

견고한 핫스왑 애플리케이션에서 중요한 MOSFET SOA

Significance of MOSFET Safe Operating Area for Robust Hot Swap Applications

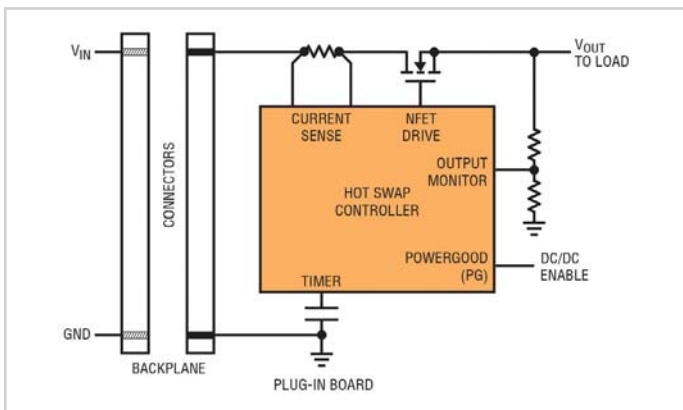
LTC4233 및 LTC4234 MOSFET 통합 핫스왑 컨트롤러는 솔루션 풋프린트를 소형화하고 설계 시간을 단축할 뿐만 아니라 혁신적으로 모든 컨트롤러에 대해서 생산할 때 SOA를 테스트를 함으로써 견고하면서 신뢰할 수 있는 솔루션을 제공한다.

글/Pinkesh Sachdev, Sr. Product Marketing Engineer, Mixed Signal Products
Linear Technology

머리말

절대 시스템이 다운되어서는 안되는 미션 크리티컬 (Mission-critical) 서버나 통신 장비는 유지보수나 용량 조정을 위해 회로 보드나 카드가 플러그되거나 제거되더라도 계속해서 동작해야 한다. 핫스왑 (hot swap) 컨트롤러 IC는 전원을 소프트 스타트함으로써 실행 중인 시스템으로 보드를 삽입 및 제거 등이 가능하며, 접속 스파크, 백플레인 전원 글리치, 카드 리셋을 방지한다. 컨트롤러 IC는 보드로 공급되는 전원과 직렬로 배치된 파워 MOSFET 스위치를 구동한다(그림 1). 보드가 플러그된 후, MOSFET 스위치는 서서히 턴온함으로써

그림 1: 플러그인 보드의 핫스왑 컨트롤러



Introduction

Mission-critical servers and communication equipment must continue operating even as circuit boards and cards are plugged-in or pulled-out for maintenance and capacity adjustment. Hot swap controller ICs enable such board insertion and removal from live systems by soft-starting the supply, avoiding connection sparks, backplane supply glitches and card resets. The controller IC drives a power MOSFET switch placed in series with the supply entering the board (Figure 1). After the board is plugged in, the MOSFET switch is turned on slowly such that the inrush current flowing in to charge up the load capacitors is kept at a safe level.

When hot swap circuits fail, the Achilles' heel is often the MOSFET switch, which in turn may damage or destroy the hot swap controller. The common reason for MOSFET failure is that sufficient attention was not paid to its safe operating area (SOA) during selection. Instead, the MOSFET was selected primarily for its drain-source on resistance ($R_{DS(on)}$) and maximum drain current ($I_{D(max)}$). Or, the new design was based on an older one with lower load capacitance where the same MOSFET worked

써 부하 커패시터를 충전하기 위해서 유입되는 돌입전류(inrush current)를 안정적인 수준으로 유지한다.

이러한 핫스왑 회로로 결함이 발생할 때 가장 취약한 지점이 MOSFET 스위치이다. MOSFET 스위치로 결함이 발생하면 이는 다시 핫스왑 컨트롤러를 손상시키는 것으로 이어질 수 있다. MOSFET 결함이 발생하는 가장 주된 이유는, MOSFET을 선택할 때 SOA(safe operating area: 안전 동작 영역)에 대해서 충분히 주의를 기울이지 않았기 때문이다. 대개의 경우에는 MOSFET을 드레인-소스 온 저항($R_{DS(on)}$)과 최대 드레인 전류($I_{D(max)}$)를 따져보고 선택한다. 대부분의 전력 MOSFET은 낮은 $R_{DS(on)}$ 과 빠른 스위칭을 달성하도록 최적화되어 있고 대다수 전원 시스템 설계자들은 습관적으로 이러한 특성을 따져서 MOSFET을 선택하므로, MOSFET이 상당 시간을 고 소비 전력 스위칭 상태를 전환하면서 보내는 회로에서 SOA를 간과하고는 한다. 또 다른 문제는 MOSFET 업체의 파라미터 선택 표에서 흔히 SOA를 다루고 있지 않다는 것이다. SOA를 다루고 있는 경우라 하더라도, SOA 데이터가 테스트 데이터가 아니라 계산에 기반한 것이어서 얼마만큼의 성능이 감소하는지, 이에 따라 얼마나 마진을 적용해야 하는지가 분명하게 나와 있지 않을 수 있다.

MOSFET의 SOA

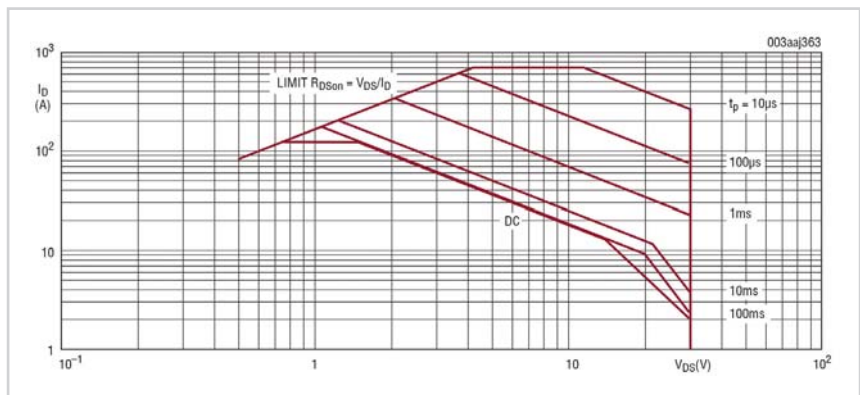
SOA는 MOSFET이 펄스 부하 또는 DC 부하로 전력을 처리할 수 있는 성능을 나타낸다. SOA는 MOSFET 데이터 시트에서 그림 2와 같은 그래프로 표시된다. x축은 MOSFET의 드레인-대-소스 전압(V_{DS})이고, y축은 드레인 전류(I_D)이다. 두 축 모두 로그 스케일이다. 이 그래프에서 직선은 일정한 MOSFET 전력을 나타낸다. 각각의 라인은 특정한 펄스 폭 t_p 일 때 MOSFET으로 허용 가능한 전력 소비를 나타낸다. t_p 는 마이크로초(microseconds)부터 무한대(DC)까지다. 예를 들어서 이 그래프에서는 10ms 펄스일 때 MOSFET

perfectly. Since the vast majority of power MOSFETs are optimized for low $R_{DS(on)}$ and fast switching, and most power system designers are habituated to selecting MOSFETs for those characteristics, SOA gets overlooked in circuits where the MOSFET spends significant time transitioning through the high-dissipation switching state. It does not help that SOA is not featured in MOSFET manufacturers' parametric selection tables. Even when attention is paid to SOA, the amount of derating or margin to apply is not evident as the SOA data is often based on calculations instead of test data.

MOSFET Safe Operating Area

SOA is a measure of the power handling capacity of the MOSFET for pulsed and DC loads. It is illustrated by a graph in the MOSFET datasheet as shown by the example in Figure 2. Its x-axis is MOSFET drain-to-source voltage (V_{DS}), while the y-axis is drain current (I_D); both axes use a logarithmic scale. On this graph, the straight lines (each for different t_p) depict constant MOSFET power. Each line represents power dissipation allowed in the MOSFET for a specific pulse width t_p , with t_p ranging from microseconds to infinity (DC). For instance, the graph shows that for a 10ms pulse the MOSFET can have 5V across drain-to-source with 50A flowing through it, which calculates to 250W of power dissipation. Lower power for the same

그림 2. PSMN3R4-30BLE N-채널 MOSFET의 SOA 그래프



이 드레인-대-소스 상에서 5V 차이가 난다면 50A가 흐를 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러면 250W 전력 소모에 해당된다. 동일한 펄스 폭으로 전력이 이보다 낮으면 MOSFET이 안전하게 동작할 수 있다는 뜻이다. 이것은 그래프 상에서 10ms 라인 하단의 영역에 해당된다. 바로 이러한 의미에서 안전 동작 영역(safe operating area)이라는 용어가 생겨난 것이다. 온 저항, 드레인-소스 항복 전압, 최대 펄스 드레인 전류에 따라서 그래프의 외곽이 결정된다.

핫스왑 애플리케이션에서 SOA의 중요성

대부분의 전력 MOSFET은, MOSFET이 온 및 오프로 빠르게 스위칭 하고 나노초(nanoseconds) 동안 고 전력 소비 전이 상태로 보내는 회로에 사용된다. 이러한 애플리케이션에서는 SOA가 그렇게 중요하지 않다. 하지만 돌

그림 3a. 12V 백플레인 전원으로 보드를 삽입했을 때의 소프트 스타트

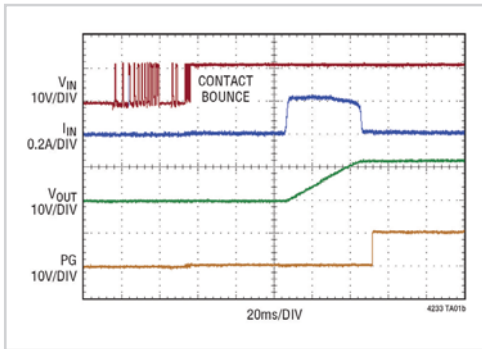
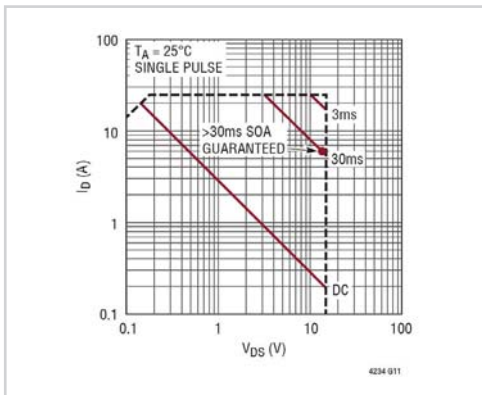


그림 3b. 출력 단락 회로 시의 전류 제한



입 전류 제어(소프트 스타트), 전류 제한, 회로 차단 같은 기능을 수행하는 핫스왑 회로에서는 SOA가 극히 중요하다. 왜 그런지 살펴보기 위해서 핫플러그 가능 보드의 스타트업 파형(그림 3a)을 살펴보자. 12V 백플레인 전원으로 보드를 삽입하면 핫스왑 컨트롤러가 커넥터 접촉 바운스가 끝나기를 기다렸다가 MOSFET 게이트를 소프

pulse width ensures safe MOSFET operation which can be denoted as an area of the graph under the 10ms line, leading to the term: safe operating area. The extremities of the graph are determined by on-resistance, drain-source breakdown voltage, and maximum pulsed drain current.

Why is SOA Important for Hot Swap Applications?

Most power MOSFETs are employed in circuits where they switch on and off quickly, spending nanoseconds in the high dissipation transition state. SOA is not a primary concern in such applications. In contrast, SOA is highly important for hot swap circuits, which provide inrush current control (soft start), current limiting and circuit breaker functions. To understand why, consider the start-up waveforms (Figure 3a) of a hot-pluggable board. When the board is inserted into a 12V backplane supply, the hot swap controller waits for the connector contact bounce to finish before soft-starting the MOSFET gate. The output voltage follows and reaches 12V in 40ms. For this soft-start period, 200mA of capacitive charge current flows through the MOSFET while its drain-to-source voltage ramps down from 12V (= 12V_{IN} - 0V_{OUT}) to almost 0V (= 12V_{IN} - 12V_{OUT}). When a short-circuit occurs at the load (Figure 3b), the controller limits current to 6A with 12V (= 12V_{IN} - 0V_{OUT}) across the MOSFET. This 72W dissipation state lasts for 1.2ms till the circuit breaker timer expires. In situations such as start-up inrush and current limiting, a hot swap MOSFET is required to handle significant power dissipation for hundreds of microseconds to tens of milliseconds and attention needs to be paid to its SOA performance.

Integrated MOSFET Hot Swap Controllers with Guaranteed SOA

Linear Technology offers a family of integrated MOSFET hot swap controllers, simplifying the hot swap designer's

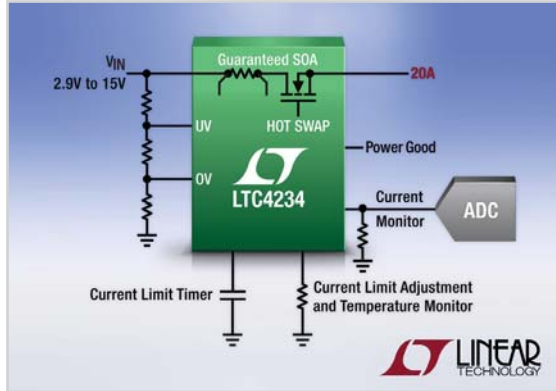
트 스타트한다. 출력 전압이 이를 추종하고 40ms 이내에 12V에 도달한다. 이 소프트 스타트 간격 시에 200mA의 커패시티브 충전 전류가 MOSFET을 통해서 흐르고 드레인-대-소스 전압은 $12V (= 12V_{IN} - 0V_{OUT})$ 에서 거의 $0V (= 12V_{IN} - 12V_{OUT})$ 로 떨어진다. 부하에서 단락 회로가 발생되면(그림 3b), MOSFET 상에서는 $12V (= 12V_{IN} - 0V_{OUT})$ 이고 컨트롤러가 전류를 6A로 제한한다. 회로 차단기 타이머가 완료할 때까지 1.2ms 동안 이 72W 소모 상태가 지속된다. 스타트업 돌입 제어나 전류 제한 같은 상태일 때는 핫스왑 MOSFET이 수백 마이크로초부터 수십 밀리초까지 상당한 전력 소모를 처리해야 하므로 MOSFET의 SOA 성능에 유의해야 한다.

SOA를 보장하는 MOSFET 통합 핫스왑 컨트롤러

리니어 테크놀로지는 MOSFET 통합 핫스왑 컨트롤러 제품군을 제공한다. 이들 제품을 사용함으로써 적합한 MOSFET을 선택하기 위해서 MOSFET 데이터 시트를 일일이 뒤져보지 않아도 되므로 핫스왑 디자이너의 작업을 간소화할 수 있다. 최근에 이 제품군으로 추가된 LTC4233과 LTC4234(그림 4)는 MOSFET과 전류 검출을 통합한 10A 및 20A 핫스왑 컨트롤러 제품들로서, 2.9V~15V 범위의 전원에 사용될 수 있다. 그러므로 표준 3.3V, 5V, 12V 전원을 지원한다. 또한 이들 컨트롤러 제품은 핫스왑 회로에서 가장 중요하고 크기가 큰 2개 소자인 전력 MOSFET과 검출 저항을 통합함으로써 설계 시간을 단축하고 보드 면적을 절약한다. 이렇게 해서 남는 자리에는 최종 제품으로 필요로 하는 추가적인 기능들을 집어넣을 수 있다.

독립형 MOSFET에서는 볼 수 없는 LTC4233과 LTC4234 컨트롤러의 차별화되는 점은, 데이터 시트를 통해서 내부 MOSFET의 SOA를 보장하며 각 디바이스를 생산할 때 SOA 그래프 상의 한 지점에서 테스트를 한다는 점이다. 그림 5는 LTC4234의 SOA 그래프를 보여준다. 입력에서 출력으로 13.5V를 인가하고 출력으로부터 30ms 동안 6A를 소싱해서 SOA를 테스트하고 있다. 결과적인 전력 소비는 81W이다. 이것은 SOA 그래프에서 빨간색 점으로 나타내고 있는 것이다.

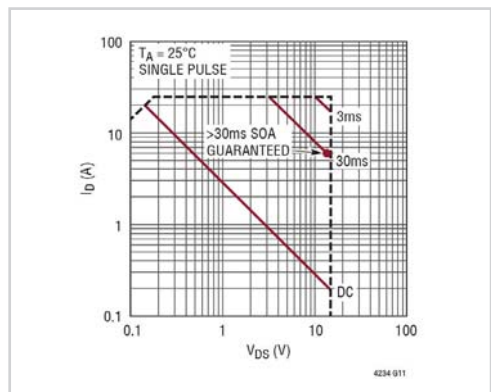
그림 4: LTC4234: 20A SOA 보장 핫스왑 컨트롤러



task by eliminating the time spent scouring MOSFET data sheets for the best fit. The latest additions to the family, LTC4233 and LTC4234 (Figure 4), are 10A and 20A hot swap controllers with integrated MOSFET and current sensing for supplies in the 2.9V to 15V range, covering standard 3.3V, 5V, and 12V supplies. By integrating the two most critical and largest Hot Swap components—the power MOSFET and sense resistor—these controllers free up design time and board area better spent on adding more valuable features to the end product.

A unique aspect of the LTC4233 and LTC4234 controllers, not found in stand-alone MOSFETs, is that the internal MOSFET's SOA is guaranteed in the data sheet, and each device's SOA is production tested at a single point on the SOA graph. Figure 5 shows the SOA graph for the LTC4234. Its SOA is tested by applying 13.5V from input to output and sourcing 6A from the output for 30ms. The resulting power dissipation is 81W. This is shown by the red dot in the SOA graph. The LTC4233 is tested


그림 5. 핫스왑 컨트롤러의 SOA 그래프



LTC4233은 동일한 30ms 시간 간격으로 동일한 전압에 전류와 전력은 절반으로 해서 테스트하고 있다. 다시 말해서 3A에 40.5W이다. 특히 주목할 점은, LTC4233과 LTC4234의 SOA 그래프는 최소 보장 SOA를 보여주는 반면에, MOSFET 데이터 시트는 정격 수치를 보여준다는 것이다.

LTC4233과 LTC4234는 또한 내부 검출 저항을 통해서 흐르는 부하 전류에 비례한 접지 참조 신호를 출력한다. 외부 아날로그-디지털 컨버터를 사용해서 이 출력을 측정함으로써(그림 4) 시스템 매니저로 보드 전류 및 전력 소모 데이터를 제공할 수 있다. 단일 외부 저항을 사용해서 전류 한계를 디폴트 값에서 낮출 수 있으므로 동적인 부하 변동이나 다양한 애플리케이션에 따라서 빠르게 조정을 할 수 있다. 또한 선택 가능한 저전압 및 과전압 임계값은 하위 부하가 유효한 범위를 벗어나는 것을 막을 수 있으므로 회로 오작동이나 손상을 방지할 수 있다. 핫플러그 기능이 필요하지 않은 경우라 하더라도 컨트롤러를 사용해서 돌입 전류 제어, 전류 제한, 회로 차단 기능을 수행할 수 있다. 이들 컨트롤러는 ‘미션 크리티컬’ 서버, 네트워크 라우터 및 스위치, 엔터프라이즈 솔리드 스테이트 스토리지, 산업용 시스템의 공간 제약적 고밀도 보드 및 카드에 사용하기에 적합하다.

맺음말

핫스왑 회로는 보드 전원에 대한 게이트웨이로 동작한다. MOSFET 결함은 MOSFET 하위의 값비싼 프로세싱 소자들을 손상시킬 수 있으며 핫스왑 컨트롤러 자신을 손상시킬 수 있다. 현장에 나가서 MOSFET 취약성 때문에 결함이 발생한다면 리콜을 하기 위해서 큰 손실이 초래될 수 있고 회사 평판에 타격을 입을 수 있다. 그러므로 선택한 MOSFET이 핫플러그 애플리케이션에서 겪는 스트레스를 신뢰성 있게 처리할 수 있는지 확인해야 한다. LTC4233 및 LTC4234 MOSFET 통합 핫스왑 컨트롤러는 솔루션 풋프린트를 소형화하고 설계 시간을 단축할 뿐만 아니라 혁신적으로 모든 컨트롤러에 대해서 생산할 때 SOA를 테스트를 함으로써 견고 하면서 신뢰할 수 있는 솔루션을 제공한다. 

with the same voltage but half the current and power level, i.e., 3A and 40.5W for the same 30ms time period. Keep in mind that the LTC4233 and LTC4234 SOA graphs show minimum guaranteed SOA whereas MOSFET data sheets show typical values.

The LTC4233 and LTC4234 also output a ground-referenced signal proportional to the load current passing through the internal sense resistor. This output can be measured with an external analog-to-digital converter (Figure 4) to provide board current and power consumption data to the system manager. The current limit is reduced from its default value with a single external resistor, affording quick adjustment for dynamic load changes and various applications. Selectable undervoltage and overvoltage thresholds protect downstream loads against voltages outside a valid window, preventing circuit malfunction and damage. Even where hot-plug is not required, the controllers perform inrush current control, current limiting and circuit breaker functions. Typical applications for these controllers are on space-constrained high-density boards and cards in mission critical servers, network routers and switches, enterprise solid state storage and industrial systems.

Conclusion

Hot swap circuits are the gateway to board power and a MOSFET failure can damage the expensive processing electronics downstream of the MOSFET in addition to the hot swap controller itself. Field failures, exposing MOSFET weakness, may involve costly recalls and consequent damage to reputation. Therefore, it is important to ensure that the chosen MOSFET reliably handles the stresses encountered in hot plug applications. The LTC4233 and LTC4234 integrated MOSFET hot swap controllers shrink solution footprint and design time while also guaranteeing a rugged and reliable solution with their novel production testing of every controller's SOA. 