

태양광 시스템의 에너지 저장에 적합한 회로 토폴로지와 전력 반도체

이 글에서는 이용 가능한 회로 구성에 대해서 살펴보고, 고도로 효율적이며 컴팩트한 시스템을 달성하기 위해서 디스크리트나 모듈 형태로 적합한 전력 반도체에 대해서 살펴본다. 그리고 또 이러한 저장 시스템에 주로 사용될 것으로 예상되는 배터리 기술과 이들 기술의 장단점에 대해서 살펴본다.

글/Dr. Vladimir Scarpa, Pablo Cortes Lopez, 인피니언 테크놀로지스

최 근 들어서 법규 상의 규제와 표준 규격이 변화함에 따라서, 특히 30kW 이하의 태양광 시스템 설치 시 에너지 저장(energy storage)이 갈수록 더 중요한 부가 기능이 되고 있다. 이러한 배터리 충전 스테이지에는 다양한 방식의 회로 토폴로지를 이용할 수 있다. 각기 다른 기술에는 각기 다른 수량의 반도체, 각기 다른 전압 등급의 전력 소자, 그리고 또 어떤 경우에는 트랜스포머를 필요로 한다. 회로 토폴로지를 결정하는 요인들로는 배터리의 전기적 파라미터와 배터리 뱅크와 인버터 사이에 절연을 필요로 하는지 등을 들 수 있다.

이 글에서는 이용 가능한 회로 구성에 대해서 살펴보고, 고도로 효율적이며 컴팩트한 시스템을 달성하기 위해서 디스크리트나 모듈 형태로 적합한 전력 반도체에 대해서 살펴본다. 그리고 또 이러한 저장 시스템에 주로 사용될 것으로 예상되는 배터리 기술과 이들 기술의 장단점에 대해서 살펴본다.

태양광 에너지 도입

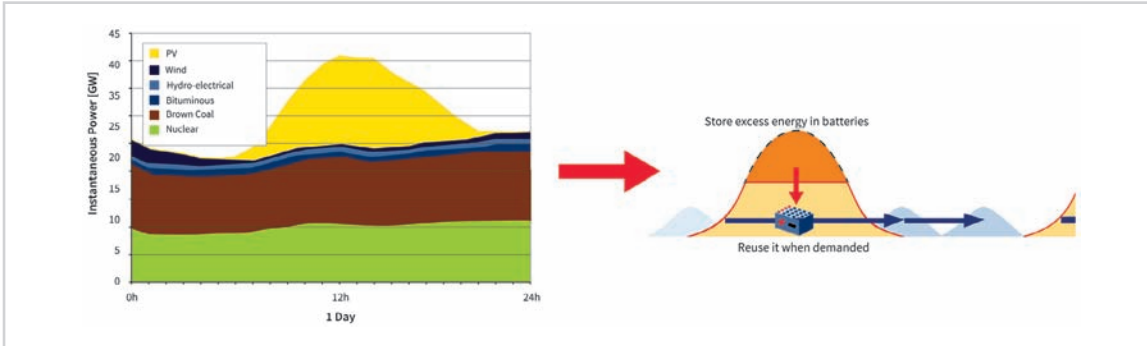
현재 전세계적으로 많은 국가에서 자국의 전력망에 태양광 에너지를 도입하고 있다. 이것은 주로 태양전지 모듈과 PV 인버터를 비롯한 태양광(PV) 시스템의 주요 부품이 가격이 하락하게 되고 정부 프로그램의 장려 정책에 힘입

어서 가능하게 된 것이다. 유럽 지역에서 대표적인 예로는 독일과 이탈리아를 들 수 있다. 이들 국가에서는 새로운 태양광 플랜트를 건설할 때 보조금을 지급한다. 보조금을 지급하는 의도는 환경 오염을 일으키지 않는 재생 에너지의 도입을 장려하기 위한 것이다. 에너지 공급원을 다양화하고 숫자를 늘릴 수 있다는 것은 또 다른 부가적 이점이다.

그림 1은 독일의 현황을 보여주는 것으로서, 독일에서는 하루에 약 30GW의 태양광 발전 용량을 구축하고 있다. 이 그림에서는 일조량이 높고 온도가 온화한 날에 각 에너지원이 총 전력망으로 기여하는 양을 보여주고 있다. 이러한 조건은 태양전지 셀에 최적인 조건이다. 이 그림에서는 PV 플랜트가 하루 중에서 한낮에 에너지 발전이 피크를 이룬다는 것을 알 수 있다. 그러므로 전력망으로 장애를 일으키지 않으려면 에너지 수요가 이와 동일한 프로파일을 따라야 한다. 다른 방법으로 나머지 에너지원들이 그에 상응하게 발전량을 줄이고 PV 발전이 줄어드는 심야에 각자의 정상적인 수치로 돌아가도록 할 수 있다.

PV 시스템이 증가하고 이들 대부분을 메인 전력망으로 연결함에 따라서 자연스러운 결과로서 일조량이 전력망으로 주입되는 에너지 양에 영향을 미치게 되었다. 그림으로써 전력망 관리 측면에서 주파수와 전압 같은 전기적 파라미터의 변동을 방지하기 위해서 추가적인 사항들을 고려해야 하게 되었다. 이러한 변동은 작년과 올해처

그림 1. 독일에서 보통의 일조량인 날일 때 PV 전력의 기여량. 피크 발전량을 저장하고 재사용



럼 연간 단위, 계절과 계절, 주간과 야간, 그리고 심지어는 구름이 많이 낀 날씨가 같아도 같은 날이라도 시간대에 따라서 고려해야 할 것이다.

에너지 저장의 구현

통상적인 태양광 시스템은 태양전지 모듈을 직렬 또는 병렬로 연결한 것과 DC 전압을 AC 전력망 레벨로 적절히 변환하기 위한 DC/AC 인버터로 이루어진다. PV 모듈로부터 들어오는 에너지를 저장하기 위해서는 시스템으로 충전 컨트롤러 스테이지를 추가해야 한다. 이 스테이지는 배터리 뱅크를 적절히 충전하고 저장된 에너지를 다시 DC 링크로 돌려보내는 일을 한다.

비절연형 충전 컨트롤러

그림 2는 태양광 플랜트로 에너지 저장 시스템을 구현하기 위한 단순한 구성을 보여준다. 단일위상 태양광 인버터는 부스터 스테이지 단과 풀-브리지 인버터 단으

로 이루어진다. 이 DC 링크로 충전 스테이지를 연결한다. 차저 스테이지는 2개 스위치, 2개 다이오드, 배터리 뱅크로 연결되는 필터 인덕터로 구성된다.

DC 링크의 전압 레벨은 부스터 스테이지에 의해서 일정하게 유지되며 통상적으로 배터리 뱅크의 전압보다 높다. 단일위상 시스템의 통상적인 DC 링크 값은 360V~480V이고, 다수의 직렬 연결 배터리로 이루어진 배터리 뱅크의 전압은 통상적으로 150V~250V이다. 그러므로 컨트롤러 스테이지는 배터리 뱅크를 충전할 때는 스텝다운 컨버터로 동작하고 에너지를 배터리에서 DC 링크로 되돌려보낼 때는 스텝업 컨버터로 동작한다.

그림 2의 구성의 가장 큰 장점은 적은 양의 반도체를 필요로 하고 충전 경로와 방전 경로 둘 다 높은 효율을 달성한다는 것이다. 그림 3은 인피니언의 TRENCHSTOP™ 5 제품군 중에서 50A 650V IGBT 디바이스를 이용했을 때 충전 전류에 따른 효율 수치를 보여준다. DC 링크 전압은 400V이고 배터리 전압은 150V인 경우이다. 이 그림에서 보듯이 스위칭 주파수가 20kHz인 경우에 배터리 충전

그림 2. 태양광 시스템의 비절연형 에너지 저장

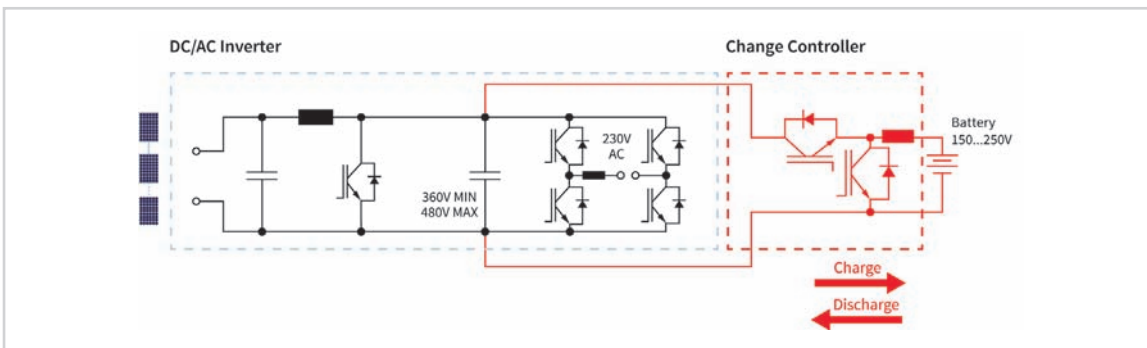
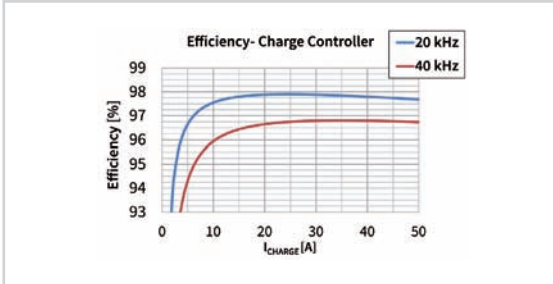


그림 3. IKW50N65H5 다이오드를 이용했을 때 비절연형 충전 컨트롤러의 효율 결과

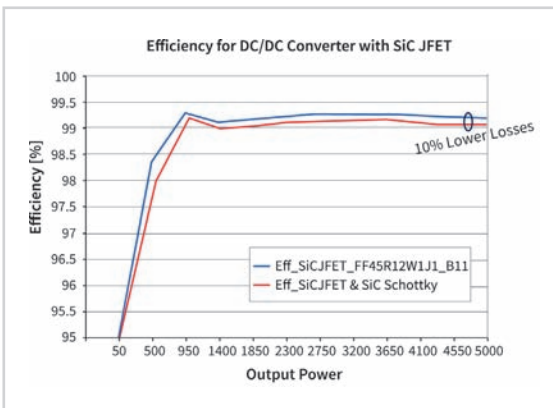


시의 효율 수치가 98%에 근접한다는 것을 알 수 있다. 40kHz인 경우에는 거의 97%에 이르는 효율을 달성할 수 있다. 전체적인 충전 및 방전 사이클에 걸친 결과적인 효율은 충전 효율과 방전 효율을 곱해서 얻을 수 있다. 이렇게 해서 배터리의 저항 손실을 고려하지 않았을 때 20kHz일 때는 96% 및 40kHz일 때는 94%의 총 효율을 달성한다.

3상 시스템의 경우에는 DC 링크 전압이 800V를 넘을 수 있으므로 블로킹 전압이 1200V에 달하는 전력 스위치를 필요로 한다. 전력 모듈 제품인 FF45R12W1J1_B11은 CoolSiC™ JFET 기술을 기반으로 한 하프 브리지를 포함 함으로써 스텝업/스텝다운 토폴로지로 이용할 수 있으므로 양방향 에너지 전달이 가능하다. 또한 이 모듈은 프리-휠링 주기동안에 SiC JFET 채널을 이용함으로써 전력 디자인의 유용성을 높일 수 있다. 이것은 SiC JFET의 양방향 전도 특성을 활용해서 가능한 것이다.

그림 4에서는 시뮬레이션한 5kW 3상 저장 인버터의

그림 4. 1200V CoolSiC JFET 전력 모듈을 이용한 하프 브리지 토폴로지의 효율 결과



예상 효율을 보여준다. 이 그림에서 보면 FF45R12W1J1_B11 전력 모듈을 이용할 때의 효율이 CoolSiC JFET과 thinQ!™ SiC 쇼트키 다이오드를 결합적으로 이용할 때의 효율보다 약간 더 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 반도체 손실이 약 10% 감소하기 때문이다. 두 경우 모두 40kHz 스위칭 주파수와 650V DC 링크 전압일 때 효율이 거의 대부분 동작 지점에 걸쳐서 99%를 넘는다 것을 알 수 있다.

비절연형 토폴로지는 배터리 뱅크, 태양전지 모듈, 전력망 사이에 전기적 절연을 이용하지 않는 것이다. 그러므로 낙뢰 시와 같이 전력망으로부터 유입되는 과전압으로부터 배터리 뱅크를 보호하기 위해서 추가적인 회로를 이용할 것이 권장된다. 이러한 회로는 시스템으로부터 이러한 과전압을 차단하기에 충분히 신속한 성능으로서 배터리 뱅크의 양 단자 또는 음 단자로 퓨즈를 연결하는 등의 방법으로 구현할 수 있다. 또한 단상 및 3상 시스템의 통상적인 DC 링크 전압을 고려했을 때 비절연형 충전 컨트롤러는 150V~400V의 고전압 배터리를 필요로 한다. 낮은 전압의 배터리를 이용하는 것은 기술적으로 가능한 하지만 스위치의 변조 비율이 최적에 미치지 못함으로써 시스템 효율이 훨씬 떨어질 것이다.

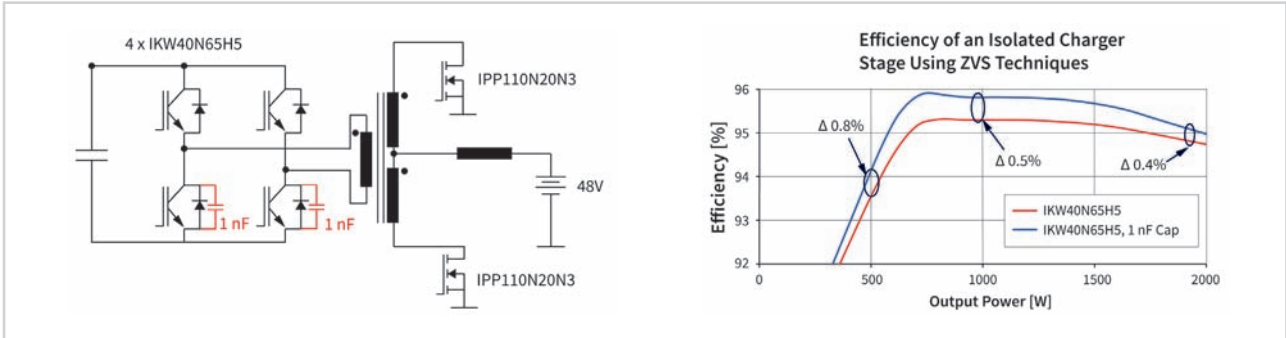
절연형 충전 컨트롤러

비절연형 충전 컨트롤러의 단점을 극복하기 위해서는 트랜스포머를 이용해서 배터리와 다른 스테이지 사이에 본래 전기적 절연을 제공하는 컨버터를 이용할 수 있다. 뿐만 아니라 적합한 트랜스포머 비율을 이용하면 12V~96V 범위의 낮은 전압의 배터리를 이용할 수도 있다.

많은 양의 반도체와 자기 소자를 필요로 함으로써 절연형 솔루션은 비절연형 충전 컨트롤러보다 비용이 더 비싸고 효율이 떨어질 것으로 여겨진다. 하지만 최근의 발전된 IGBT 기술을 이용하고 여기에 소프트 스위칭 기법을 결합하면 반도체 손실을 낮춤으로서 95%를 넘는 효율 수치를 달성할 수 있다.

그림 5의 왼쪽은 ZVS(영 전위 스위칭) 컨버터의 기본적인 회로도이다. 이 구성은 2개 레그를 위상 변조 기법을 이용해서 구동한다. 그림 5의 오른쪽 도표에서는 ZVS 위상 변조 컨버터의 효율을 보여준다. 하단측 IGBT에 출력

그림 5. ZVS 절연형 충전 컨트롤러의 기본적인 회로도(왼쪽)와 하단측 IGBT로 병렬로 1nF 커패시터를 추가했을 때와 추가하지 않았을 때 측정 효율(오른쪽)



커패시터를 추가함으로써 이 컨버터의 효율을 최고 0.8% 까지 향상시킬 수 있다. 이것은 커패시터가 턴오프 시에 디바이스 내의 소수 캐리어(minority carrier)를 신속하게 추출할 수 있기 때문이다. 그럼으로써 IGBT의 테일 전류 시간을 단축하고, 이는 다시 턴오프 손실을 감소시킨다. 이와 같은 ZVS 토폴로지를 이용함으로써 커패시터에 저장되어 있는 에너지가 소산되는 것이 아니라 스위치 턴온에 앞서 회로로 되돌려보내진다.

배터리 토폴로지

다양한 배터리 기술이 전기 시스템에서 저장 장치로 이용되고 있다. 이들 기술은 화학적 소재와 전기적 특성이 각기 다르다. 표 1에서는 납축전지(lead-acid)와 리튬이온(Li-Ion)의 두 가지 배터리 기술의 주요 전기적 특성을 비교하고 있다. 기술적 및 경제적 이유에서 PV 시스템에는 이 두 기술이 저장 소자로 주로 이용될 것으로 예상된다.

에너지/가격(energy/price) 항목과 충전 안정성(charge stability) 항목에서는 배터리의 가격과 수명이 서로 절충 관계라는 것을 알 수 있다. 리튬이온 배터리는 동일한 용량

의 납축전지와 비교해서 가격이 3배 이상 비싸다. 대신에 리튬이온 배터리는 최대 20년에 이르는 작동 수명을 달성할 수 있는 반면에, 납축전지는 작동 수명이 겨우 5년에 불과하다. 납축전지의 수명을 늘릴 수 있는 대안은 시스템의 저장 용량을 필요보다 과하게 키우는 것이다. 그런데 이렇게 하면 배터리가 극심하게 방전되는 것을 방지할 수는 있으나 전체적인 설치 비용이 그만큼 높아지게 된다.

현재 상업적으로 구축되어 있는 에너지 저장 시스템에서 주로 선택되고 있는 배터리 기술은 리튬이온이다. 이렇게 선택하는 가장 주된 이유는 이 배터리가 수명이 길기 때문이다. 태양광 시스템에서 배터리 수명이 짧으면 작동 수명 동안에 배터리를 여러 번 교체해야 함으로써 유지비가 증가하게 될 것이다. 뿐만 아니라 일부 국가들에서는 정부 보조금을 받기 위해서는 최소한의 배터리 수명 요건을 충족하도록 하고 있다. 바로 독일이 그러한 경우로서, 독일에서는 최소 7년의 제조업체 보증을 요구하고 있다.

배터리 수명을 극대화하기 위해서는 어떤 배터리 기술을 사용하느냐에 상관 없이 배터리의 완전 방전을 방지해야 한다. 방전 심도(Depth of Discharge: DoD)는 통상적으로 배터리 제조업체에서 제공하는 사양으로서, 특

정한 충전 사이클 횟수를 보장하기 위해서 배터리를 어느 정도로까지 방전시킬 수 있는지에 대해서 지정한 것이다. 리튬이온 배터리는 DoD가 통상적으로 70~80% 대이고, 납축전지는 50%만으로 권장된다. **SN**

표 1. 납축전지와 리튬이온 배터리의 전기적 특성

	Lead-Acid	Li-Ion (LiFePO4)
Specific energy	30-40 Wh/kg	100-265 Wh/kg
Energy density	60-75 Wh/l	250-730 Wh/L
Specific power	180 W/kg	250-340 W/kg
Energy/price	7 Wh/US\$	2.5 Wh/US\$
Price per kWh	140 US\$	400 US\$
Self-discharge rate (per month)	3% - 20%	15% @ 40°C
Cycle stability (80% DoD)	200-400 cycles	400-1200 cycles
Nominal cell voltage	2.1 V	3.2 V