하고 있다. ESS는 잉여 전력을 에너지 저장 소자에 저장하고, 저장된 에너지를 필요에 따라 다시 공급하는 기능을 수행한다. 이를 위해 ESS용 전력변환장치(Power Conditioning System, PCS)는 양방향 전력 전달이 가능한 토폴로지로 구성해야 한다. 최근에는 PCS의 효율과 전력밀도를 향상시키기 위해 와이드-밴드 갭(Wide-Band Gap, WBG) 전력반도체를 이용한 ESS용 인버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그중 Hybrid Active Neutral-Point Clamped(Hybrid ANPC) 인버터에 대해 소개하고자 한다.

1. 서론

화석연료 고갈, 지구 온난화, 이상 기후 현상, 환경 오염 등의 문제가 사회적으로 대두되고 있다. 이에 따라, 풍력, 태양광, 바이오매스 등 신재생에너지 자원과 이를 이용한 발전 시스템에 대한 많은 연구가 진행되고 있다^{[1][2]}. 그러나, 풍력 및 태양광 등의 신재생에너지 자원은 환경 조건에 따라 변화하기 때문에 이를 이용한 신재생에너지 발전 시스템으로는 간헐적인 발전만이 가능하다. 즉, 전력 수요가 많은 특정 시간대에 안정적인 전력을 공급하기 위한 발전 시스템으로는 활용하기 어려운 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)에 대한 연구와 활용이 증가하고 있다^{[3][4]}.

ESS는 발전소나 신재생에너지 발전 시스템에서 생산된 잉여 전력을 배터리와 같은 에너지 저장 소자에 저장하고, 저장된 에너지를 전력 수요가 가장 많은 시기와 장소에 다시 공급하는 기술로써 발전 전력의 활용률을 증가시킬 수 있다. 또한, 계통 연계형 ESS를 통해 필요에 따라 저장된 에너지를 공급하여 전력 품질을 개선할 수 있으며, 에너지의 효율적인 운용이 가능하므로 발전 시스템의 효율성을 극대화할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 ESS는 현재까지 많은 분야에 상용화되어 왔다^[5].

ESS는 일반적으로 7가지 분야에 활용될 수 있다(그림 1). 우선, 전력 공급 측면에서 ESS는 신재생에너지 발전 시스템의 불규칙한 출력 변동성을 완화하며 에너지를 저장한 후에 필요한 시간에 활용하는 신재생에너지 보조 및 계통 사고나 수요 변동 등에 대응하기 위한 예비 전력 제공을 위해 활용될 수 있다. 또한, 송·배전 효율 향상을 위한 ESS는 전력 계통의 순간적 수급 균형과 전력 품질을 유지 및 관리하는 주파수 조정, 특정 지역과 시간에 집중된 부하를 분산시켜 설비 신·증설 투자 절감, 경부하 시간 충전 및 피크 시간 방전을 통해 계통의 최대 부하를 감소하는 부하 평준화를 위해 활용될 수 있다. 마지막으로, 전력 수요가 측면에서 ESS는 병원, 웹 서버 등 특수 시설의 갑작스러운 정전사고에 대응하기 위한 비상 발전, 전기 요금이 낮을 때 배터리를 충전하고 높을 때 방전하여 가정 및 빌딩의 전력을 최적으로 소비하도록 하는 에너지 프로슈머로 활용될 수 있다.

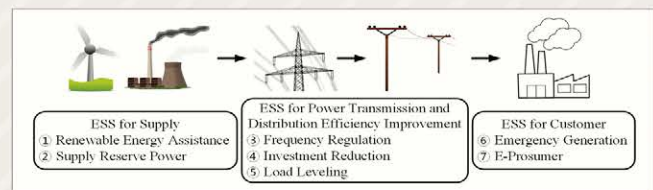


그림 1 ESS의 7가지 활용분야

이처럼 ESS는 다양한 분야에 활용할 수 있으며, ESS용 전력 변환장치(Power Conditioning System, PCS)에 대한 수요가 증가함에 따라 다양한 PCS 토폴로지에 관한 연구가 진행 중이다.

2. ESS용 전력변환장치

ESS는 잉여 전력을 에너지 저장 소자에 저장하고, 저장된 에너지를 필요에 따라 다시 공급하는 역할을 한다. 즉, ESS용 PCS는 에너지 저장 소자와 부하 사이의 전력 전달을 위해 양방향 전력 전달이 가능한 토폴로지를 사용해야 한다. 가장 간단한 구조의 양방향 전력 전달이 가능한 토폴로지는 2-레벨 인버터이며, 제어가 용이하고 구성 비용이 낮아 ESS용 PCS로 널리 사용되어 왔다. 하지만, 최근 필터 크기의 저감, 효율 증가, 대용량 ESS의 설치에 대한 요구가 증가하였다. 이에 따라 ESS용 PCS는 출력 전압의 레벨 수가 더 세분화된 멀티-레벨 토폴로지를 주로 사용하며, 그중 3-레벨 Neutral-Point Clamped(NPC) 인버터의 적용이 확대되고 있다.

2.1 3-레벨 NPC 인버터

3-레벨 NPC 인버터는 일반적으로 12개의 전력반도체 스위치 소자와 6개의 클램핑 다이오드로 구성된다. 직류단 커패시터는 2개로 나누며, 상단과 하단 커패시터의 중간 지점을 중성점이라고 한다. 3-레벨 NPC 인버터의 한 레그는 4개의 전력반도체 스위치 소자가 직렬로 연결된 구조이므로(그림 2), 2-레벨 인버터와 비교하여 전력반도체 스위치 소자의 내압을 절반으로 감소시킬 수 있다. 또한, 각 레그의 출력은 클램핑 다이

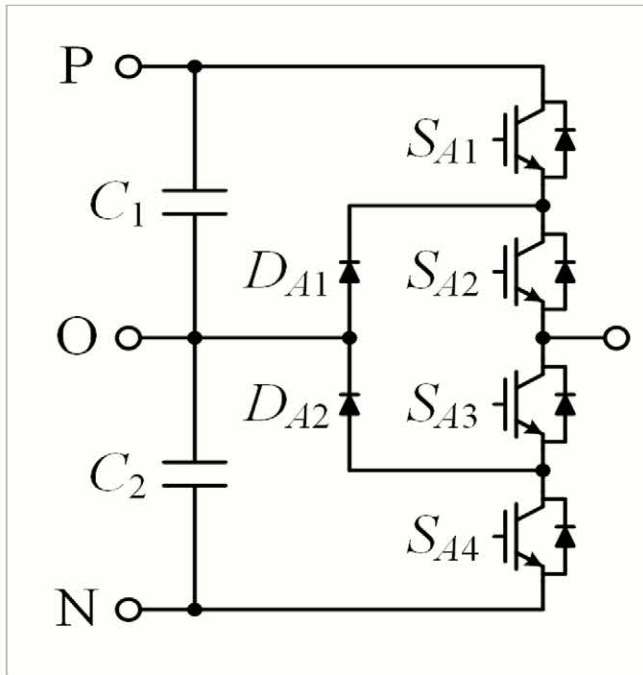


그림 2 3-레벨 NPC 인버터의 레그 구성

오드를 통해 중성점과 연결되므로, 3개의 전압 레벨(+ $V_{DC}/2$, 0, - $V_{DC}/2$)을 출력할 수 있다. 이에 따라, 2-레벨 인버터와 비교하여 출력 전류의 품질을 향상시킬 수 있으므로, 출력 측 필터의 크기를 줄일 수 있다⁷⁾⁸⁾. 결과적으로 3-레벨 NPC 인버터는 고압 및 대용량 시스템을 위한 PCS로 활용할 수 있으며, ESS용 PCS로 사용하기에 적합한 토폴로지이다.

2.2 ANPC 인버터

3-레벨 NPC 인버터에서 한 레그를 구성하는 4개의 전력반도체 스위치 소자를 동작시키는 경우, 전력 손실 분배가 서로 다르게 발생한다. 이로 인해 특정 전력반도체 스위치 소자의 온도가 집중적으로 증가하는 온도 불균형 문제가 있으며, 온도가 증가한 특정 전력반도체 스위치 소자에 의해 전체 PCS의 수명이 제한된다. 이러한 전력반도체 스위치 소자의 온도 불균형 문제를 해결하기 위해 3-레벨 NPC 인버터의 클램핑 다이오드를 능동 스위치 소자로 대체한 Active NPC(ANPC) 인버터 토폴로지가 개발되었다(그림 3)⁹⁾.

ANPC 인버터는 추가된 전력반도체 스위치 소자를 이용하여 O-State를 제어함으로써 한 레그를 구성하는 4개의 전력반도체 스위치 소자 사이의 전력 손실 및 온도를 균등하게 분배할 수 있다¹⁰⁾. 이에 따라, 3-레벨 NPC 인버터에서 발생하는 온도 불균형 문제를 해결할 수 있으며, 전력반도체 스위치 소자의 활용률뿐만 아니라 PCS의 수명 및 효율을 증대시킬 수 있다. 하지만, 제어해야 하는 전력반도체 스위치 소자의 수가 증가하고, 온도 추정 기반의 O-State 선택 기법 등의 추가적인 제어 방법이 요구되므로, 전체 제어 시스템이 복잡해진다.

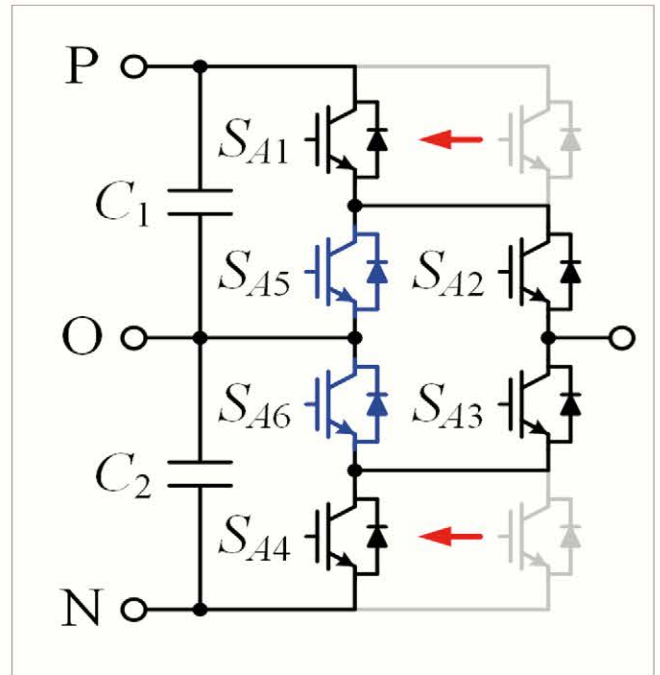


그림 3 ANPC 인버터의 레그 구성

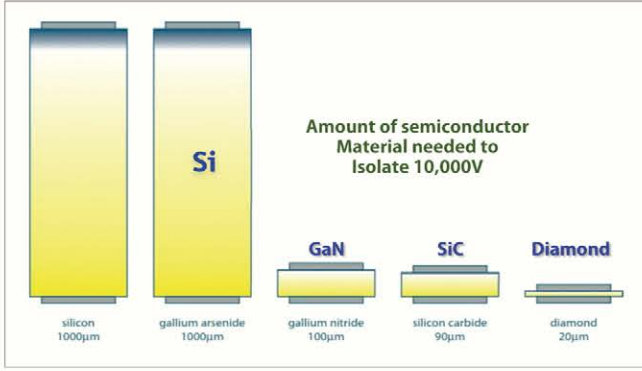


그림 4 10kV 절연을 위해 필요한 반도체 절연물의 양 비교

3. WBG 전력반도체를 이용한 전력변환장치

3.1 WBG 전력반도체

최근에는 PCS의 효율 및 전력밀도 향상에 대한 요구가 증가함에 따라 SiC 기반 또는 GaN 기반 MOSFET과 같은 와이드밴드 갭(Wide-Band Gap, WBG) 전력반도체를 이용한 토폴로지에 대한 연구가 많이 진행되고 있다^{[11][12]}. WBG 전력반도체는 월등히 적은 양의 반도체 절연물로 동일한 전압 저지가 가능하므로 10kV 이상의 고전압 대응 소자의 설계가 가능하다(그림 4).

WBG 전력반도체 스위치 소자는 일반적인 Si 기반 전력반도체 스위치 소자와 비교하여 많은 장점이 있다. 우선, 스위칭 손실이 매우 낮아 PCS의 효율을 크게 향상시킬 수 있다(그림 5)^[13]. 또한, Turn-Off 지연 시간이 짧아 20kHz 이상의 고속 스위칭 동작이 가능하다. 예를 들어, Si 기반 전력반도체 스위치 소자를 사용한 PCS와 동일한 효율일 경우에 스위칭 주파수를 4배까지 증가시켜 고주파수의 스위칭 동작이 가능하므로, 출력 측 필터에 사용되는 수동소자의 크기를 줄일 수 있다. 마지막으로, WBG 전력반도체 스위치 소자는 고온 환경에서의 대응 능력이 우수하여 가혹 환경 조건에서 높은 내구성을 갖고, 높은 온도에서 동작이 가능하므로 방열 설계가 용이하다. 이러한 WBG 전력반도체 스위치 소자의 장점을 통해 고효율 및 고속 스위칭 기반의 PCS 설계가 가능하다. 또한, 출력 측 필터의

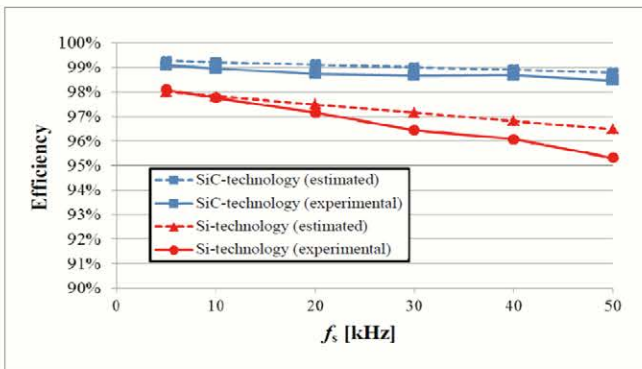


그림 5 스위치 소자 및 스위칭 주파수에 따른 효율 비교

크기를 저감할 수 있어 PCS의 무게, 크기, 비용 등을 줄이고 전력밀도를 증가시킬 수 있다.

ANPC 인버터 또한 모든 전력반도체 스위치 소자를 SiC 기반 MOSFET으로 대체하여 높은 성능의 ESS용 PCS를 구현할 수 있다. 그런데, 최근 시간이 흐르며 SiC 기반 MOSFET의 가격이 점차 내려가고 있지만, 현재까지는 동일한 용량의 Si 기반 IGBT와 비교하여 3.5-6배 정도 다소 고가에 형성되어 있는 문제가 있다. 즉, ANPC 인버터에 필요한 18개의 전력반도체 스위치 소자를 모두 SiC 기반 MOSFET으로 대체하기에는 가격 경쟁력을 확보하기 어렵다. 따라서, ESS용 PCS를 SiC 기반 MOSFET을 사용하여 ANPC 인버터로 구현하는 경우, PCS의 성능과 특성뿐만 아니라 비용의 문제를 적절히 검토하여 최적의 솔루션을 찾을 필요가 있다.

3.2 Hybrid ANPC 인버터

WBG 전력반도체 스위치 소자의 적은 손실, 높은 동작 주파수, 넓은 온도 범위 등 여러 가지 장점을 활용하며, 가격 경쟁력 또한 확보하기 위해 Si 기반 IGBT와 SiC 기반 MOSFET을 혼합하여 사용하는 Hybrid ANPC 인버터 토폴로지가 소개되었다(그림 6).

Hybrid ANPC 인버터는 Si 기반 IGBT만을 사용한 일반적인 ANPC 인버터에서 내측 2개의 전력반도체 스위치 소자를 SiC 기반 MOSFET으로 대체한 것이다^[14]. Hybrid ANPC 인버터의 한 레그는 4개의 Si 기반 IGBT와 2개의 SiC 기반 MOSFET으로 구성된다. 이는 모든 전력반도체 스위치 소자를 SiC 기반 MOSFET을 사용한 Full-SiC ANPC 인버터와 비교하여 절반의 가격으로 거의 동등한 효율과 출력 전류 품질을 얻을 수 있다.

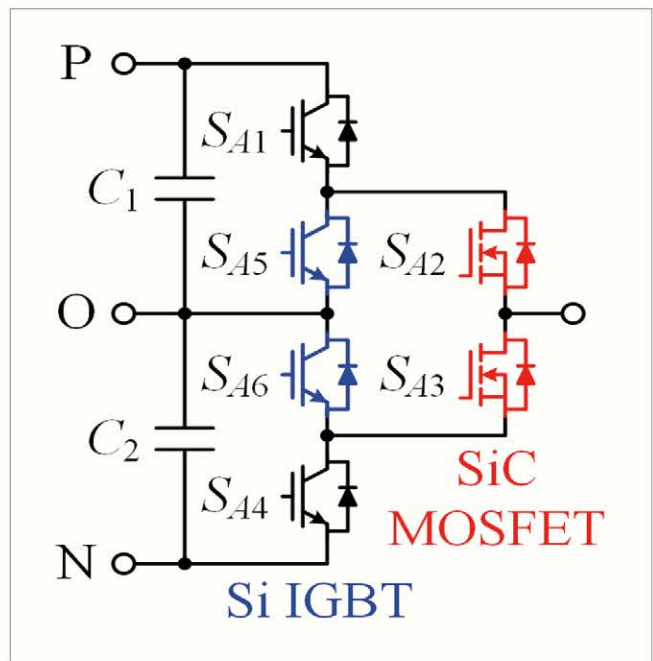


그림 6 Hybrid ANPC 인버터의 레그 구성

표 1 토폴로지 비교

구분	Si-Based NPC	Si-Based ANPC	Hybrid ANPC	Full-SiC ANPC
Si IGBT (EA)	12	18	12	-
Diode (EA)	6	-	-	-
SiC MOSFET (EA)	-	-	6	18
Switching frequency (kHz)	4-6	4-6	30-50	30-50
Power density	Low	Low	High	High
Thermal endurance	Low	Low	High	High
Control complexity	-	High	-	-
Switch price	Low	Low	Middle	High

Hybrid ANPC 인버터는 고유의 구조와 변조 기법에 의해 양방향 전력 변환 시, 전력반도체 스위치 소자 사이의 손실 프로파일이 동일하다. 또한, 온도 추정 기반의 O-State 선택 기법이 요구되는 일반적인 ANPC 인버터와 비교하여 변조 기법이 단순하고, 일반적인 3-레벨 NPC 인버터에서 사용하는 제어 기술을 동일하게 적용할 수 있어 제어 복잡도가 증가하지 않는다. 결과적으로, Hybrid ANPC 인버터는 ESS용 PCS로 가장 적합한 솔루션이라 할 수 있다.

3.3 변조 기법

Hybrid ANPC 인버터는 P, O+, O-, N의 4가지 스위칭 상태를 가지며, P-State에서 $+V_{DC}/2$, N-State에서 $-V_{DC}/2$, O+와 O-인 2개의 O-State에서 0으로 3개의 전압 레벨을 출력한다. 3-레벨 NPC 인버터와 달리 2개의 O-State를 제공하며, 교류 출력의 양의 구간과 음의 구간에서 서로 다른 O-State를 사용한다. Si 기반 IGBT 중에서 $S_{A1}-S_{A6}$, $S_{A5}-S_{A4}$ 는 각각 순시적으로 동일한 On-Off 상태로 동작하며, $S_{A1}-S_{A5}$, $S_{A6}-S_{A4}$ 는 각각 상보적으로 동작

표 2 Hybrid ANPC 인버터의 스위칭 상태

Switching State	Voltage Level	S _{A1}	S _{A2}	S _{A3}	S _{A4}	S _{A5}	S _{A6}
P	$+V_{DC}/2$	1	1	0	0	0	1
O+	0	1	0	1	0	0	1
O-	0	0	1	0	1	1	0
N	$-V_{DC}/2$	0	0	1	1	1	0

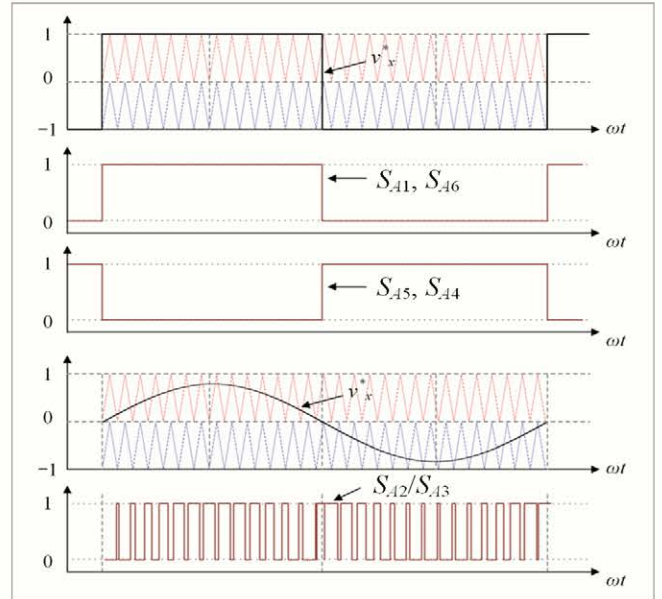


그림 7 Hybrid ANPC 인버터의 변조 기법

한다. 마지막으로, 두 개의 SiC 기반 MOSFET $S_{A2}-S_{A3}$ 또한 상보적으로 동작한다¹⁵⁾.

Hybrid ANPC 인버터의 변조 기법은 멀티-레벨 토폴로지에서 흔히 사용되는 Level-Shifted PWM을 기반으로 구현한다(그림 7).

4개의 Si 기반 IGBT는 교류 출력 기본파의 한주기 동안 On-Off 상태가 한번 바뀐다. 양의 반주기 동안 S_{A1} 과 S_{A6} 은 On 상태, S_{A5} 와 S_{A4} 는 Off 상태를 유지하며, 음의 반주기 동안에는 각각 Off 상태 및 On 상태를 유지한다. 또한, 양의 반주기 동안 영전압은 O+ 스위칭 상태의 경로로 출력되며, 음의 반주기 동안에는 O- 스위칭 상태의 경로로 출력된다. 이에 따라, Si 기반 IGBT는 스위칭 손실이 거의 발생하지 않으며, 대부분의 전력 손실은 전도 손실로 발생한다. Hybrid ANPC 인버터의 출력 전압을 변조하기 위한 고속 스위칭 동작은 SiC 기반 MOSFET인 S_{A2} 와 S_{A3} 이 담당하며, 삼각반송파와 지령 전압의 비교를 통해 On-Off 상태를 결정한다. 즉, Hybrid ANPC 인버터에서 발생하는 스위칭 손실은 SiC 기반 MOSFET인 S_{A2} 와 S_{A3} 에 집중된다.

스위칭 손실이 특정 전력반도체 스위치 소자에 집중되지만, SiC 기반 MOSFET은 Si 기반 IGBT와 비교하여 스위칭 손실이 매우 낮고, 고온 환경에서 내구성이 높다. 따라서, 한 레그를 구성하는 6개 전력반도체 스위치 소자의 주된 전력 손실은 전도 손실로 구성되어 스위치 소자 사이의 온도가 비교적 균일하게 분배된다.

3.4 전류 경로

Hybrid ANPC 인버터의 전류 경로는 변조 기법을 통해 결정된 4가지 스위칭 상태에 따라 결정된다. 우선, 출력 측 부하의 역률이 1인 정방향 운전을 고려하면(그림 8), P-State에서는 S_{A1} 과 S_{A2} 를 통해 전류가 흐르며, N-State에서는 S_{A3} 과 S_{A4} 를 통해

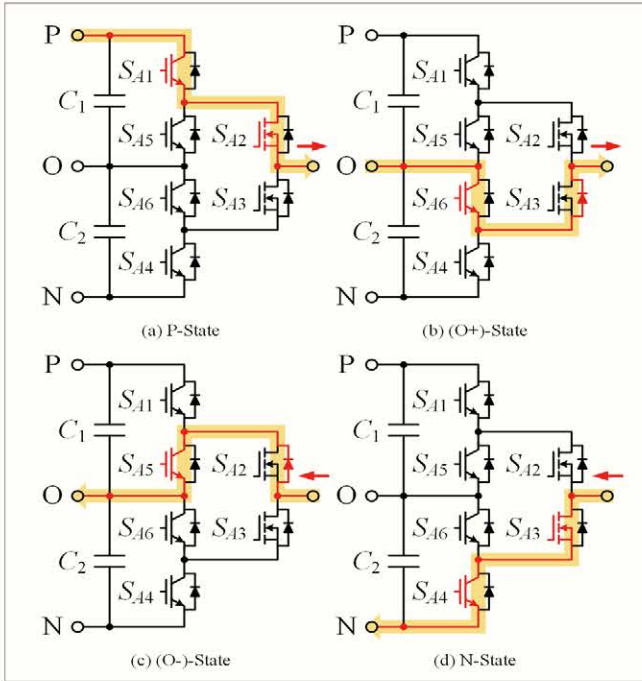


그림 8 정방향 운전 시 스위칭 상태에 따른 전류 경로

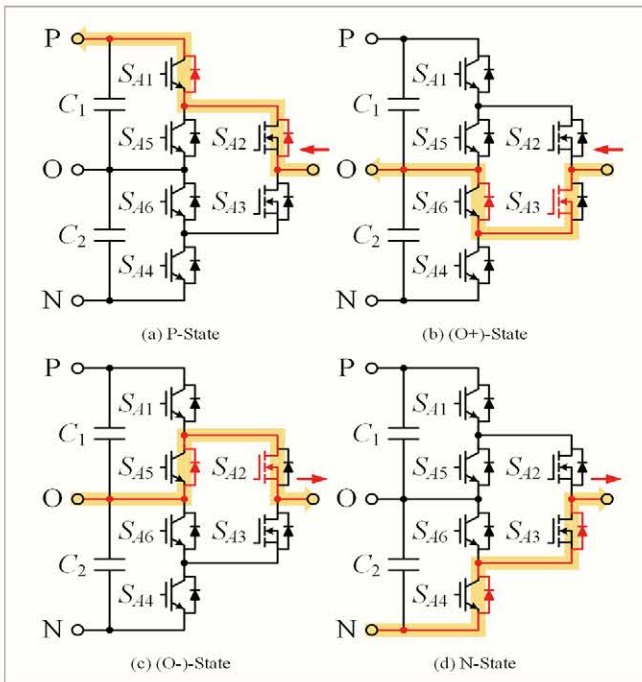


그림 9 역방향 운전 시 스위칭 상태에 따른 전류 경로

전류가 흐른다. 마지막으로, O+와 O-인 2개의 O-State에서는 각각 S_{A6} - S_{A3} 및 S_{A2} - S_{A5} 를 통해 전류가 흐른다.

추가적으로, 출력 측 부하의 역률이 -1인 역방향 운전 시에 전류 경로는 정방향 운전 시와 유사하다(그림 9). 하지만 각 전력반도체 스위치 소자에서 전류가 흐르는 부분의 차이가 존재한다.

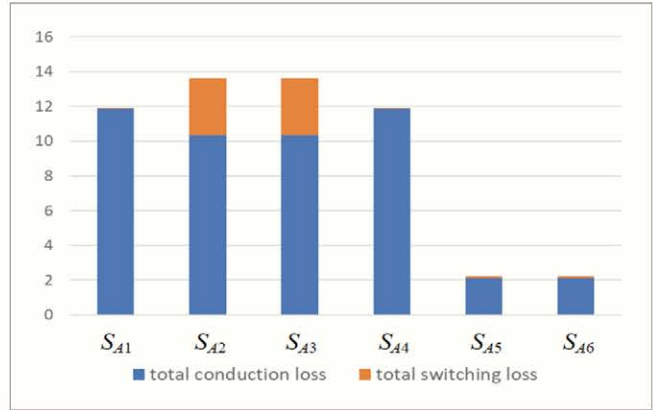


그림 10 정방향 운전 시 전력반도체 스위치 소자의 손실

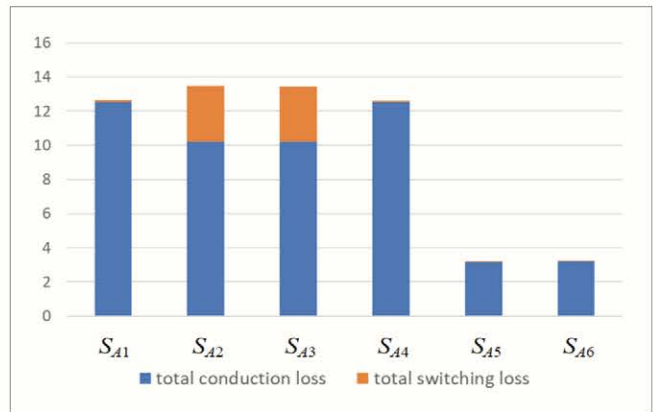


그림 11 역방향 운전 시 전력반도체 스위치 소자의 손실

3.5 손실 분석

Hybrid ANPC 인버터의 출력 측 부하의 역률이 1인 정방향 운전 시에는 S_{A1} 과 S_{A6} 또는 S_{A5} 와 S_{A4} 는 상시 On 상태이므로 대부분 전도 손실만을 갖는다. 이때, 오직 SiC 기반 MOSFET인 S_{A2} 와 S_{A3} 만 전도 손실과 스위칭 손실이 함께 발생한다(그림 10).

일반적인 3-레벨 NPC 인버터는 정방향 및 역방향 운전 시에 전력반도체 스위치 소자에 발생하는 손실 프로파일이 다르게 발생한다. 하지만, 이와 달리 Hybrid ANPC 인버터는 부하의 역률이 -1인 역방향 운전 시에도 4개의 Si 기반 IGBT는 전도 손실만을 가지며, SiC 기반 MOSFET은 전도 손실과 스위칭 손실이 함께 발생한다(그림 11). 또한, 전력반도체 스위치 소자의 전력 손실은 주로 전도 손실로 발생하며, 스위칭 손실은 SiC 기반 MOSFET에 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다.

즉, Si 기반 IGBT와 SiC 기반 MOSFET이 함께 사용되는 Hybrid ANPC 인버터는 양방향 전력 전달 모드에서 역률에 무관한 거의 유사한 손실 프로파일을 가지며, 양방향 전력 전달이 요구되는 ESS용 PCS에 매우 적합한 토폴로지이다.

4. 결론

최근 신재생에너지 발전 시스템에 대한 관심과 더불어 ESS에 대한 수요가 급증하고 있다. ESS는 잉여 전력을 에너지 저장 소자에 저장하고, 저장된 에너지를 필요에 따라 다시 공급하는 기능을 수행하여 전력 공급, 송·배전 효율 향상, 전력 수용가 측면에서 다양한 분야에 활용된다. ESS용 PCS는 양방향 전력 전달이 가능한 토폴로지로 구성해야 한다. 최근에는 전력밀도와 효율 향상뿐만 아니라 대용량 ESS의 설치에 대한 요구가 증가함에 따라 ESS용 PCS로 멀티-레벨 토폴로지를 주로 사용하고 있다. 또한, 전력반도체 스위치 소자의 기술이 개발함에 따라 SiC 기반 또는 GaN 기반 MOSFET와 같은 WBG 전력반도체를 이용한 토폴로지에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 여기서는 Si 기반 IGBT로 구성된 일반적인 ANPC 인버터에서 내측 2개의 전력반도체 스위치 소자를 SiC 기반 MOSFET으로 대체한 Hybrid ANPC 인버터에 대해 간단하게 기술하였다.

Hybrid ANPC 인버터는 WBG 전력반도체 스위치 소자의 적은 손실, 높은 동작 주파수, 넓은 온도 범위 등 여러 가지 장점을 활용할 수 있으며, 가격 경쟁력 또한 확보할 수 있는 토폴로지이다. 또한, 전력반도체 스위치 소자 사이의 온도를 균등하게 하기 위한 추가적인 기법이 요구되는 일반적인 ANPC와 달리 변조 및 제어 기법이 복잡하지 않은 장점이 있다. 마지막으로, Hybrid ANPC 인버터는 정방향과 역방향 운전 시에 손실 프로파일이 유사하여 양방향 전력 전달이 요구되는 ESS용 PCS에 매우 적합한 토폴로지이며, 이를 위한 추가적인 연구가 지속적으로 수행될 필요가 있다. ■

- [1] J. S. Lee and K. B. Lee, "Open-circuit fault-tolerant control for outer switches of three-level rectifiers in wind turbine systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 5, pp. 3806-3815, May 2016.
- [2] H. Bai, X. Wang, and F. Blaabjerg, "Passivity enhancement in renewable energy source based power plant with paralleled grid-connected VSIs," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 53, No. 4, pp. 3793-3802, Jul./Aug. 2017.
- [3] A. Anzalchi, M. Moghaddami, A. Moghadas, M. M. Pour, and A. I. Sarwat, "Design and analysis of a higher order power filter for grid-connected renewable energy systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 53, No. 5, pp. 4149-4161, Sep./Oct. 2017.
- [4] W. Jiang, L. Huang, L. Zhang, H. Zhao, L. Wang, and W. Chen, "Control of active power exchange with auxiliary power loop in a single-phase cascaded multilevel converter-based energy storage system," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 2, pp. 1518-1532, Feb. 2017.
- [5] H. Hajebrahimi, S. M. Kaviri, S. Eren, and A. Bakhshai, "A new energy management control method for energy storage systems in microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 35, No. 11, pp. 11612-11624, Nov. 2020.
- [6] H. T. Le, S. Santoso, and T. Q. Nguyen, "Augmenting wind power penetration and grid voltage stability limits using ESS: Application design, sizing, and a case study," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 27, No. 1, pp. 161-171, Feb. 2012.
- [7] S. Madishetti, B. Singh, and G. Bhuvaneswari, "Three-level NPC-inverter-based SVM-VCIMD with feedforward active PFC rectifier for enhanced AC mains power quality," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 52, No. 2, pp. 1865-1873, Mar./Apr. 2016.
- [8] S. Mukherjee, S. K. Giri, S. Kundu, and S. Banerjee, "A generalized discontinuous PWM scheme for three-level NPC traction inverter with minimum switching loss for electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 55, No. 1, pp. 516-528, Jan./Feb. 2019.
- [9] J. Li, A. Q. Huang, Z. Liang, and S. Bhattacharya, "Analysis and design of active NPC (ANPC) inverters for fault-tolerant operation of high-power electrical drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 2, pp. 519-533, Feb. 2012.
- [10] T. Bruckner, S. Bernet, and H. Guldner, "The active NPC converter and its loss-balancing control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 52, No. 3, pp. 855-868, Jun. 2005.
- [11] A. Kouchaki and M. Nymand, "Filter design for active neutral point clamped voltage source converter using high frequency GaN-FETs," *Proceedings of the PEDS Conf.*, pp. 349-354, 2017.
- [12] A. Jafari, M. S. Nikoo, N. Perera, H. K. Yildirim, F. Karakaya, R. Soleimanzadeh, and E. Matioli, "Comparison of wide-band-gap technologies for soft-switching losses at high frequencies," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 35, No. 12, pp. 12595-12600, Dec. 2020.
- [13] J. Nicolas-Apruzzese, E. Maset, S. Busquets-Monge, V. Esteve, J. Bordonau, A. Calle-Prado, and J. Jordan, "Efficiency comparison between SiC- and Si-based active neutral-point clamped converters," *Proceedings of the ICIT Conf.*, pp. 3058-3063, 2015.
- [14] D. Zhang, J. He, and S. Madhusoodhanan, "Three-level two-stage decoupled active NPC converter with Si IGBT and SiC MOSFET," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 54, No. 6, pp. 6169-6178, Nov./Dec. 2018.
- [15] Q. X. Guan, C. Li, Y. Zhang, S. Wang, D. Xu, W. Li, and H. Ma, "An extremely high efficient three-level active neutral-point-clamped converter comprising SiC and Si hybrid power stages," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 33, No. 10, pp. 8341-8352, Oct. 2018.

박영수 계명대 전기에너지공학전공 조교수

1989년 9월 4일생. 2014년 아주대 정보통신대학 전자공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사).
2019년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 2019년~2020년 동 대학원 정보전자기술연구소 박사후연구원.
2020년~현재 계명대 전기에너지공학전공 조교수.

