간편한 병렬 구성을 통해 온도 상승을 최소화할 수 있는 수백 와트, 60V 입/출력, 동기식 4-스위치 벅-부스트 컨버터

Hundreds of Watts, 60V In or Out: Synchronous 4-Switch Buck-Boost Converter Is Easy to Parallel to Minimize Temperature Rise

LT3790 동기식 벅-부스트 컨버터는 다양한 부하에 최대 98.5% 효율로 100W 이상을 공급할 수 있으며, 더 높은 전력 출력을 위해 손쉽게 여러 개의 컨버터를 병렬 연결할 수 있다.

글/Keith Szolusha, Applications Engineering Section Leader, Power Products
Linear Technology Corp.

LT3790은 단 하나의 인덕터를 사용하여 최대 98.5% 효율로 정전압과 정전류를 모두 조절하는 4-스위치 동기식 벅-부스트 DC/DC 컨버터이다. LT3790은 수백 와트를 공급할 수 있으며, 60V 입/출력 정격을 가지므로 스텝 업과 스텝다운 변환이 모두 필요한 곳에서 이상적인 DC/DC 전압 레귤레이터와 배터리 충전기를 만들 수 있다.

단일 LT3790 컨버터는 동기식 스위칭 토폴로지를 채택해 높은 출력을 제공할 수 있지만, 보다 높은 출력에서는 스위칭 및/또는 전도 손실이 과도한 보드 열로 단일 컨버터에 심각한 상태를 초래할 수 있다. 발열 문제는 방열판을 추가하거나, 추가적인 외부 게이트 드라이버 또는 강제 환기를 이용해 완화할 수 있으나, 보다 바람직한 방법은 2개 이상의 컨버터를 간단히 병렬로 연결해 부하를 분산하는 것이다. 다음은 LT3790 벅-부스트 레귤레이터로 간단하게 수행할 수 있는 방법이다.

120W, 24V, 5A 출력 벅-부스트 전압 레귤레이터

그림 1에 보이는 벅-부스트 컨버터는 최대 98.5% 효율로 0A~5A 부하에서 24V를 조절한다. 컨버터는 8V~56V의 입력 전압 범위에서 동작하며 가변 미달전압 및 과전압 록아웃 기능이 회로를 보호한다. 또한 단락 회

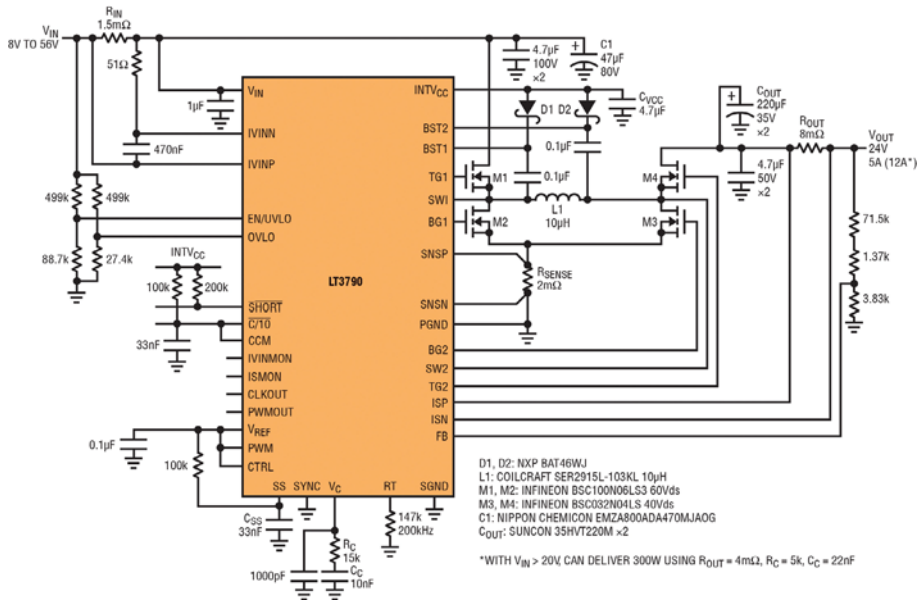
The LT3790 is a 4-switch synchronous buck-boost DC/DC converter that regulates both constant voltage and constant current at up to 98.5% efficiency using only a single inductor. It can deliver hundreds of watts and features a 60V input and output rating, making it an ideal DC/DC voltage regulator and battery charger when both step-up and step-down conversion are needed.

A single LT3790 converter can deliver high power due to its synchronous switching topology, but eventually the switching and/or conduction losses at higher power can overwhelm a single converter with excessive board heating. Although heat can be mitigated with bulked up heat sinks, additional external gate drivers, and/or forced airflow, it may be better to simply tie together two or more converters in parallel to spread the load. This is easy to do with the LT3790 buck-boost regulator.

120W, 24V, 5A OUTPUT BUCK-BOOST VOLTAGE REGULATOR

The buck-boost converter shown in **Figure 1** regulates 24V with 0A?5A load at up to 98.5% efficiency. It operates from an input voltage range of 8V to 56V. Adjustable undervoltage and

Figure 1. 120W, 24V, 5A output buck-boost voltage regulator with 8V-56V input has up to 98.5% efficiency and is easy to parallel.



로 보호 기능을 갖추고 있어 출력에 단락 회로가 존재할 경우 /SHORT 출력 플래그가 이를 표시한다. 컨버터는 낮은 부하에서 DCM 동작을 수행하므로 전력 소모를 최소화하고 역전류 보호를 제공한다. 감지 저항 ROUT는 단락 회로 및 과부하 발생에 대해 모두 출력 전류 제한을 설정하므로 견고한 애플리케이션을 보장한다.

Figure 2. Single 24V, 5A converter shown in Figure 1 has a maximum of 20° C temp rise on any component at 12V input (a) and 50° C at 9V input (b). Even at 8V input (c), the hottest component reaches only 96.5° C without forced airflow or heat sinking.

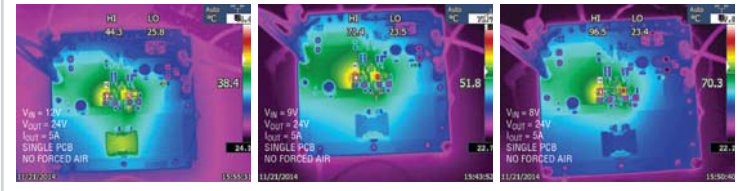


그림 2a에서 보듯이 12V 입력에서 이 120W 보드의 온도 상승은 가장 발열이 심한 부품(스위칭 MOSFET)에서 단 20℃에 불과하다. 또한 12V 입력에서 이보다 더 높은 출력 전력이나 더 낮은 V_{IN}에서 동일한 120W에 대해 과도한 부품 온도 상승 없이 여전히 마진이 존재한다. 하지만, 더 높은 출력 전력은 그에 따라 증가된 출력 전류 제한을 필요로 한다는 점에 주의한다. 120W 출력에서 최저 8V 입력으로 동작할 경우 이 표준 4-레이어 LT3790 PCB의 부품들은 강제 환기나 방열판 없이도 실온에서 97℃ 미만을 유지한다. 동일한 제한된 온도 상승과 입력 전압 범위에서 매우 높은 전력을 제공하려면 2개 이상의 LT3790 컨버터를 간단히 병렬로 연결하면 된다.

overvoltage lockout protect the circuit. It has short-circuit protection and the /SHORT output flag indicates when there is a short circuit on the output. It features DCM operation at light load for lowest power consumption and reverse current protection. The sense resistor ROUT sets the output current limit during both a short-circuit and overload situations, making this a robust application.

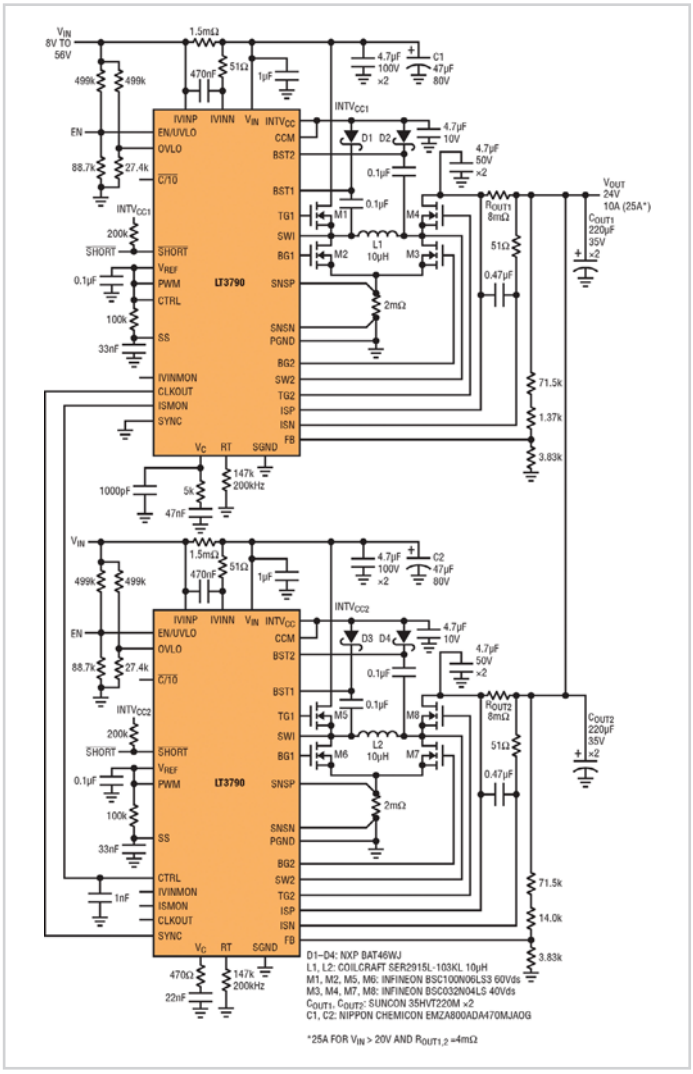
The temperature rise of this 120W board at 12V input is only 20° C on the hottest component (a switching MOSFET) as shown in **Figure 2a**. There is still margin for either higher output power at 12V input, or the same 120W from a lower V_{IN} without excessive component temperature rise-note that higher output power requires a correspondingly increased

병렬 컨버터, 정전압 마스터, 정전류 슬레이브

이상적으로, 병렬 연결된 스위칭 컨버터는 전체 출력 범위에 걸쳐 균등하게 부하를 공유한다. LT3790은 정전압 또는 정전류 동작으로 실행할 수 있으므로 하나의 마스터 컨버터가 출력 전압을 제어하면서 동시에 디바이스의 전류 모니터 출력(ISMON)이 하나 이상의 슬레이브 컨버터에 자체 출력 레벨과 정합하려면 얼마나 많은 출력 전류를 조절해야 하는지 알려준다(CTRL 입력). 다음의 기법을 사용하면 다중 컨버터 간 전류 정합은 거의 이상적이다.

마스터의 CLKOUT 핀을 슬레이브의 SYNC 입력에

Figure 3. Two LT3790 24V voltage regulators are easy to parallel for double the output with limited discrete component temperature rise.



output current limit. When operated down to 8V input with 120W output, the components on this standard 4-layer LT3790 PCB remain below 97°C (at room temp) without forced airflow or heat sinking. To deliver significantly higher power with the same, limited temperature rise and input voltage range, two or more LT3790 converters can easily be connected in parallel.

PARALLEL CONVERTERS, CONSTANT VOLTAGE MASTER, CONSTANT CURRENT SLAVE

Ideally, paralleled switching converters share the load equally throughout the entire output range. The LT3790's ability to run in either constant voltage or constant current operation allows one master converter to control the output voltage, while its current monitor output (ISMON) tells one or more slave converters how much output current to regulate (CTRL input) in order to match its own output level. Current matching between multiple converters is nearly ideal using this technique.

The CLKOUT pin of the master can be directly tied to the SYNC input pin of the slave for 180° phase-interleaving of the two parallel converters. The 180° phase difference between the converters reduces overall converter output ripple, instead of doubling it. If more than two converters are connected in parallel, they can be synchronized to either operate phase-shifted or in-phase with an external clock source, or daisy-chaining CLKOUT pins.

Figure 3 shows a 24V, 10A (or 25A under certain conditions, see figure) voltage regulator formed by running two LT3790s in parallel. By using two parallel circuits, the maximum temperature rise on any one discrete component is only 20°C for the M3 and M7 MOSFETs at 12V input and 50°C at 9V input.

The top converter (master) in Figure 3 regulates the 24V output voltage and commands the current level that is regulated by the bottom (slave) converter. The ISMON output of the master indicates how much current the master is

직접 연결해 2개의 병렬 컨버터가 180° 위상 인터리빙하도록 만든다. 컨버터 간 180° 위상 차는 전체 컨버터 출력 리플을 두 배로 증가시키는 것이 아니라 감소시킨다. 2개 이상의 컨버터를 병렬로 연결하는 경우 이들 컨버터를 동기화해 외부 클록 소스 또는 데이지 체이닝 CLKOUT 핀과 위상 편이 또는 동위상으로 동작하게 할 수 있다. **그림 3**은 병렬 연결된 2개의 LT3790을 동작시킬 때 24V, 10A(또는 특정 조건에서는 25A, 그림 참조) 전압 레귤레이터를 보여준다. 2개의 병렬 회로를 사용함으로써 어느 디스크리트 부품에서나 최대 온도 상승은 12V 입력에서 M3 및 M7 MOSFET의 경우 단 20℃이고, 9V 입력에서는 50℃이다.

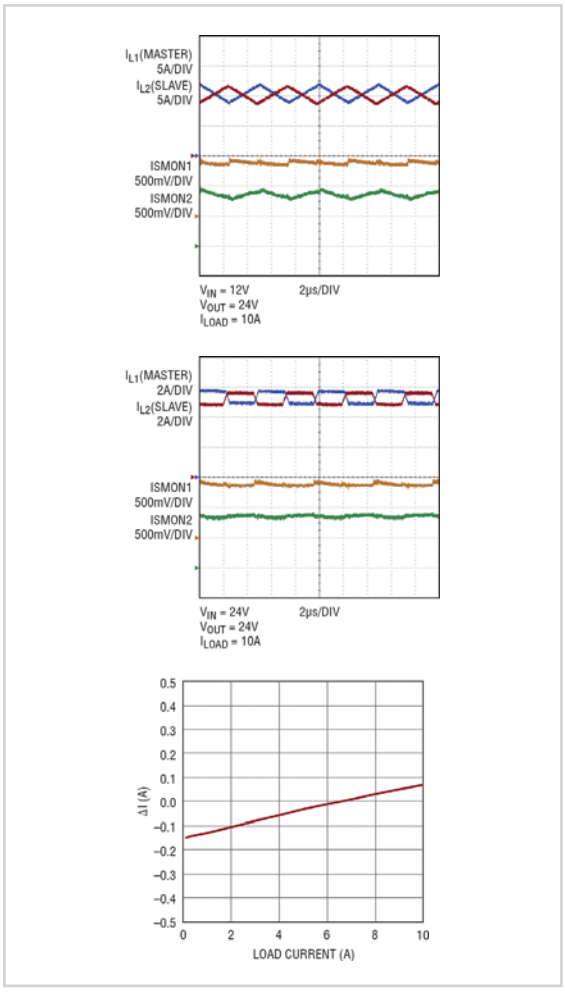
그림 3의 상단 컨버터(마스터)는 24V 출력 전압을 조절하고, 하단(슬레이브) 컨버터에 의해 조절되는 전류 레벨을 명령한다. 마스터의 ISMON 출력은 마스터가 얼마나 많은 전류를 제공하는지 나타내며, ISMON을 슬레이브의 CTRL 입력에 직접 연결함으로써 슬레이브는 마스터를 따르도록 종속된다. LT3790 ISMON 출력 레벨과 CTRL 입력 레벨은 동일하게 매핑되므로 하나의 컨버터에서 다른 컨버터로 직접 연결하는 것이 가능하며, 그렇게 함으로써 전체 출력 전류가 병렬 컨버터 사이에서 균등하게 공유되도록 한다**(그림 4 참조)**. 슬레이브의 출력 전압은 슬레이브의 전압 피드백 루프가 레귤레이션 상태에 있지 않도록 하기 위해 약간 높게(28V) 설정함으로써 슬레이브가 마스터를 따르도록 한다.

안정성 측정을 위한 루프 분석

과도 응답과 네트워크 분석기 루프 분석을 이용하면 안정성을 측정할 수 있다. **그림 5**에서 보듯이 50%~100% 전류의 과도 응답은 컨버터가 적절히 보상되고 있으며 부하 전류가 균등하게 공유되고 있다는 것을 보여준다. 네트워크 분석기를 이용한 추가적인 분석은 개별적인 컨버터에 대한 세부 사항을 제공한다. 제어 루프 보드 플롯을 생성하기 위한 잡음 주입 지정과 측정은 정전압 레귤레이터 마스터와 정전류 레귤레이터 슬레이브가 다르다.

그림 6에서 보듯이 개별적으로 섭동 신호를 주입하고 루프 응답을 측정함으로써 각각의 루프를 측정할 수 있다.

Figure 4. Parallel converter inductor and output current matching



providing, and by connecting ISMON directly to the CTRL input of the slave, the slave is forced to follow the master. The LT3790 ISMON output level and CTRL input level are identically mapped so that a direct connection from one to the other is possible, and doing so forces the total output current to be shared equally between the parallel converters, as shown in **Figure 4**. Note that the output voltage of the slave is set slightly higher (28V) so that the voltage feedback loop of the slave is not in regulation, allowing it to follow the master.

LOOP ANALYSIS FOR STABILITY

Transient response and network analyzer loop analysis

Figure 6. Loop response measurement of parallel converters

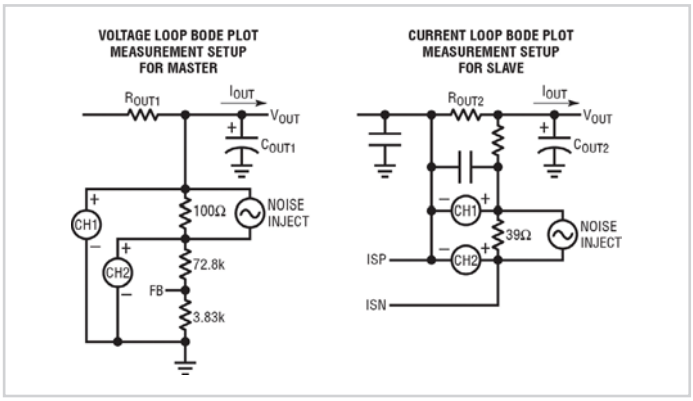
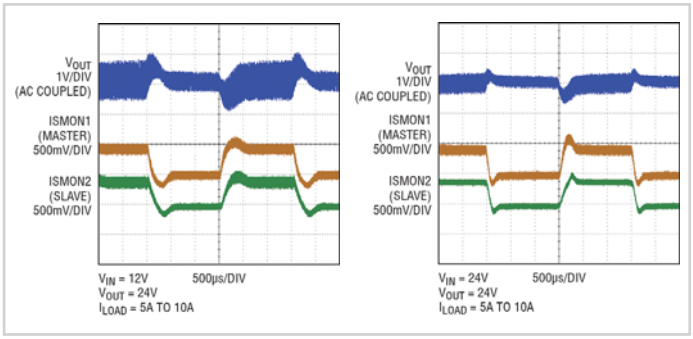


Figure 5. Parallel converter transient response evenly shares current

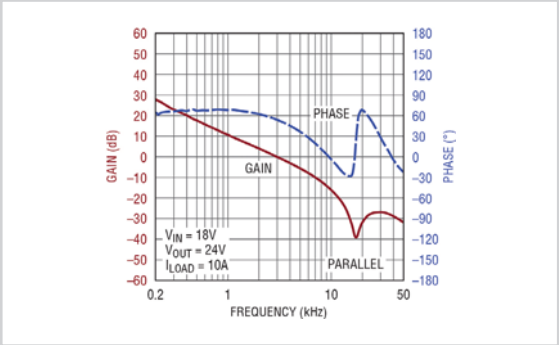


정전류 슬레이브는, 병렬 동작 시 사용되는 피드백 루프가 전류 루프 피드백이기 때문에, 전통적인 전압 피드백 경로 대신 전류 루프 피드백 경로에서 자체적인 루프 끊어짐과 신호 주입을 가져야 한다. **그림 7**의 마스터 보드 플롯은 시스템의 안정성을 보여준다.

요약

LT3790 동기식 벅-부스트 컨버터는 다양한 부하에 최대 98.5% 효율로 100W 이상을 공급할 수 있으며, 더 높은 전력 출력을 위해 손쉽게 여러 개의 컨버터를 병렬 연결할 수 있다. LT3790은 출력 전압 또는 전류를 제어할 수 있고, ISMON 출력 증폭기와 CTRL 입력 증폭기의 레벨 정합과 결합해 하나의 마스터 전압 레귤레이터와 하나 이상의 슬레이브 전류 레귤레이터를 간편하게 연결할 수 있다. 그 결과 높은 효율로 수백 와트를 공급할 수 있는 고출력 60V 벅-부스트 레귤레이션을 구현할 수 있다. SN

Figure 7. Bode plot shows measured results for parallel system.



can be used to measure stability. A transient response of 50% to 100% current, shown in **Figure 5**, demonstrates a properly compensated converter and equally shared load current. Further analysis with the network analyzer gives us the details of the separate converters. The noise injection point and measurement to generate control loop bode plots is different for the constant voltage regulator master and the constant current regulator slave. Separately, each loop can be measured by injecting the perturbation signal and measuring the loop response, as shown in **Figure 6**.

The constant current slave must have its loop broken and signal injected in the current loop feedback path instead of the traditional voltage feedback path since that is the feedback loop in use during parallel operation. The master bode plot in **Figure 7** demonstrates the stability of the system.

CONCLUSION

The LT3790 synchronous buck-boost controller delivers over 100W at up to 98.5% efficiency to a variety of loads, and it is easy to parallel multiple converters for even higher power outputs. The ability to control either output voltage or current, combined with the level-matching of the ISMON output amplifier and the CTRL input amplifier, simplifies the connection of a master voltage regulator and one or more slave current regulators. The result is high power 60V buck-boost regulation that can deliver hundreds of watts at high efficiency. SN